Transactions of KSAE, Vol. 31, No. 7, pp.547-556 (July, 2023)

Check for updates

Copyright © 2023 KSAE / 212-07
pISSN 1225-6382 / eISSN 2234-0149
DOI http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2023.31.7.547

전기 이륜차용 자동변속기 적용의 실효성 평가(2)

박 우 영[1)]· 엄 인 용[*2)]

서울과학기술대학교 대학원 기계공학과[1)] · 서울과학기술대학교 기계 · 자동차공학과[2)]

Effectiveness Evaluation of Auto-Transmission Application for Electric Two-Wheeled Vehicle(2)

Wooyoung Park[1)] · Inyong Ohm[*2)]

[1)]*Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea*
[2)]*Department of Mechanical & Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea*
(Received 19 April 2023 / Revised 1 May 2023 / Accepted 3 May 2023)

Abstract：For evaluating the effectiveness of transmission application to electric two-wheeled vehicles, a vehicle equipped with a 6-speed automatic transmission and a vehicle equipped with only a reducer were compared and analyzed through chassis dynamometer and city driving, and the following conclusions were obtained. When the transmission was applied, the fuel efficiency of the CVS 40 was improved by 9.7 %, and the fuel efficiency of constant speed driving was improved by 3.9 to 14.6 %, but the improvement in fuel economy was greater in low-speed driving. Acceleration performance improved by 54 to 87 % in 4th gear or lower, but there was no improvement in the overdrive area of 5 th gear or higher. In addition, climbing performance has been greatly improved, and at the same time, it has stable characteristics. In addition, city driving fuel efficiency is improved by about 31 %, which is mainly due to improved efficiency in the low-speed region and reduced driving resistance. Finally, the electromagnetic force generated by the motor is also included in the driving resistance and affects the coasting performance.

Key words：Electric two-wheeled vehicle(전기이륜차), Transmission(변속기), Fuel economy(연비), Real road driving(실도로주행), Coasting(타행)

1. 서 론

대기오염 및 온난화 문제가 크게 대두됨에 따라, 수송 분야에서도 이를 완화시킬 수 있는 여러 방법 등이 제시되고 있고, 전기차 등과 같은 전기화도 이와 같은 맥락에서 활발히 진행되고 있다.

자동차 분야에서 국내의 경우 이륜차의 비중은 상대적으로 적어 2015년 기준 9.4 %인데,[1)] 경량 소형이기 때문에 이산화탄소 배출에는 크게 영향을 주지 않지만 배출가스에서 유해 물질의 양이 상대적으로 많아 수송부문 유해 배출량의 25 ~ 35 %를 차지한다.[2)] 따라서 이륜차의 유해 배출물을 억제하는 것은 매우 유효한 환경 정책이 될 수 있으며, 배기규제를 강화하여 얻을 수 있는 효과도 승용차보다 10배 정도 유리하여 경제적이기도 하다.[1)] 이에 따라 전기 이륜차의 보급 방안에 대해 활발한 논의가 진행되었지만,[3)] 주행성능, 1회 충전 당 주행거리 등의 문제로 실제 보급은 미미한 실정이다.

이러한 주행 성능과 주행거리의 개선을 위해 이전 연구[4)]에서 전기 이륜차에 변속기를 적용하여 그 효과를 살펴보았는데 이 결과를 요약하면 다음과 같다.

변속기를 적용하면 정속 주행 연비와 총 효율이 40 ~ 90 % 정도 크게 향상되고, 저속 운전에서 연비와 효율의 개선이 더 크게 나타나지만, 고속일수록 효율이 저하되는 반면, 단일 감속기의 경우 고속에서 효율이 증가한다. 그리고 변속기 적용 시 시가지 주행 연비가 90 % 정도 개

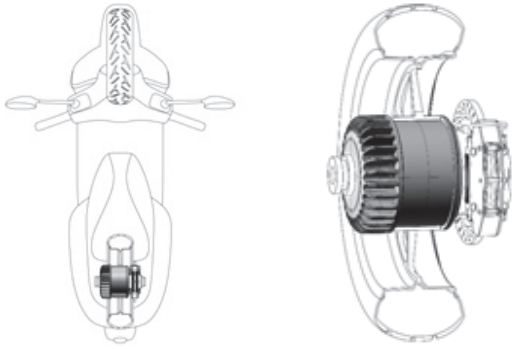
*Corresponding author, E-mail: iyohm@seoultech.ac.kr
*This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

선되는데, 이는 주로 저속 영역의 효율 개선에 기인한다.

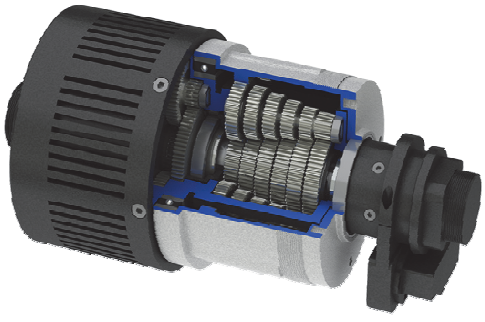
한편 이전 연구[4]에서도 언급한 바와 같이 이 연구에서는 차량의 중량과 모터의 출력이 상이하여 정확한 정량적 비교를 할 수 없었다. 특히 변속기를 적용한 경우 모터 출력이 현저히 적어 고속 영역에서 가속 성능의 저하가 예측되었기에, 일정 수준 이상의 출력이 보장되는 모터를 사용하여야 하고 변속비도 속도 및 기타 동력 성능을 고려하여 조절해야 변속기 적용의 효과가 충분히 나타난다 하였다.

이에 따라 본 연구에서는 동일한 새시를 사용하여 차량의 중량을 동일하게 하고, 변속기를 사용하는 경우 이전보다 고출력 모터를 장착하였으며 동시에 변속비도 변경한 새로운 차량을 제작하여 평가하였다.

또한 4륜 이상의 전기 차량에도 변속기 적용을 적용하면 모터 운전 영역을 고효율 영역으로 유도하고 특히 본 연구에서와 같이 저속에서 효율이 향상되므로[5-8] 이륜차보다 보급량이 많고 이산화탄소 발생에도 크게 영향을 주는 일반 전기 차에 변속기의 적용도 적극 검토해야 할 것으로 사료된다.



(a) Install position



(B) In-wheel motor-transmission assembly

Fig. 1 In-wheel motor-transmission (a) Install position and (b) Assembly for test vehicle

2. 차량 제원과 평가 방법

2.1 모터와 변속기

변속기는 6단 변속기로 모터와 일체로 차륜에 장착되는 인휠(In-wheel) 형식이며 이의 형상과 장착을 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 차량 제원

본 연구에서 사용된 이륜차는 현재 시판되는 것과 본 연구를 위해 동일한 모델을 개조한 것인데 그 제원을 Table 1에 제시하였다.

표에 제시된 바와 같이 모터의 최고출력과 변속기를 제외하면 두 이륜차는 동일하다.

변속 비는 정격출력 내에서 구현 가능한 등판능력과 속도를 고려하여 설정하였고 표에 제시된 변속 비는 종감속을 포함한 것이고 괄호 안에 변속기의 자체의 변속비를 나타내었다. 따라서 5단과 6단은 오버드라이브에 해당한다.

정격 출력은 동일하지만 변속기 적용의 최고 출력을 높인 이유는 고속에서의 가속 성능 향상을 위한 것으로, 변속기의 적용에 의해 고속에서 가속할 경우 모터의 약계자 영역 운전이 줄어들어 과도한 발열 없이 모터를 구동할 수 있기 때문이다.

이러한 변속 및 모터 제어는 모터제어장치(MCU, motor control unit)와 변속기제어장치(TCU, transmission control unit)를 통합한 동력전달 제어장치(PCU, power train control unit)를 자체 제작하여 사용하였다.

Table 1 Specifications of 2 electric two-wheeled vehicle

		Single	6-Speed
Weight	Empty	106 kg	106 kg
	Gross	181 kg	181 kg
Wheel/Tire		12 in./450 mm	
Motor	Type	SPMSM	
	Rated power	3.0 kW	
	Max. power	3.8 kW	4.5 kW
	Max. RPM	3600	
Gear ratio	1st		14.82 (3.000)
	2nd		11.041 (2.235)
	3rd		8.319 (1.684)
	4th		6.353 (1.286)
	5th		4.728 (0.957)
	6th		3.705 (0.750)
Battery		Li-Ion 72 V 30 Ah	

(a) Single reduction vehicle

(b) 6-speed transmission vehicle

Fig. 2 Two test vehicle (a) Single reduction and (b) 6-speed transmission

감속기 차량의 감속비는 공개된 자료가 없어 제시하는 것이 불가능하지만 차량의 공칭 성능을 기준으로 판단해 보면 변속기 차량의 5단 정도의 값으로 추정된다.

Fig. 2에 두 차량의 실제 사진을 제시하였다.

2.3 차대 동력계 및 실 도로 주행

차대 동력계를 이용한 CVS40 모드 주행,[9] 가속 성능, 등판 성능 및 각종 정속주행 평가는 대전시 소재 한국에너지 기술원구원에서 실시하였다. 차대 동력계 시험은 모두 환경부 고시 '제작자동차 시험검사 및 절차에 관한 규정' 중 '[별표 7의1] 전기이륜자동차 배출가스 측정방법'을 적용하였으며 구체적인 시험 내용은 다음과 같다.

먼저 모든 차대동력계 주행시험에서 등가관성중량 및 흡수마력은 규정에 의해 두 차량 모두 동일하게 설정하였다(110 kg, 0.9 kW). 가속 성능 시험은 정지 상태에서 전 부하로 주행하여 주행거리가 400 m에 도달할 때까지 실시하였고 이를 3회 반복하였다. 정속 시험은 15, 35, 50 km/h에 대해 1회 실시하였고 이에 더해 최고 속도

Fig. 3 Real road test route in Nowon-Gu

(감속기는 62 km/h, 변속기는 82 km/h)에서의 주행은 3회 실시하였다. 등판 성능은 최고 등판능력을 3회 연속하여 실시하였다.

실 도로 주행은 1회 충전 주행 거리의 측정을 위해 실시하였는데, 배터리를 완충한 상태에서 주행을 시작하여 배터리가 완전히 방전되어 주행이 불가능할 때 종료하였다. 주행 경로는 서울시 노원구 동일로 일대 순환경로(9.5 km)에서 이루어졌고 경로 지도를 Fig. 3에 제시하였다. 실 도로 주행시험에서 동일한 조건의 비교를 위하여 두 차량을 동시에 주행시키고 동시에 탑승자의 중량도 보조물을 이용하여 75 kg으로 일정하게 하였다. 마지막으로 평균 구배 -0.47 %로 평탄 로에 가까운 도로에서 두 차량을 동시에 주행시키는 타행(Coasting) 시험을 실시하여 주행 저항을 비교하였다.

주행거리와 속도는 각각의 차량에 GPS(GARMIN Edge 820)를 장착하여 측정하였다. 차대 동력계와 실 도로 시험에서 모두 전력 품질 분석기(Power quality analyzer, Tekon, model 560CE)를 장착하여 전압, 전력 및 소모 전력에 대한 데이터를 획득하였다.

3. 주행 성능 평가

3.1 CVS 40

Fig. 4에 차대동력계에서 CVS 40 모드로 주행한 결과를 나타내었다. 그림에는 주행 속도와 누적 에너지 소비량 그리고 변속 시점을 동시에 도시하였다.

그림에서 알 수 있듯이 두 차량 모두 CVS 모드 주행 속도 패턴을 만족하며 주행하였다. 변속기를 장착한 경우 5단까지 사용하였으며, 총 1170초 중 아이들을 제외한 주행 시간 815초 중 1단 35.1 %, 2단 8.3 %, 3단 37.4 %, 4단 7.3 %, 5단 11.9 % 비중으로 운전되어 1단과 3단이 총 운전 기간의 70 % 이상을 차지한다.

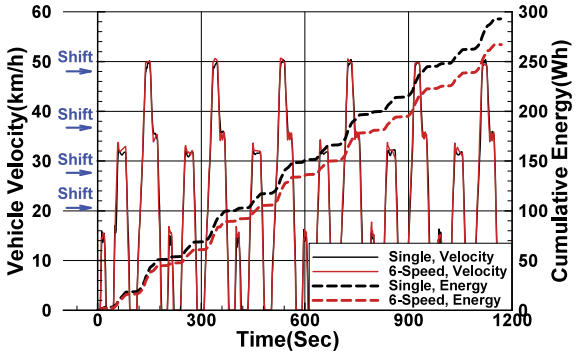


Fig. 4 Vehicle velocity and cumulative energy in CVS 40 mode

모드 주행 중 직류 에너지 소비량은 단일 감속기의 경우 20.7 km/kWh 그리고 변속기 적용의 경우22.7 km/kWh로 변속기적용에 의해 9.7 % 정도 연비가 개선되었다. 연비에 대한 더 구체적인 논의는 여러 주행 결과를 분석한 후 논문의 후반부에서 종합하여 다루기로 한다.

3.2 가속 및 등판 성능

Fig. 5와 Fig. 6은 400 m 주행까지의 가속 성능 평가 결과를 나타낸 것으로, Fig. 5는 시간 기준 그리고 Fig. 6은 주행거리 기준으로 나타낸 것이다. 이 그림에서도 시간 및 거리에 따른 변속 시점을 표기하였다. 상기에서 언급한 바와 같이 가속 시험은 3회 실시하였는데 이 그림은 이 중 첫 번째 시험 결과이다. 이 결과를 논의하면 다음과 같다.

변속기를 채택한 경우 전체 주행구간에서 모든 변속기 단수를 사용하였는데, Fig. 5에서 시간 기준으로는 11초 경과 후 그리고 Fig. 6에서 거리 기준으로는 137 m 주행 이후 최 고단 단수에 도달함을 알 수 있다. 변속 단수에 따른 가속 성능은 1단에서는 단일 감속기에 비해 가속 성능이 54 %, 2단 87 %, 3단 62 % 그리고 4단에서 55 % 정도 향상되었다. 5단 이후에는 그림에서 관찰되듯이 두 차량 모두 가속도가 작아 비교의 의미는 없으나 변속기를 장착한 경우 근소하게 높음을 알 수 있다.

전체적으로 4단 이하에서 변속기 장착의 경우 가속 성능이 크게 향상되었지만 이는 전적으로 변속기에 의한 효과만으로 볼 수는 없다. 앞에서 언급했듯이 변속기를 장착함으로써 모터의 운전영역에 변화가 생기기 때문에 이에 맞도록 동력전달 제어장치를 새로이 구성하였는데, 정격 전류 이상을 사용하는 구간과 최고 전류를 확대하는 것이 가능하였다. 이에 따라 Fig. 6(b)에 도시된 바와 같이 과도(Transient) 운전 중 짧은 시간동안 더 많은 전류를 공급하였고 이로 인한 여유 구동력의 증가

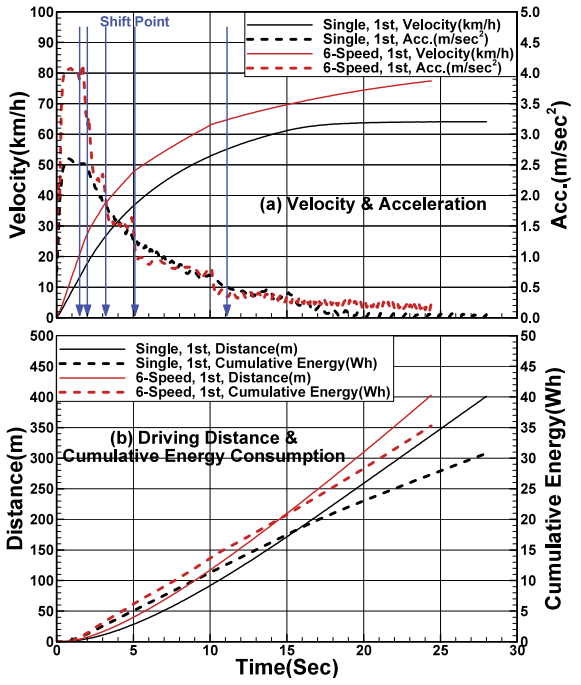


Fig. 5 Time base acceleration performance (a) velocity & acceleration and (b) driving distance & cumulative energy consumption

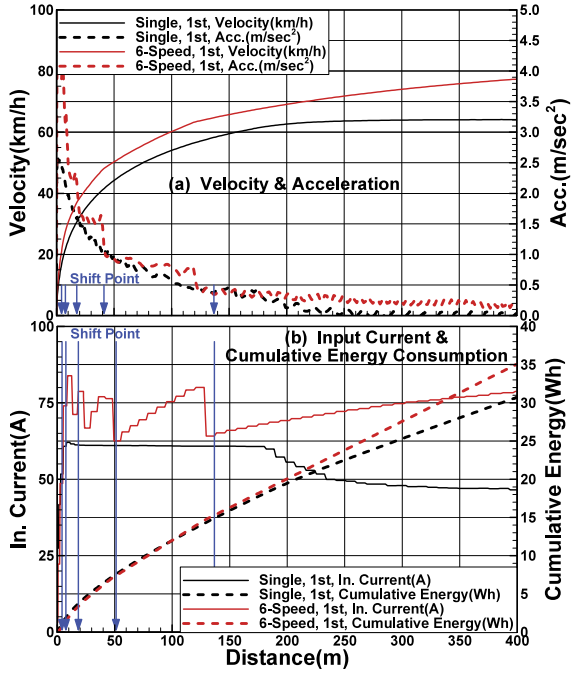


Fig. 6 Distance base acceleration performance (a) velocity & acceleration and (b) input current & cumulative energy consumption

로 가속 성능이 추가로 향상되었다. 반면 전류량이 증가함에 따라 가속 운전 중 에너지 소비량은 증가하였는데 400 m 3회 주행 평균 30 Wh에서 35 Wh로 약 16 % 증가하였다.

Fig. 5에서 시간 기준으로 에너지 소비를 보면 변속기 적용의 경우 가속이 빠르므로 전 구간에 걸쳐 에너지 소비가 높다. 그러나 Fig. 6의 거리 기준으로 보면, 100 m 주행까지는 두 차량의 소비량은 거의 동일한 수준이며 이때 감속기 차량의 속도는 54 km/h 그리고 변속기의 경우 60 km/h이다. 이 지점에서 변속기는 5단 주행 상태이며 이후 주행거리 증가에 따라 변속기의 소비량이 증가한다. 아울러 6단 변속(137 m, 65 km/h)이 되고 주행거리가 200 m를 너머서면 변속기의 소비량이 크게 증가한다.

Fig. 7에는 3회의 가속 시험에 대해 각각 속도 구간별 평균 가속도와 에너지 소비량을 도시하였다.

그림에서 알 수 있듯이 출발 직후 및 일부 70 km/h 이상에서 편차가 보이기는 하지만 대부분의 속도 구간에서 재현성 있는 결과가 도출된다. 이 결과는 Fig. 5와 6에서 나타나지 않은 특성을 보여 주는데, 이를 통해 가속 성능에 대해 다음과 같은 추가적인 해석이 가능하다.

먼저 단일 감속기의 경우 20 km/h까지 일정 수준을 유지하다가 이후 직선적으로 감소한다. 당연한 결과이지만 변속기의 경우 저단인 1, 2단에서 가속 성능이 높고, 전 구간에서 감속기보다 가속 성능이 우수하지만 최고 가속 성능 구간(10→20 km/h) 이후 상대적으로 성능 저하 폭이 크게 나타난다. 특히 70 km/h 이상(6단)에서는 거의 가속이 되지 않고 성능의 재현성도 떨어진다. 이것은 이때의 총 감속비가 단일 감속기보다 작고, 동시에 모터 출력의 한계에 거의 도달했기 때문이며 이것이 고속 가속 구간에서 에너지 소비 증가의 원인으로 판단된다.

동시에 Fig. 5와 6에서는 가속 중 변속기 장착 차량의

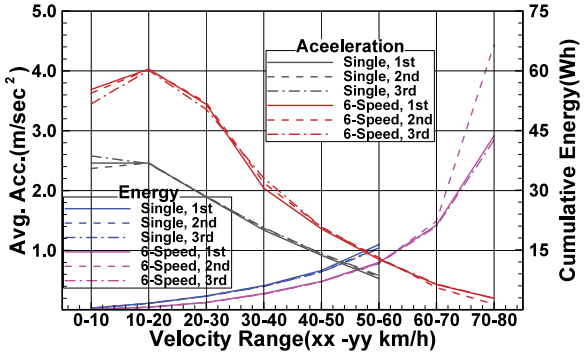


Fig. 7 Average acceleration and energy consumption as a function of velocity range

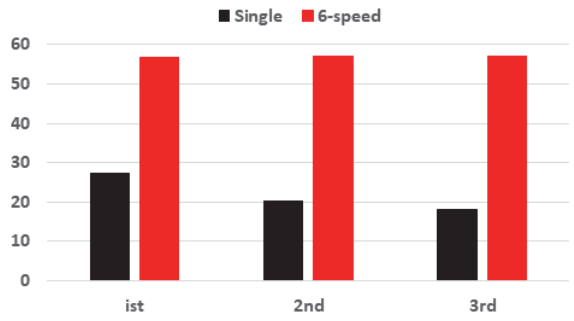


Fig. 8 Maximum climbing ability(%)

에너지 소비가 더 크게 나타났는데 Fig. 7을 보면 동일 속도 기준에서 60 km/h까지의 가속에서 오히려 단일 감속기의 에너지 소비가 더 큼을 알 수 있다. 다만 60 km/h 이상의 속도에서 가속을 할 때 변속기 차량의 에너지 소비가 급격히 증가하는데, 400 m에 도달 할 때 속도가 74 ~ 77 km/h 임을 고려하면 앞에서 언급한 고속 영역에서의 에너지 소비 증가가 전체 가속 구간의 에너지 소비 증가의 원인임을 알 수 있다.

Fig. 8에는 두 차량의 등판 성능 시험 결과를 나타내었는데, 등판 성능은 차대동력계를 정속 제어버전으로 설정하고 5 km/h로 안정된,후 가속기를 모두 가동하고 50 m를 주행하며 최종 10 m에서 차량의 최대 평균 출력을 얻고, 이를 연속으로 3회 실시하였다. 등판능력은 상기 [별표 7의1]에 제시된 식을 사용하였다.

변속기 적용에 의해 등판능력이 크게 개선되는 것은 지극히 당연하지만 두 차량을 비교할 때 가장 큰 특징은 변속기 적용의 경우 3회 연속시험에서 능력이 56.8 %, 57.1 %, 57.0 %로 거의 변화가 없지만 감속기의 경우 27.4 %, 20.4 %, 18.0 %로 감소한다는 것이다. 이는 감속기 차량의 경우 연속 등판 시 열 발생으로 과전류 사용이 제한되는 반면, 변속기 차량에서는 위에서 언급한 바와 같이 변속기 사용에 적합한 동력전달 제어를 통해 열 발생을 억제하며 과전류 사용 기간이 증가하였기 때문이다. 단일 감속 차량에서 열 발생으로 인한 성능저하는 최고속도, 가속도 등 전 항목에서 나타나는 현상이기도 하다.

3.3 정속 주행

Fig. 9에는 15, 35, 50 km/h 정속 그리고 Fig. 10에는 각각의 최고 속도인 64 km/h와 82 km/h로 차대 동력계 상에서 실시한 정속 주행의 연비(전비, km/kWh)와 연비를 나타내었다.

먼저 동일 속도에서 실시한 결과인 Fig. 8에서, 변속기 적용 차량의 연비는 단일 감속기 차량보다 연비는 개

Fig. 9 Fuel economy on chassis dynamometer at constant velocity

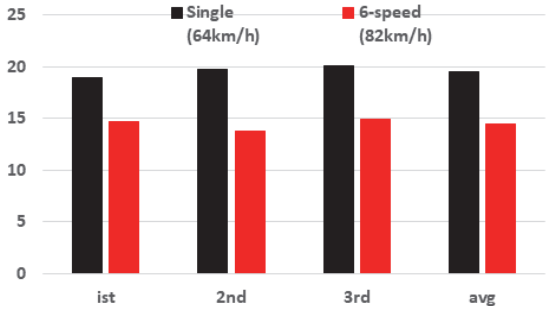


Fig. 10 Fuel economy on chassis dynamometer at maximum velocity

선되지만, 각각의 속도에서 14.6 %, 4.3 %, 3.9 %로 그 개선은 크지 않다. 이것은 비록 차량의 중량과 모터 출력이 상이한 두 차량을 비교한 것이지만, 지난 연구[4]에서 30 ~ 50 km/h 정속에서 47 ~ 100 %의 개선과 큰 차이가 있다. 다만 저속 주행일수록 변속기 장착 차량의 연비가 개선된다는 점은 일치한다. 이러한 연비 차이는 앞서의 CVS 40 모드의 연비 결과와 함께 역시 뒤에서 논의하겠다.

최고 속도에서 실시한 Fig. 10에서, 변속기 장착의 경우 시험 횟수마다 차이가 있지만 3회 평균 연비가 26 % 악화되는 것으로 나타났다. 이는 가속과 정속 주행은 차이가 있지만 Fig. 7 관찰되듯이 고속 구간 가속에서 연비가 매우 악화되어 있기 때문으로 판단되는데 속도 증가에 따른 주행 저항의 증가와 모터가 거의 정격 출력 영역에서 사용되기 때문에 효율 저하 등이 원인이라 판단된다.

3.4 실 도로 주행

Fig. 11에 Fig. 3에 도시된 순환 경로를 따라 시가지 주행을 한 결과를 나타내었다. 두 차량은 동시에 주행을 하였기 때문에 속도 변화 형태는 유사하므로 도시하지 않았고 전압 변화와 총 누적 에너지 사용량을 나타내었다.

그림에 나타나 있듯이 두 차량은 모두 배터리가 동일한 완충 상태에서 주행을 시작하였고, 평균 속도는 27.1 km/h(감속기)와 27.4 km/h(변속기) 그리고 주행 종료 시까지 총 사용한 에너지도 2220 Wh와 2260 Wh로 거의 동일하다. 그러나 총 주행거리는 58.7 km 대비 78.9 km로 변속기 장착의 경우 주행 거리가 34 % 증가하였고, 연비는 누적 에너지 사용량에 약간의 차이가 있어 31 % 증가하였다.

연비 개선 원인을 분석하기 위해 주행 기간 중 모터로 공급되는 전류의 평균을 비교한 결과 9.52 A(감속기)와 7.42 A(변속기)로 평균 공급량은 22 % 감소함을 알 수 있다. 동시에 에너지 소비량의 변화 형태를 관찰하면, 감속기의 경우 대체로 직선적으로 증가하는데 비해 변속기의 경우 증가의 속도가 매우 둔화되는 구간이 존재하여 계단식으로 증가한다. 그리고 이 둔화되는 구간에서 양자의 소비량 차이가 확대되고 있음을 알 수 있다. 따라서 변속기를 적용하여 에너지 소비는 줄어듦을 알 수 있지만, 공급 전류 감소 대비 연비 개선이 크고 동시에 모드 주행 및 정속 주행의 연비 개선보다 실 도로 주행에서 훨씬 더 연비가 크게 개선되었다. 이러한 연비 차이의 발생 원인과 변속기 적용의 실효성에 대해 논의해 보고자 한다.

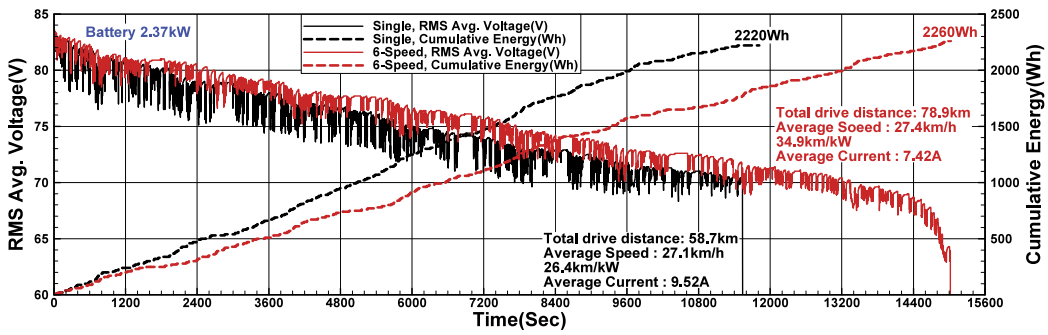


Fig. 11 Cumulative energy consumption and RMS voltage up to full discharge in real road drive

4. 연비 분석과 변속기 실효성 검토

앞에서 차대 동력계에서 실시한 각종 성능과 도로 주행 성능에 대해 논의하였는데, 여기서는 이중 연비에 대해서만 논의하고자 한다.

Table 2에 여러 시험에서 평가된 연비를 요약하여 제시하였다. 전체적으로 차대 동력계에서 정속 연비와 모드 주행 연비는 변속기 적용에 따라 향상되지만 가속 중 연비와 최고 속도 연비는 악화되고, 도로 주행 연비는 대폭 개선된다. 한편 Fig. 7에 나타낸 속도 구간별 가속 성능에서 60 km/h까지의 에너지 소비는 변속기가 유리하지만, 표에서 60 km/h까지 도달할 때의 연비는 오히려 불리하게 나타난다. 그 이유는 변속기 적용의 경우 빠른 가속에 의해 총 에너지 소비는 줄지만 그 만큼 해당 속도에 도달할 때까지의 주행거리가 줄어들기 때문이다.

여기서 동력계 상에서 연비의 변화는 서로 상응하는 측면이 있지만 도로 주행 연비와의 차이는 매우 크게 나타나는데 이를 분석하면 다음과 같다.

먼저 가속과 감속을 반복하는 CVS 모드에서 연비는 9.7 % 개선되었는데, 모드 주행의 평균 속도가 아이들 포함 시 18.7 km/h이고 주행만 고려한 경우 27.0 km/h이므로 정속 주행 연비의 향상과 가속 구간 중 연비의 악화를 동시에 고려하면 모드 주행의 연비 개선비율은 합리적 범위에 들어온다고 판단된다.

한편 평균 주행 속도가 27 km/h인 도로주행의 경우 CVS 40의 평균 속도인 18.7 km/h보다 주행속도가 높아 오히려 연비 개선의 폭이 줄어들어야 한다. 그 이유는 이전 연구[4]에서 보았듯이 변속기 적용의 경우 저속에서의 연비 개선이 더 크고 본 연구에서도 저속일수록 연비 개선이 크게 나타났기 때문이다. 그러나 Table 2에 제시된 바와 같이 도로 주행의 연비 개선은 30 %를 넘어 정속 주행의 개선 보다 훨씬 높은 수준을 보여주고 있다. 이러한 차이를 발생시키는 것은 실제 주행에서 주행저항이 차이가 나는 경우만 가능하기, 주행저항의 평가를 위해 때문에 타행성능을 평가하였다.

타행 주행 평가에서 차량은 동력발생장치와 연결을 끊고 주행하는데, 전기이륜차에서는 이 부분이 불가능하다. 이와 더불어 동력전달장치에서도 구성을 달리한다. 이에 따라 통상적인 차량의 결과와 차이점이 많기 때문에 여러 측면에서 자세히 분석해 보기로 한다.

Fig. 12에 타행거리 기준으로 속도 변화를 나타내었는데, 변속기의 타행 주행거리는 481 m로 감속기의 381 m 대비 26 % 정도 증가하여 주행저항이 크게 감소하였음을 보여준다. 이러한 주행 저항의 감소와 차대 동력계에서 동일 흡수 마력 적용을 동시에 고려하면 실 도로 주행 연비의 대폭 개선에 대한 설명이 가능하다. 여기서 주행 저항의 감소에 원인에 대해 논의해 보기로 한다.

통상적으로 가속과 감속 또는 타행주행에서는 회전부분상당중량(Equivalent mass of rotating parts)의 고려가 매우 중요한데, 이 중량에 큰 영향을 미치는 것은 변속기와 변속 단수이다.[10] 여기서 두 차량은 중량이 동일하기 때문에 변속기(또는 감속기)가 이 중량에 가장 큰 영향을 준다고 볼 수 있다. 여기서 단위 거리 당 차량의 감속 량을 감속 구배라 정의하였는데, 그 단위는 $(m/s)/m = /s$가 된다. 그림에 두 차량의 평균 감속구배(AVRG, average velocity reduction gradient, /s)를 변속단수 및 거리 구간에 따라 제시하였다. 타행은 기본적으로 차량의 운동에너지($1/2\,mv^2$)가 주행 저항력이 행한 일($F \cdot D$에너지)로 상쇄되는 것이므로 이 구배는 단위시간당 평균 에너지 소비의 파라미터로 볼 수 있다.

먼저 감속기의 전 구간 평균 감속 구배는 0.036/s로 변속기의 평균 0.029/s보다 24 % 정도 크다. 특이한 것은 감속기의 경우 일정 속도(또는 거리)를 중심으로 구배가 매우 달라지는데, 속도 28 km/h(210 m)를 기준으로 구배가 뚜렷이 구분되어, 28 km/h이상에서는 0.029/s인데 비해 그 이하에서는 0.045/s로 매우 큰 차이를 보여준다.

Table 2 Fuel economy at various test condition

		Single	6-Speed	(%)
CVS 40		20.7	22.7	9.7
Acceleration(to 60 km/h)		9.6	8.3	-13.6
Constant velocity	15 km/h	24.8	28.5	14.6
	35 km/h	23.2	24.2	4.3
	50 km/h	19.8	20.5	3.9
Max. velocity @(km/h)		19.6 @64	14.5 @82	-26.0
Real road @ Avg. velocity(km/h)		26.6 @27.1	34.9 @27.4	31.4

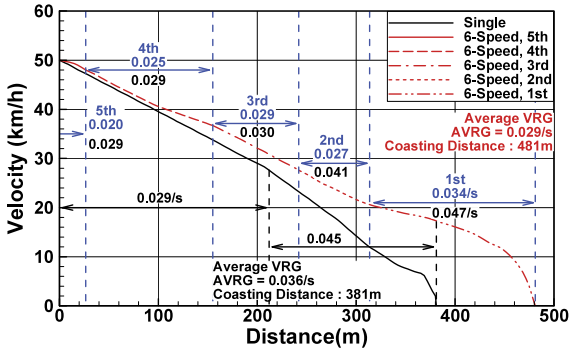


Fig. 12 Velocity as a function of distance during coast

반면 변속기의 경우 구배는 주로 변속 단수의 지배를 받는 경향이 뚜렷이 나타나 5단이 0.020/s로 가장 작고 4단 0.025/s 3단 0.029로 증가하였다가 2단에서는 0.027/s로 약간 감소한다. 마지막으로 1단에서 0.034/s로 증가한다. 따라서 변속기의 모든 단수에서 감속기 평균 구배보다 작고, 1단을 제외하면 감속기의 구배가 작은 구간보다도 낮다. 이러한 변화는 기본적으로 회전부분상당중량이 고단에서 작고 저단일수록 크기 때문에 나타난다고 볼 수 있지만 이것만으로 충분한 설명은 되지 않는다.

Table 3에는 타행 중 속도구간별 감속도(가속도)를 나타내었는데 표에 제시된 바와 같이 10 km/h 이하를 제외하면 모든 구간에서 변속기의 감속도가 적고 특히 10 ~ 30 km/h구간에서 차이가 크다. 이에 따라 대체로 이 속도 구간의 운행이 많은 시가지 도로 주행에서 연비가 크게 개선된 것으로 판단된다.

Fig. 13에는 시간에 따른 속도 변화를 변속 단수와 함께 나타내었는데, 감속도의 크기는 4, 5단에서 가장 크고 3단에서 약간 감소하지만 2단부터 크게 감소한다. 그리고 1단에서 가장 작지만 10 km/h 이하에서는 Table 3에 제시된 바와 같이 다시 증가한다. 감속기의 경우도 저속에서 감속도가 낮지만 변속기에서와 마찬가지로 저속인 6 km/h 이하에서는 다시 증가한다.

Table 3 Acceleration during coast

Velocity range (km/h)	Deceleration(m/sec^2)		(%)
	Single	6-Speed	
50 ~ 40	0.363	0.325	-10.4
40 ~ 30	0.286	0.242	-15.4
30 ~ 20	0.262	0.180	-31.5
20 ~ 10	0.182	0.091	-50.2
10 ~ 0	0.083	0.135	63.1

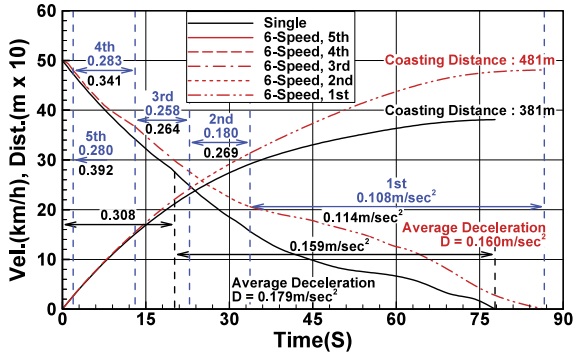


Fig. 13 Velocity and distance as a function of time during coast

Fig. 14에는 타행 속도에 따른 주행 거리를 나타낸 것이다. 그림에 변속기의 각 단수별로 주행거리를 나타내었고 이에 상응하는 속도구간에서 감속기 차량의 주행거리를 동시에 나타내었다.

각 변속 단수에서 주행거리를 보면, 1단(0 ~ 21 km/h)에서의 주행 거리가 가장 길어 총 타행 거리의 35 %에 해당된다. 동시에 10 km/h이상에서는 속도 증가에 따라 거리도 급속히 증가하지만, 이후 속도 증가에 따라 직선적으로 증가한다. 감속기의 경우도 이 속도 구간에서 주행거리가 가장 길어 타행 거리의 32 % 정도이지만 6 ~ 8 km/h 구간에서 거리가 급격히 증가하고 이후 기울기가 다른 두 구간으로 나뉘어 직선적으로 증가한다. 1단에서 변속기의 주행거리는 감속기보다 38 % 증가하였다.

2단(21 ~ 27 km/h)에서 두 차량의 차이는 크게 나타나는데, 주행 거리는 다른 단수에 비해 짧지만 상대적인 차이는 가장 커서 변속기의 주행 거리가 감속기 대비 49 % 증가하였다.

3단(27 ~ 37 km/h)에서는 두 차량 간 차이는 거의 없다. 5단(48 ~ 50 km/h)에서는 주행거리와 시간이 짧아 4단(37 ~ 48 km/h)과 5단을 합하여 한 구간으로 고려하면, 1단 다음으로 주행거리가 길고 감속기보다 22 % 주행거리가 증가하였다.

지금까지 살펴 본 변속 단수 및 속도에 따른 타행 특성을 종합해보면 다음과 같다.

두 차량은 차체와 중량이 동일하고 동력 전달장치인 변속기 또는 감속기 부분에서만 차이가 난다. 따라서 회전부분상당중량은 감속기의 경우는 전체 범위에서 동일해야 하고, 변속기는 저단으로 갈수록 증가하여야 한다.

변속기의 경우 5단에서 3단까지 변속될 때 타행 성능이 저하되는 것은 회전부분상당중량으로 어느 정도 설명 가능하다. 그러나 저단인 1, 2단에서 오히려 감속기보다 타행 성능이 개선된 것은 이것만으로 설명할 수 없다.

감속기와 비교해서 보면 대체로 4단 이상에서는 타행

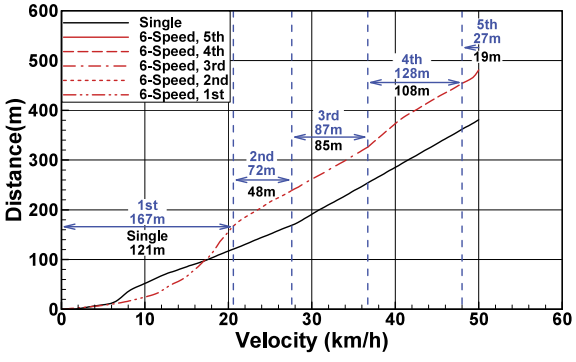


Fig. 14 Distance as a function of velocity during coast

성능이 20 % 정도 개선되고 3단에서 급격히 차이가 감소하여 거의 동일한 수준이다. 회전부분상당중량이 지배적 요인이면 이어서 2단에서 두 차량의 타행 성능은 역전되어야 하는데 오히려 가장 큰 폭으로 개선된다. 2단보다 차이는 줄지만 1단에서도 변속기의 타행 성능이 개선된다. 따라서 4단 이상에서의 개선보다 1, 2단에서의 개선이 더 크게 나타난다.

이로 미루어 볼 때 회전부분상당중량 외에 다른 요인이 크게 작용한다고 볼 수 있는데, 동력발생장치인 모터가 변속기 또는 감속기를 통해 항상 구동륜과 연결되었고 회생제동 기능이 없음을 고려하면, 타행 중 모터가 강제 회전되면서 발전기로 동작하였지만 재충전 수단이 없어 회로 내에서 열로 소산되어 에너지의 손실을 초래한 것으로 판단된다. 이때 변속기의 경우 발전에 의한 저항력이 줄어들어 주행저항을 감소시킨 것으로 판단된다.

즉 타행 중에 동력학적 요인 외에 전자기적 힘이 동시에 작용하였고, 변속 단수에 따라 두 요인이 미치는 상대적 크기가 다르기 때문이다. 구체적으로, 4단 이상에서는 감속기와 변속기의 최종 감속비가 크게 차이가 나지 않아 모터가 유사한 조건에서 회전하므로 대체로 회전부분상당중량의 영향이 크고, 반면 저단에서는 변속기의 회전부분상당중량이 크지만 이에 의한 저항력의 증가보다 모터에서 발생하는 저항력의 감소가 더 지배적인 역할을 한 것으로 판단된다. 그리고 3단에서는 어느 쪽도 지배적 역할을 하지 않아 성능에 큰 차이가 없게 된다.

이상과 같이 변속기가 전기 이륜차의 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 변속기의 장착에 의해 가속, 등판 성능 향상 및 최고 속도 개선을 얻을 수 있었는데, 이는 변속기 적용을 통해 얻을 수 있는 일반적 효과이다.

반면 연비 향상 효과는 차대동력계 상에서 모드 주행 연비가 10 % 수준 그리고 정속 연비가 4 ~ 15 % 개선되었지만 지난 연구[4] 대비 그 개선 폭은 크게 감소하였다. 실 도로 주행에서 연비는 31 % 정도 개선되었지만 이 역시 지난 연구에 비해 개선 폭이 작다. 이것은 지난 연구에서는 차량의 중량과 모터의 출력이 상이한 상태에서 비교한 것이므로 중량이 적고 출력이 작은 변속기 차량이 크게 유리했기 때문이다. 따라서 이러한 차이가 배제된 이번 연구 결과가 실제 효과를 잘 보여준다고 할 수 있다.

아울러 연비에 큰 영향을 주는 타행 성능은 변속기 장착의 경우 크게 개선되었는데, 이 개선은 저단에서 더 크게 나타났다. 이것은 전기 이륜차의 경우 모터에서 발생하는 전자기력을 고려해야 함을 시사한다고 볼 수 있다. 또한, 동력계 상 흡수 마력을 동일하게 두지 않고 실제 주행저항을 반영하면, 동력계 상에서 측정한 연비는 다소 개선되리라 판단된다.

마지막으로 적용한 변속 단수 및 변속 비를 검토해 보면, 최 고단에서 가속 성능이 매우 나쁘고 연비가 악화되는 부분은 개선의 여지가 있고, 최고 속도를 보아도 6단은 과도하다고 판단된다. 따라서 이러한 가속 및 운전 영역을 고려하고 동시에 대부분의 연비 개선은 저속 영역에서 이루어는 것을 고려하여, 4단 전후의 변속 단수를 채택하고 오버 드라이브 영역도 1개 단 정도로 축소하는 것이 바람직하다고 판단된다.

5. 결 론

전기 이륜차에 6단의 자동 변속기를 적용하여 변속기의 적용이 동력성능과 연비에 미치는 영향을 차대 동력계와 시가지 주행을 통해 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 변속기를 적용하면 CVS 40 주행 연비가 9.7 % 개선되었으며, 정속 주행 연비는 3.9 ~ 14.6 %와 개선되었는데 저속 운전에서 연비 개선이 더 크게 나타난다.
2) 변속기를 적용하면 4단 이하에서 가속 성능이 54 ~ 87 % 개선되었지만 오버 드라이브 영역인 5단 이상에서는 개선 효과가 없다 .
3) 변속기를 적용하면 등판 성능이 대폭 개선되었고 동시에 안정적인 특성이 있다.
4) 변속기를 적용하면 시가지 주행 연비가 31 % 정도 개선되는데, 이는 주로 저속 영역의 효율 개선과 주행저항의 감소에 기인한다.
5) 모터에서 발생하는 전자기력도 주행 저항에 포함되어 타행 성능에 영향을 준다.

References

1) S. H. Lee, T. H. Kim and Y. D. Cheon, “A Study on the Expansion of Electric Two-wheeled Vehicle,” Research Report to Ministry of Environment, 2015.
2) Ministry of Environment, Strengthen Management of Air Pollutants from Business Sites, Motorcycles, etc., www.me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=540280&menuId=286, 2017.
3) K. Y. Kim and H. K. Lee, Development and Commercialization Strategy of Smart Electric Power Vehicle, IHoMunHwaSa, Daejeon, pp. 31-38, 2015.
4) D. Shin, J. Hyun and I. Ohm, “Effectiveness Evaluation of Auto-Transmission Application for Electric Two-Wheeled Vehicle(1),” Transactions of

KSAE, Vol.29, No.4, pp.289-297, 2021.
5) A. Hajduga and A. Kieracinka, “The Use of Multi-Speed Mechanical Transmission in Electric Drives,” The Archives of Automotive Engineering - Archiwum Motoryzacji, Vol.75, No.1, pp.39-67, 2017.
6) A. M. Fabricio, J. K. Phillip, G. B. Daniel and E. Ali, “Multi-speed Gearboxes for Battery Electric Vehicles: Current Status and Future Trends,” IEEE Open Journal of Vehicular Technology, Vol.2, pp.419-435, 2021.
7) M. R. Ahssan, M. M. Ektesabi and S. A. Gorji, “Electric Vehicle with Multi-Speed Transmission: A Review on Performances and Complexities,” SAE International Journal of Alternative Powertrains, Vol.7, No.2, pp.169-181, 2018.
8) QuantumWorks, Multi-speed Gearboxes Can Offer Many Benefits for EV Powertrains Depending on Application, https://quantumworks.com/multi-speed-gearboxes-can-offer-many-benefits-for-ev-power-trains-depending-on-application, 2018.
9) B. S. Kil and G. C. Kim, “Per-Charge Range-Testing Method for Two-Wheeled Electric Vehicles,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol.38, No.1, pp.37-44, 2014.
10) E. S. Kim, Automotive Engineering Series 4, Chassis (II), JipHyunSa, Seoul, pp.40-41, 1990.