

교차로 제어 유형에 따른 전기차 에너지 절감 효과

Electric Vehicle Energy Saving Effects according to Intersection Control Type

박 동 주* · 박 상 준** · 고 영 림***

* 주저자 : 조선대학교 토목공학과 박사과정

** 교신저자 : 조선대학교 토목공학과 교수

*** 공저자 : 조선대학교 토목공학과 박사과정

Dong joo Park* · Sang jun Park* · Young lim Ko*

* Dept. of Civil Eng., Chosun Univ.

† Corresponding author : Sang jun Park, spark@chosun.ac.kr

Vol. 23 No.5(2024)
October, 2024
pp.73~84

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2024.23.5.73>

Received 11 September 2024
Revised 27 September 2024
Accepted 4 October 2024

© 2024. The Korean Society of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요 약

이 연구는 전기차 시대 도래에 따라 교차로 운영 방식이 에너지 절감에 미치는 영향을 분석한다. 교차로 제어 유형인 신호, 회전교차로, 비신호 교차로를 대상으로, VISSIM 시뮬레이션과 전기차 및 내연기관차의 에너지 소모 모형을 활용하여 에너지 절감량을 비교하였다. 각 교차로에서 교통량, 접근 속도, 좌회전 비율 등 다양한 시나리오를 바탕으로 에너지 소모량을 산출한 결과, 접근 속도 30kph에서는 신호 교차로가 대부분의 교통 상황에서 가장 에너지 효율성이 높았으며, 접근 속도 60kph에서는 회전교차로가 우수한 성과를 보였다. 특히, 내연기관차를 전기차로 전환했을 때 최대 83%의 에너지를 절감할 수 있었다. 또한 전기차의 회생제동 효과를 분석한 결과, 회전교차로와 신호 교차로 모두 에너지 재생 측면에서 긍정적인 성과를 보였다. 이 연구는 전기차 보급 확대에 따른 교차로 운영 전략 수립에 유용한 정책적 시사점을 제공한다.

핵심어 : 전기차, 에너지 절감, 회생제동, 교차로 제어

ABSTRACT

This study analyzed the impact of the intersection control types on energy savings in the era of electric vehicles (EVs). Three types of intersection control (signalized, roundabout, and unsignalized intersections) were examined by comparing energy consumption between EVs and internal combustion engine vehicles (ICEVs) through VISSIM simulations and energy consumption models. Various scenarios, including traffic volume, approach speed, and left-turn ratios, were simulated to assess energy consumption. The results showed that signalized intersections were the most energy-efficient under most traffic conditions at an approach speed of 30 kph, while roundabouts showed excellent performance at 60 kph. EVs showed up to 83% energy savings compared to ICEVs. An analysis of regenerative braking in EVs highlighted the benefits of roundabouts and signalized intersections in energy recovery. This study provides valuable policy insights for developing intersection management strategies as EV adoption increases.

Key words : Electric vehicle, Energy saving, Regenerative braking, Intersection control

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

지구 온난화에 의한 이상 기후 문제가 심화됨에 따라 온실가스를 저감하는 것은 전 세계적인 공동 목표가 되었으며 세계 주요 선진국은 공식적으로 2050년 탄소 중립을 선언하기 시작하였다(PAN-government, 2021). 우리 정부도 기후 위기의 심각성을 인지하고 2021년 2050년 탄소 중립 목표 달성을 위한 시나리오를 수립하였다. 탄소 중립 시나리오는 분야를 9개로 구분하여 주요 전략을 수립하였는데, 이 중 수송 부문은 2018년 기준 온실가스 배출 측면에서 98.1백만 톤을 배출하였으며, 이는 우리나라 총 배출량의 13.5%를 차지한다. 수송 부문은 도로, 철도, 해운, 항만으로 구분되며 특히 도로 부문은 수송 부문 전체 에너지 사용의 94.8%를 차지하는 것으로 조사되었다. 따라서 수송 부문의 주요 전략은 도로 부문에서 발생하는 탄소 배출량을 줄이는 것에 초점을 맞추고 있다. 수송 부문의 감축 수단에는 수요관리 강화를 통한 통행량 감소, 전기 및 수소차 등 무공해차 보급 확대, 그리고 친환경 철도·해운·항공으로의 수요 전환이 포함되어 있다(PAN-government, 2021).

전기차는 전기를 동력원으로 삼아 내연기관 대신 전기 모터를 사용하여 주행하므로 주행 중에 매연과 이산화탄소를 배출하지 않아 친환경적이며, 재생 가능 에너지로 더 깨끗해질 수 있고 에너지 효율이 내연기관 차량에 비해 높다. 전기차에 들어가는 배터리를 생산하는 과정, 자동차를 제조하는 과정, 충전 전기를 생산하는 과정에서 필연적으로 온실가스가 발생하지만 전 생애 주기 분석(LCA) 결과를 보면 내연기관차와 비교해 온실가스 배출량이 적은 것으로 연구되었다(Wu, 2018). 이와 같은 환경 측면의 장점으로 정부에서는 전기차 보급 활성화를 통한 탄소 중립을 달성하기 위하여 전기차 인프라 확대와 보조금을 지원하고 있다.

국내 전기차의 누적 등록 대수를 살펴보면, 2020년에는 13만 5천 대에서 2024년 2월 54만 7천 대로 증가하여 연평균 41.9%의 증가율을 보이고 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2024). 국제 에너지 기구에서 발행한 2024년 세계 전기차 시장 전망 보고서를 살펴보면 전기차는 2023년에 전 세계 자동차 판매의 약 18%를 차지한 것으로 보고하였으며, 2035년에는 전기차가 5억 대를 초과할 것으로 전망하였으며, 전 세계 주요 지역의 전기차 판매 비중이 확대되어 50-90%를 차지할 것으로 예상하였다(IEA, 2024).

문헌 고찰을 통해 이전의 도로 수송 부문에서 온실가스 저감에 관한 연구를 살펴보면 전기차를 기반으로 수행된 연구들은 매우 제한적인 실정이며 대다수의 연구들은 교통류를 이루는 차량들이 내연기관 자동차인 것을 기반으로 수행된 연구들이 주류를 이루고 있다. 앞서 기술한 바와 같이 전기차의 시장 점유율은 큰 폭으로 증가할 것으로 예상되며, 이러한 상황을 감안하여 도로 수송 부문에서 교통 운영의 효율성을 환경 측면에서 검토할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 도시 내 교통 네트워크를 구성하고 있는 요소 중 교통 소통과 환경 측면에 많은 영향을 주는 교차로를 대상으로 물리적인 형태와 운영 방법에 따라 에너지 측면에서 그 효율성을 산정하고자 한다.

II. 관련 연구 고찰

1. 전기차 에너지 소모량 예측 관련 연구

전기자동차 에너지 소모량 예측 모형에 관한 연구 동향을 살펴보면 국내에서는 모형의 개발과 관련된 연

구가 미미한 반면, 해외에서는 활발하게 연구가 진행되고 있다. 전기자동차 에너지 소모량 예측 모형은 주로 승용차를 중심으로 개발되었으며 모형의 구조에 따라 크게 Forward 모형과 Backward 모형으로 구분할 수 있다(Di Martino et al., 2022).

Forward 모형의 구조를 살펴보면 전기자동차의 기계적인 구성 요소들을 각각 모델링하여 이를 통합한 형태로서 차량의 보조 장치, 배터리, 모터, 변속기, 브레이크를 모델링하여 에너지 소모량을 산출하는 모형이다. 차량의 개별 구성 요소들을 모델링함으로써 다양한 파라미터의 영향을 모델링 할 수 있는 장점을 가지고 있으나, 입력자료로 운전자의 명령을 사용하여 별도의 운전자모형이 필요하고 계산 집약적으로 교통류 시뮬레이션 모형과 결합하기 어려운 단점을 가지고 있다. 대표적인 Forward 형태의 모형은 National Renewable Energy Laboratory에서 개발한 ADVISOR 가 있으며(Wipke et al., 1999), Miri et al.(2021)이 BMW i3 전기차의 모듈들을 모델링하여 개발한 모형도 Forward 형태의 모형이다(Miri et al., 2021).

반면 Backward 모형은 속도, 가속도, 도로 경사도와 같은 차량의 파워와 관련된 물리학적 파라미터를 입력 자료로 사용하므로 교통류 시뮬레이션 모형과의 결합에 적합한 장점을 가지고 있다. 모형의 구조를 살펴보면 이러한 모형들은 순간적으로 요구되는 파워를 산출하고 이에 따라 차량의 에너지 소모량을 계산한다. Backward 형태의 모형은 Virginia Tech에서 개발된 VT-CPEM(Virginia Tech comprehensive Power-based Electric vehicle Energy Consumption Model) 모형(Fiori et al., 2016), 모형의 이름은 없으나 Wang et al.(2015), Abousleiman and Rawashdeh(2015), Wu et al.(2015) 등이 개발한 모형들이 있다. 본 연구에서는 내연기관 차량의 에너지 소모량을 예측하는 VT-Micro모형(Rakha et al., 2004)과 입력자료가 동일한 형태인 VT-CPEM 모형을 적용하여 전기차의 에너지 소모량을 예측하였다.

1) 에너지 소모량 모델링

본 연구에서 내연기관 차량의 가솔린 소모량은 VT-Micro 모형을 전기차의 전기 소모량은 VT-CPEM 모형을 사용하였다. VT-Micro모형은 미국 Oak Ridge National Laboratory와 미국 환경보호국(US EPA)에서 수집한 데이터를 기반으로 차량의 순간적인 속도와 가속도를 입력변수로 내연기관 차량의 연료 소모량과 배기가스 배출량을 Equation 1을 이용하여 예측하는 모형이다. Equation 1에서 보는 바와 같이 모형은 차량의 속도와 가속도의 삼차 다항식으로 구성되어 있으며 차량의 가속도가 양수일 때와 음수일 때의 2개의 모형으로 구성되어 있다(Rakha et al., 2004).

$$MOE_e = \begin{cases} e^{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 L_{e,i,j} \times u^i \times a^j} & \text{for } a \geq 0 \\ e^{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 M_{e,i,j} \times u^i \times a^j} & \text{for } a < 0 \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, MOE_e 는 연료 소모량(L/s)과 배기가스 HC, CO, NOx, CO₂ 각각의 배출량(g/s), u 는 차량속도(km/h), a 는 차량 가속도(km/h/s), i 는 속도의 거듭제곱, j 는 가속도의 거듭제곱, $L_{e,i,j}$, $M_{e,i,j}$ 는 속도와 가속도의 회귀 모형계수로 MOE_e 에 따라 다른 값을 가진다.

전기차의 에너지 소모량 예측을 위해서 사용된 VT-CPEM은 VT-Micro모형과 동일하게 차량의 속도, 가속도, 도로 경사도 데이터를 활용하여 에너지 소모량을 산출하는데, 단위 거리당 에너지 소모량(kWh/km), 파워(kW), 브레이크 사용에 따라 재생되는 회생제동 에너지(kW)와 최종적인 배터리 충전상태(%)가 산출된다. VT-CPEM은 첫 번째로 Equation 2를 사용하여 차량에 작용하는 순간적인 파워를 산출한다(Fiori et al., 2016).

$$P_W(t) = (ma(t) + mg \frac{C_r}{1000} (c_1 v(t) + c_2) + \frac{1}{2} \rho_{air} A_f C_D v^2(t) + mgG) \times V(t) \dots\dots\dots (2)$$

여기서, $P_W(t)$ 는 차량에 작용하는 파워, m 은 차량의 중량(kg), $a(t)$ 는 차량의 가속도(m/s²), g 는 중력 가속도(m/s²), C_r , c_1 , c_2 는 구름저항계수, $v(t)$ 는 차량의 속도(m/s), ρ_{Air} 는 공기밀도(kg/m³), A_f 는 차량의 전면부 면적(m²), C_D 는 차량의 공기저항 계수, G 는 도로 경사도(%)이다.

이후 산출된 $P_W(t)$ 에 Equation 3에서 보는 바와 같이, 차량의 동력계를 구성하고 있는 모듈들의 효율성과 관련된 계수들을 적용하고 차량 내 보조시스템에서 사용되는 파워 (P_{AUX})를 합산하여 차량의 배터리에서 소모되는 파워 $P_B(t)$ 를 산출하게 된다.

$$P_B(t) \begin{cases} \frac{P_W(t)}{\eta_D \cdot \eta_M \cdot \eta_B} + P_{AUX} & \forall P_W(t) \geq 0 \dots\dots\dots (3) \\ P_W(t) \cdot \eta_D \cdot \eta_M \cdot \eta_B \cdot \eta_{rb} + P_{AUX} & \forall P_W(t) < 0 \end{cases}$$

여기서, $P_B(t)$ 는 배터리에서 소모되는 파워, η_D 는 동력 전달장치의 효율, η_M 은 전기모터 효율, η_B 는 배터리 효율, η_{rb} 는 재생산 브레이크 에너지 효율이며 Equation 4를 이용하여 산출하며, P_{AUX} 는 차량 내 보조 시스템에 사용되는 파워이다.

$$\eta_{rb}(t) = \left[e^{\left(\frac{0.0411}{a(t)} \right)} \right]^{-1} \dots\dots\dots (4)$$

2. 친환경 교차로 연구

도로 부문 교차로를 대상으로 에너지 절감을 도모하는 애플리케이션에 관한 연구들은 여러 연구자들에 의해 수행되었다. 특히 신호교차로를 대상으로 한 연구들이 다수를 이루고 있는데, 신호교차로를 접근하는 차량이 신호 현시와 시간 정보(Signal phasing and timing, SPat)를 수신하고 이를 이용하여 화석연료를 사용하는 내연기관 차량의 에너지 소모량을 최소화 하는 속도 프로파일을 생성하는 연구가 주를 이루고 있다. 예를 들면 Xia et al.(2012)은 SPat정보를 4G/LTE망을 이용하여 수신하고 이 정보를 통해 연료 소모량을 최소화 하는 속도 프로파일을 생성하여 운전자에게 제공하는 실험을 수행하였는데, 속도 프로파일 생성을 위해 연료 소모량의 예측 모형인 CMEM(Comprehensive Modal Emissions Model)(Barth, 2000)을 사용하였다. Xin et al.(2018)은 신호교차로에서 에코 드라이빙을 하기위한 Adaptive Cruise Control 시스템 개발을 위하여 IDM(Intelligent Driver Model) 차량 추종 모형에 V2X 통신 기반의 SPat 정보를 활용한 에코 드라이빙 모형을 제안하였다. Yang et al.(2020) 도 커넥티드 차량에 전달되는 SPat 정보를 활용하여 연료를 절감할 수 있는 친환경 속도 프로파일을 생성하는 시스템을 제안하였는데, 다른 연구와는 다르게 한 개의 신호교차로만을 고려한 것이 아닌 두 개 이상 연속된 신호 교차로를 고려했다는 차이점이 있다. 이 연구에서는 연료 소모량을 계산하기 위하여 Virginia Tech Comprehensive Power-based Fuel Consumption Model(VT-CPFM)(Rakha et al., 2011)을 사용하였다.

최근의 전기차와 관련된 연구들을 살펴보면, 이전에 언급된 연구들과 유사하게 신호교차로에서 전기차의 회생제동을 고려하여 에너지 소모량을 최소화하는 최적의 속도 프로파일을 생성하는 연구들이 수행되었다. Zhang and Yao(2015)는 교차로에 접근하는 전기차가 신호 현시 정보를 수집하고 이를 바탕으로 공회전을 방

지하며, 감가속 시간을 최소화하는 속도 프로파일을 생성하는 모델을 제안하였으며, Dong et al.(2022) 은 2단계로 구성된 이벤트 기반의 에너지 효율적인 운전 제어 전략을 제안하였다.

이와 같이 전기차 기반의 탄소 관련 기존의 연구들은 매우 제한적으로 수행되었으며, 군집된 형태의 교통류가 아닌 개별 차량 중심의 연구가 대다수를 이루고 있다. 본 연구의 목적인 전기차 시대의 도래에 따라 교차로의 제어 유형에 따른 에너지 절감 효과를 산정하는 측면의 연구는 매우 제한적인 것으로 판단된다. 본 연구에서는 교통수요가 비교적 적은 경우에 고려되는 교차로의 운영 형태인 비신호운영, 회전교차로, 신호교차로 운영 시 교통류를 이루는 차량들이 내연기관 차량에서 전기차로 전환되었을 때의 에너지 절감 효과를 산정한다.

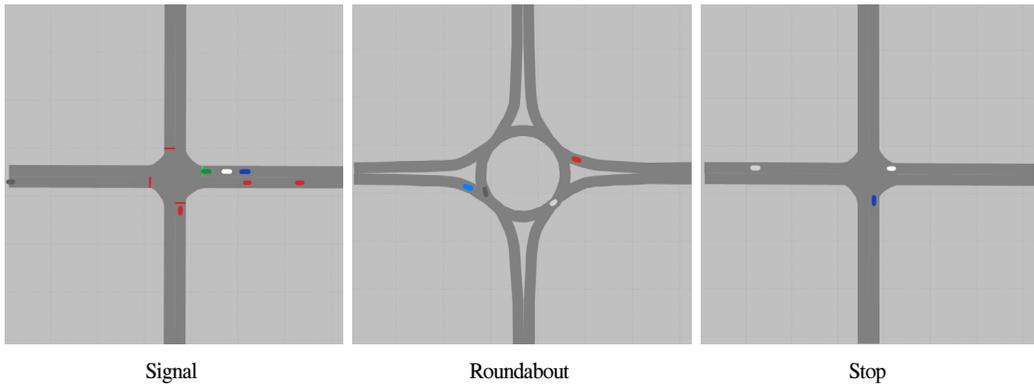
Ⅲ. 연구 수행 방법

1. 연구의 절차

본 연구의 목적은 도시 내 주요 교통시설인 교차로의 물리적인 형태와 운영 방법에 따라 전기차 기반의 시대가 도래하였을 때에 에너지 절감 측면에서 영향을 산정하는 것이다. 따라서 교차로의 형태에 따른 교통류의 상태 정보를 수집하여야 하는데, 본 연구에서는 이를 위해 미시 교통류 시뮬레이션 소프트웨어인 VISSIM(ver.7)을 사용하였다. 일반적인 교차로의 운영 방식인 신호운영, 비신호운영, 회전교차로 운영 모형을 VISSIM에서 구축하였으며, 다양한 교통류 상황을 재현하기 위하여 시나리오를 구축하고 각각의 동일한 시나리오에 대하여 난수(Random number seed)를 변경해가며 10회 시뮬레이션을 수행하였다. 각각의 시뮬레이션 수행 후 개별 차량들의 초단위 속도 이력자료가 생성되는데, 이를 내연기관 차량 모형인 VT-Micro 모형과 전기차 모형인 VT-CPEM 모형의 입력자료로 사용하여 개별 차량들의 에너지 소모량을 산출하였으며, 이를 집계하여 총 에너지 소모량을 산출하였다. 마지막으로 산출된 에너지 소모량 중 내연기관 차량의 가솔린 연료에 대해 1L당 8.9kWh의 전기에너지로 환산하여 전기차와 비교 분석하였다(Natural resources canada, 2024).

2. 시뮬레이션 시나리오 작성

본 연구에서는 이동성이 강한 도시 내 간선도로를 구성하고 있는 양방 4차로 이상의 교통수요가 많은 교차로의 경우 안전을 위하여 대다수 신호교차로로 운영하여 연구의 대상에서 제외하였으며, 비교적 교통수요가 많지 않은 집산도로 수준의 양방 2차로의 교차로를 대상으로 하였다. 도시 내에서 양방 2차로로 운영되고 있는 교차로 중 일반적인 교차로의 운영 형태인 비신호, 회전교차로, 신호교차로 운영이 고려되는 교통류 상황을 재현하기 위하여 시나리오 작성 시 <Table 1>과 같은 요인들을 고려하였다. 첫 번째로 신호교차로, 회전교차로(1차로형), 비신호교차로로 운영되는 4지 교차로 모형을 작성하였는데, 차량 추종 모형과 같은 <Table 1>에서 언급되지 않은 요인들은 VISSIM 모형에서 제공하고 있는 디폴트 값을 사용하였다. 시뮬레이션 모형 제작에 있어 교차로별 구조적 설정은 도로용량편람(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2013), 평면교차로 설계지침(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2015), 회전교차로 설계지침(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2014)에서 제시하는 기본형태를 적용하여 <Fig. 1>과 같이 모형을 작성하였다.



<Fig. 1> Intersection modeling in VISSIM

교차로 모형을 제작함에 있어 동, 서, 남, 북 접근로의 길이에 따라 전체 시뮬레이션 모형에서 직선구간이 차지하는 비율이 변화하기 때문에 너무 길게 설정하면 교차로 운영형태에 따른 에너지 소모량에 대한 영향이 희석될 것으로 판단되어 도로용량편람과 평면교차로 설계 지침을 참고하여 60m로 설정하였다. 교통류의 교차로 접근 속도는 도시부 제한속도를 감안하여 30kph와 60kph 두 가지를 시나리오에 포함시켰다.

접근로 교통량과 좌회전 교통량 비율은 회전교차로 설계지침에서 제시하고 있는 “신호교차로 대비 회전교차로 지체시간 감소효과” 분석을 참고하여 접근로 별로 100대/시부터 100대/시 씩 증가하여 최대 600대/시 까지 시나리오에 포함시켰으며, 좌회전 차량의 비율은 10%에서 10%씩 증가하여 50%까지 시나리오에 포함시켰다. 우회전교통량 비율은 모든 시나리오에 동일하게 10%로 고정하였다.

신호교차로의 경우 교통수요에 따라 최적의 신호주기가 결정되며 신호주기 설정에 따라 차량지체에 주는 영향이 다르므로, 신호 주기는 접근로 교통량에 따라 신호주기를 최소 30초에서 최대 100초로 설정하여 시뮬레이션을 수행하고 시뮬레이션 결과 중 평균 차량 지체를 최소로 하는 주기를 <Table 2>와 같이 도출하여 적용하였다.

종합적으로 각각의 신호, 회전, 비신호 교차로 모형에 대해 접근로 속도, 교통수요, 좌회전 비율을 변경하여 총 60개의 시나리오를 만들고 각 시나리오 별로 난수를 변경하며 10회씩 수행하여 총 600회 시뮬레이션 수행하였다. 이때 시뮬레이션 구동시간은 교통수요를 기준으로 모든 차량이 통행을 완료하는 것을 기준으로 설정하였으며 각 시나리오별 10회씩 시뮬레이션한 결과를 산술평균하여 결과를 산출하였다.

<Table 1> Simulation settings

Classification	Value
Intersection control type	Singal, Roundabout, Stop
Approach length [m]	60
Number of Lanes	1
Approach speed [kph]	[30, 60]
Traffic volume [veh/h]	[100, 200, 300, 400, 500, 600]
Left turn ratio [%]	[10, 20, 30, 40, 50]
Right turn ratio [%]	10

<Table 2> Optimal cycle used for signalized intersections

Traffic volume [veh/h]	Signal cycle [s]
100	30
200	40
300	50
400	80
500	100
600	100

IV. 분석 결과

1. 전기차와 내연기관차의 에너지 소모량 분석

교차로의 형태와 교통환경 변화에 따라 전기차와 내연기관차의 에너지 소모량을 정량적으로 산출하고 이를 비교하기 위해 VISSIM으로 시뮬레이션한 결과를 바탕으로 후처리 과정을 통해 에너지 소모량을 산출하였다. 이때 동일한 교차로 형태와 교통수요 조건에서 에너지 소모량을 산출한 결과 좌회전 비율 변화로 인한 에너지 소모량의 변화는 전체적으로 약 표준편차 0.01 수준으로 변화가 미미한 것으로 분석되어, 모든 결과를 산술평균하여 에너지 소모량을 도출하였다. 이렇게 전기차와 내연기관 차량의 에너지 소모량과 교차로의 지체도를 정량적으로 산출한 결과는 <Table 3>과 같으며 <Fig. 2>는 전기차와 내연기관차의 에너지 소모량을 비교한 그래프이다.

접근 속도 30kph의 시나리오를 유형별로 살펴보면, 신호교차로에서 전기차는 교통수요가 변화하여도 차량 한 대당 평균 에너지 소모량은 0.06kWh/veh으로 동일한 것으로 나타났으며, 내연기관차의 경우 교통수요 100대/시에서 0.26kWh/veh를 소모하며 교통수요가 증가할수록 평균 에너지 소모량도 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 회전교차로에서 전기차는 교통수요 100대/시의 경우 0.07kWh/veh의 에너지를 소모하며 300대/시 이상의 경우 0.13kWh/veh로 고정적인 에너지 소모 패턴을 보여주었다. 내연기관차 또한 교통수요 100대/시에서 0.28kWh/veh의 에너지를 소모하며 교통수요 400대/시 이상부터 0.64kWh/veh의 에너지를 소비해 전기차와 유사한 패턴을 보여주었다. 마지막으로 비신호교차로의 경우 회전교차로의 에너지 소모패턴과 유사한 경향을 보이는데 교통수요 100대/시~300대/시 조건에서 교통수요 증가에 따라 에너지 소모량도 증가하다 400대/시 이상부터 교통수요 변화에 따른 에너지 소모량의 변화가 미미한 것으로 나타났다. <Table 3>에서 음영으로 표시된 것은 신호운영, 회전교차로, 비신호운영 중 가장 평균 에너지 소모량이 적은 운영방식을 표현한 것으로, 보는 바와 같이 100대/시인 경우는 비신호 운영이, 나머지의 경우에는 신호 운영이 가장 에너지 측면에서 효율적인 방안인 것으로 분석되었다. 상대적인 에너지 절감 효과를 살펴보면, 내연기관차를 전기차로 전환하였을 때 신호 운영하는 경우, 최소 77%에서 최대 83% 에너지를 절감하여 가장 절감 효과가 큰 것으로 분석되었다.

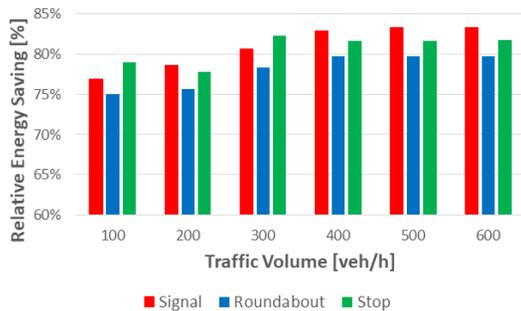
접근 속도 60kph의 시나리오를 살펴보면, 신호운영과 비신호운영의 경우 전반적으로 접근 속도 30kph의 시나리오와 비교하여 좀더 높은 평균 에너지 소모량을 보이는 것으로 분석되었으나, 회전교차로의 경우 60kph 시나리오에서 상대적으로 낮은 에너지 소모량을 보이는 것으로 분석되었다. 또한 접근 속도 30kph의 시나리오와는 다르게, 전기차를 기준으로 교통수요 100대/시~400대/시의 경우 회전교차로 운영이 가장 낮은 에너지 소모량을 보였으며, 교통수요 500대/시와 600대/시의 경우에는 신호운영과 회전교차로 운영이 거의 비슷한 수준인 것으로 분석되었다. 따라서 접근 속도 60kph의 경우에는 회전교차로 운영이 에너지 측면에서 우수한 것으로 나타났으며, 전기차 전환에 따른 에너지 절감 효과는 최소 75%에서 최대 83%로 가장 효과가 큰 것으로 분석되었다.

시나리오별 교차로의 지체를 산출한 결과를 살펴보면 전기차와 내연기관차 모두 대체적으로 동일한 교통수요일 때 지체가 최소로 발생하는 교차로 운영방식이 에너지 절감 효과가 큰 것으로 나타났다. 다만 신호교차로를 주행하는 전기차의 경우 지체가 증가하여도 에너지 소모량은 동일하거나 감소하는 모습을 나타냈다.

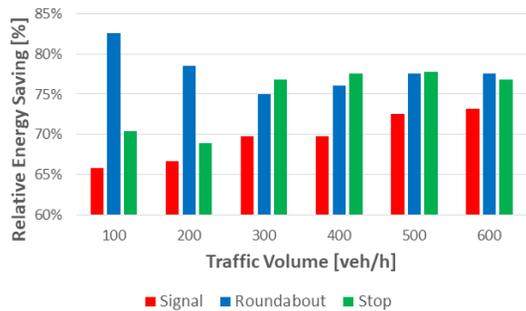
<Table 3> Energy consumption and delay results by intersection control type

(Unit: kWh/veh, sec/veh)

Approach speed	Traffic volume	Signal				Roundabout				Stop			
		BEV	ICEV	Absolute difference	Average delay	BEV	ICEV	Absolute difference	Average delay	BEV	ICEV	Absolute difference	Average delay
30kph	100	0.06	0.26	0.20	14	0.07	0.28	0.21	9	0.04	0.19	0.15	4
	200	0.06	0.28	0.22	19	0.09	0.37	0.28	25	0.08	0.36	0.28	32
	300	0.06	0.31	0.25	28	0.13	0.60	0.47	68	0.15	0.85	0.70	134
	400	0.06	0.35	0.29	43	0.13	0.64	0.51	76	0.16	0.87	0.71	138
	500	0.06	0.36	0.30	53	0.13	0.64	0.51	77	0.16	0.87	0.71	137
	600	0.06	0.36	0.30	54	0.13	0.64	0.51	77	0.16	0.88	0.72	139
60kph	100	0.13	0.38	0.25	15	0.04	0.23	0.19	6	0.08	0.27	0.19	4
	200	0.13	0.39	0.26	19	0.06	0.28	0.22	11	0.14	0.45	0.31	27
	300	0.13	0.43	0.30	28	0.09	0.36	0.27	25	0.22	0.95	0.73	132
	400	0.13	0.43	0.30	35	0.11	0.46	0.35	43	0.22	0.98	0.76	137
	500	0.11	0.40	0.29	37	0.11	0.49	0.38	47	0.22	0.99	0.77	140
	600	0.11	0.41	0.30	44	0.11	0.49	0.38	49	0.23	0.99	0.76	139



Approach speed 30kph

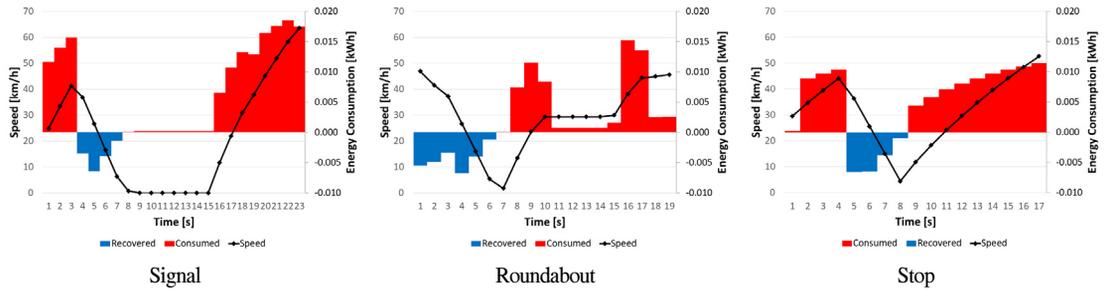


Approach speed 60kph

<Fig. 2> Differences in energy consumption between BEV and ICEV

2. 전기차의 회생제동 분석

전기차는 감속하는 과정에서 회생제동으로 에너지를 재생하여 내연기관차와는 다른 에너지 소모패턴이 나타나므로 본 장에서는 회생제동에 관하여 분석을 수행하였다. <Fig. 3>은 접근 속도 60kph의 시나리오 중 교통수요 100대/시 일 때의 차량 한 대의 속도 궤적과 그에 따른 에너지 소모량과 회생제동을 초 단위로 나타낸 그래프이다. 그래프를 살펴보면 전기차가 주행 중 교차로에 진입하기 전 통제 방법에 따라 감속을 하는 과정에서 회생제동 에너지가 발생한다. 이때 발생하는 회생제동 에너지는 회전교차로일 때 가장 큰 것을 확인할 수 있으며, 교차로 통행을 대기하는 과정에서 소량의 에너지를 소모하는 모습을 공통적으로 보이고 있다.



<Fig. 3> Energy consumption and speed of BEV

<Table 4>는 시나리오 별로 회생제동으로 발생하는 에너지의 양을 나타내고 있는데, 접근 속도 30kph 시나리오에서 신호교차로의 경우 교통수요 100대/시에서 8.2Wh/veh의 회생제동 에너지가 발생한 것으로 나타나 주행 중 소비한 에너지 0.06kWh/veh 중 13.7%를 회생제동으로 에너지를 절감한 것으로 나타났다. 교통수요가 200대/시, 300대/시로 증가할 때 회생제동으로 재생하는 에너지양과 총 에너지 소모량 중 회생제동이 차지하는 비율(이하 회생제동 비율) 또한 증가하였다. 그러나 교통수요 400대/시 이상의 교통환경에서 교통수요가 증가할수록 회생제동으로 재생하는 에너지양과 회생제동 비율 모두 감소하여 교통수요 600대/시의 시나리오에서 회생제동으로 4.8Wh/veh의 에너지를 재생하여 회생제동 비율은 8.0%로 나타났다.

회전교차로의 경우, 교통수요 100대/시에서 회생제동으로 7.4Wh/veh의 에너지를 재생하여 10.6%의 회생제동 비율을 보이며 가장 효율적인 것으로 나타났다. 그러나 교통수요가 증가할수록 회생제동으로 재생하는 에너지양과 회생제동 비율 모두 감소하여 교통수요 600대/시 교통환경에서 2.5Wh/veh의 에너지를 재생하여 1.9%의 회생제동 비율을 보여주었다. 마지막으로 비신호교차로는 교통수요 100대/시에 회생제동으로 6.6Wh/veh의 에너지를 재생하는 것으로 산출되었는데 그 값은 동일한 교통수요의 다른 교차로 운영 방식보다 크기는 작지만 회생제동 비율은 16.4%로 가장 높은 것으로 나타났다. 교통수요 200대/시의 교통환경에서는 회생제동으로 8.8Wh/veh의 에너지를 재생하여 교통수요 100대/시보다 2.3Wh/veh 더 에너지를 재생하는 것으로 나타났으나 회생제동 비율은 11.0%로 감소하는 모습을 보여주었다. 이후 회전교차로처럼 교통수요가 증가할수록 회생제동으로 재생하는 에너지양과 회생제동 비율이 모두 감소하는 추세를 보여주었다.

설계속도 60kph의 시나리오를 살펴보면 신호교차로는 설계속도 30kph 시나리오보다 정량적으로는 회생제동으로 재생하는 에너지양은 증가하는 것으로 나타났으나, 회생제동 비율은 낮은 것으로 나타났다. 다만 교통수요 600대/시의 경우 접근 속도 30kph의 동일 시나리오와 비교하여 다소 높은 8.4%의 회생제동 비율을 보이는 것으로 나타났다. 회전교차로의 경우 설계속도 30kph보다 회생제동으로 재생하는 에너지양과 회생제동 비율 모두 높은 것으로 나타났는데 교통수요 100대/시와 200대/시에서 각각 59.5%, 27.0%로 접근 속도 30kph보다 상대적으로 높은 회생제동 비율을 나타냈으며 교통수요가 증가할수록 회생제동 비율의 차이는 감소하는 모습을 보였다. 마지막으로 비신호교차로의 경우 접근 속도 30kph의 시나리오와 마찬가지로 교통수요 100대/시의 교통환경에서 23.2%의 회생제동 비율을 보여 가장 높은 비율을 보였으며, 교통수요가 증가함에 따라 회생제동 비율 또한 감소하였다. 특히 300대/시 이상의 교통환경에서는 1%대의 회생제동 비율을 보여 설계속도 30kph와 마찬가지로 회생제동 비율이 급격하게 낮아져 다른 교차로 운영방식에 비해 전기차의 회생제동 효율이 낮은 것으로 분석되었다.

<Table 4> Regenerative braking energy for BEV

Approach speed	Traffic volume	Signal		Roundabout		Stop	
		Regenerative braking [Wh/veh]	Regenerative braking ratio [%]	Regenerative braking [Wh/veh]	Regenerative braking ratio [%]	Regenerative braking [Wh/veh]	Regenerative braking ratio [%]
30kph	100	8.2	13.7	7.4	10.6	6.6	16.4
	200	8.9	14.8	6.2	6.9	8.8	11.0
	300	9.0	14.9	3.3	2.6	3.1	2.1
	400	6.9	11.5	2.6	2.0	2.9	1.8
	500	4.9	8.2	2.5	1.9	2.8	1.8
	600	4.8	8.0	2.5	1.9	2.8	1.7
60kph	100	15.2	11.7	23.8	59.5	18.6	23.2
	200	14.7	11.3	16.2	27.0	16.4	11.7
	300	12.9	9.9	10.6	11.8	3.4	1.6
	400	10.6	8.2	6.2	5.6	3.0	1.4
	500	8.9	8.1	4.8	4.3	2.8	1.3
	600	9.2	8.4	4.1	3.8	2.7	1.2

V. 결 론

본 연구에서는 내연기관차에서 전기차로 전환되는 시대에 맞춰 교통의 주요시설인 교차로를 대상으로 형태와 운영 방법에 따라 전기차로 전환되었을 때의 에너지 절감량을 분석하였다. 효과를 산정하기 위하여 VISSIM으로 모형을 구축하고 접근 속도, 교통수요, 좌회전 구성비 등을 변화시키며 시뮬레이션을 수행하여 차량의 주행이력 데이터를 발생시켰으며, 이를 입력자료로 내연기관차와 전기차의 에너지 소모량을 VT-Micro, VT-CPEM 모형을 활용하여 산정하였다.

분석 결과, 전기차는 접근 속도 30kph의 경우 100대/시인 경우는 비신호 운영이, 나머지의 경우에는 신호 운영이 에너지측면에서 가장 효율적인 방안인 것으로 분석되었다. 상대적인 에너지 절감 효과를 살펴보면, 내연기관차를 전기차로 전환하였을 때 신호 운영하는 경우, 최소 77%에서 최대 83% 에너지를 절감하여 가장 절감 효과가 큰 것으로 분석되었다. 접근 속도 60kph의 경우 접근 속도 30kph의 시나리오와는 다르게, 전기차를 기준으로 교통수요 100대/시~400대/시의 경우 회전교차로 운영이 가장 낮은 에너지 소모량을 보였으며, 교통수요 500대/시와 600대/시의 경우에는 신호운영과 회전교차로 운영이 거의 비슷한 수준인 것으로 분석되었다. 상대적인 에너지 절감 효과 측면에서도, 회전교차로로 운영하는 경우 전기차 전환에 따른 에너지 절감효과는 최소 75%에서 최대 83%로 가장 효과가 큰 것으로 분석되었다. 희생제동에 따른 에너지 발생 측면에서는 전반적으로 신호 운영하는 것이 우수한 것으로 분석되었는데, 접근 속도 60kph에서 교통수요가 적은 100대/시와 200대/시의 경우 회전교차로와 비신호로 운영하는 것이 다소 우수한 것으로 분석되었다.

본 연구는 내연기관차가 전기차로 전환되었을 때의 에너지 절감효과를 양방 2차로의 교통수요가 적은 교차로의 제어 유형에 따라 분석하였다. 본 연구를 통해 접근로의 교통수요가 100대/시 수준의 경우 비신호교차로로 운영하고 이를 초과하는 교통수요의 경우 신호운영하는 것이 전기차의 시장점유율이 증가할 경우 에너지 측면에서 효율적인 것으로 분석되었다. 따라서 향후 교통수요가 적은 교차로의 운영형태를 결정하는

경우 이를 정책에 반영하여야 할 필요가 있음을 시사하고 있다.

본 연구에서는 시뮬레이션을 수행함에 있어 전기차의 감가속 특성이 내연기관차와 동일한 것으로 가정하고 연구를 진행하였으나, 전기차의 물리적인 가속 능력이 우수하다는 것은 알려진 사실로서 이러한 가속능력 특성에 기인하여 운전자들의 운전행태가 내연기관차와 다를 수도 있으므로 향후 연구에서는 이러한 사항을 고려하고 또한 내연기관차의 운전행태에도 전기차의 시장 점유율이 영향을 줄 수 있는지를 검토할 필요가 있다. 또한 국내에는 전기차의 에너지소모량에 대한 연구가 부족하여 국내 시장점유율을 반영한 모형이 부재하여 선행 연구에서 개발된 모형을 사용하였으나, 장래 연구에서는 국내 전기차의 점유율을 반영한 모형을 개발하여 이를 연구에 반영할 필요가 있을 것으로 사료된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

이 논문은 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음(2024년)

REFERENCES

- Abousleiman, R. and Rawashdeh, O.(2015), “Energy consumption model of an electric vehicle,” *2015 IEEE transportation electrification conference and expo (ITEC)*, pp.1-5.
- Barth, M., An, F., Younglove, T., Scora, G., Levine, C., Ross, M. and Wenzel, T.(2000), “The development of a comprehensive modal emissions model,” *NCHRP Web-only Document*, vol. 122, pp.25-11.
- Di Martino, A., Miraftebzadeh, S. M. and Longo, M.(2022), “Strategies for the modelisation of electric vehicle energy consumption: a review,” *Energies*, vol. 15, no. 21, 8115.
- Dong, H., Zhuang, W., Ding, H., Zhou, Q., Wang, Y., Xu, L. and Yin, G.(2022), “Event-driven energy-efficient driving control in urban traffic for connected electric vehicles,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 9, no. 1, pp.99-113.
- Fiori, C., Ahn, K. and Rakha, H. A.(2016), “Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation,” *Applied Energy*, vol. 168, pp.257-268.
- International Energy Agency(IEA)(2024), *Global EV outlook 2024*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2014), *Roundabout design guidelines*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2015), *Intersection design guidelines*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2024), *Vehicle registration status report*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2013), *Highway capacity manual*.
- Miri, I., Fotouhi, A. and Ewin, N.(2021), “Electric vehicle energy consumption modelling and estimation – A case study,” *International Journal of Energy Research*, vol. 45, no. 1, pp.501-520.
- Natural Resources Canada, <https://natural-resources.canada.ca/energy-efficiency/transportation-alternative-fuels/personal-vehicles/choosing-right-vehicle/buying-electric-vehicle/understanding-the-tables/21383>, 2024.09.02.
- PAN-government(2021), *2050 Carbon neutral scenarios*.

- Rakha, H. A., Ahn, K., Moran, K., Saerens, B. and Van den Bulck, E.(2011), “Virginia tech comprehensive power-based fuel consumption model: model development and testing,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 16, no. 7, pp.492-503.
- Rakha, H., Ahn, K. and Trani, A.(2004), “Development of VT-Micro model for estimating hot stabilized light duty vehicle and truck emissions,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 9, no. 1, pp.49-74.
- Wang, J., Besselink, I. and Nijmeijer, H.(2015), “Electric vehicle energy consumption modelling and prediction based on road information,” *World Electric vehicle Journal*, vol. 7, no. 3, pp.447-458.
- Wipke, K. B., Cuddy, M. R. and Burch, S. D.(1999), “ADVISOR 2.1: A user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 48, no. 6, pp.1751-1761.
- Wu, X., Freese, D., Cabrera, A. and Kitch, W. A.(2015), “Electric vehicles’ energy consumption measurement and estimation,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 34, pp.52-67.
- Wu, Z., Wang, M., Zheng, J., Sun, X., Zhao, M. and Wang, X.(2018), “Life cycle greenhouse gas emission reduction potential of battery electric vehicle,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 190, pp.462-470.
- Xia, H., Boriboonsomsin, K., Schweizer, F., Winckler, A., Zhou, K., Zhang, W. B. and Barth, M.(2012), “Field operational testing of eco-approach technology at a fixed-time signalized intersection,” Paper presented at *the 2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*.
- Xin, Q., Fu, R., Yuan, W., Liu, Q. and Yu, S.(2018), “Predictive intelligent driver model for eco-driving using upcoming traffic signal information,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 508, pp.806-823.
- Yang, H., Almutairi, F. and Rakha, H.(2020), “Eco-driving at signalized intersections: A multiple signal optimization approach,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 5, pp.2943-2955.
- Zhang, R. and Yao, E.(2015), “Eco driving at signalised intersections for electric vehicles,” *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 9, no. 5, pp.488-497.