

전기·수소 대형 화물차의 경제성 및 환경성 분석

김소윤¹ · 안영환^{2*}¹숙명여자대학교 기후환경에너지학과 석사, ²숙명여자대학교 기후환경에너지학과 부교수

Economic and Environmental Analysis of Battery Electric, Hydrogen Fuel Cell Heavy-Duty Trucks

KIM, So Yun¹  · AHN, Young-Hwan^{2*} ¹Master's Degree, Department of Climate · Environment and Energy, Sookmyung Women's University, Seoul 04310, Korea²Associate Professor, Department of Climate · Environment and Energy, Sookmyung Women's University, Seoul 04310, Korea

*Corresponding author: yh.ahn@sookmyung.ac.kr

Abstract

In order to achieve carbon neutrality in road transport, the transition demand to zero-emission vehicles is significant, as it accounts for about 97% of greenhouse gas emissions in domestic transportation. In particular, heavy-duty trucks contribute significantly to greenhouse gas emissions, because of their higher annual mileage and usage of diesel engine. However, freight trucks are operated for the purpose of profit. Therefore, it is crucial to conduct research on the economic feasibility of heavy-duty trucks transitioning from internal combustion engines. This study analyzed total cost of ownership for zero-emission trucks, projecting total cost of ownership parity with internal combustion engine trucks by 2040. In addition, the greenhouse gas reduction effect, which is the ultimate goal of conversion to zero-emission trucks, was compared through well-to-wheel analysis. The result shows that fuel prices are pivotal in reaching total cost of ownership parity for zero-emission trucks. For the successful conversion of heavy-duty trucks to zero-emission, it is imperative to form competitive fuel prices with internal combustion engine vehicles. Policy implementations that facilitate the complementary distribution of hydrogen fuel cell trucks and battery electric trucks should also be a prerequisite. Furthermore, the decarbonization of fuel production concurrently with the transition to zero-emission vehicles is essential since the greenhouse gas reduction effect of zero-emission trucks varies depending on the increase of renewable energy generation and the development of clean hydrogen production technology.

Keywords: battery electric truck, greenhouse gas reduction effect, hydrogen fuel cell truck, total cost of ownership, zero-emission truck

초록

국내 수송부문 온실가스 배출량 중 도로 부문의 비중은 약 97%로 탄소중립 달성을 위한 친환경 차량 전환이 추진되고 있다. 특히 대형 화물차는 연간 주행거리가 길고 대부분 경유차로 구성된 특성상 배출 비중이 높아 친환경차 전환이 필요하다. 그러나 화물차는 자가용 승용차와 다르게 이윤 창출을 목적으로 운행되는 차량임에 따라 전환 시 경제성 확보가 중요하다. 본 연구는 친환경 대형 화물차의 총소유비용을 분석하고, 경유 화물차와 친환경 화물차의 총소유비용이 등

ARTICLE HISTORY

Received: 17 May 2024

Revised: 7 June 2024

Accepted: 17 July 2024

Copyright ©
Korean Society of Transportation

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.

가가 되는 '총소유비용 패리티' 도달 시점을 2040년까지 전망하였다. 또한, 연료주기 분석을 통해 친환경차 전환의 궁극적 목표인 온실가스 감축 효과를 비교하였다. 총소유비용 분석 결과 연료비용이 친환경 화물차의 총소유비용 패리티 도달 시점에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이에 친환경 화물차 전환을 위해서는 내연기관 대비 경쟁력 있는 연료 가격 형성이 중요하며, 수소트럭과 전기트럭을 상호보완적으로 보급하는 정책이 필요하다. 그리고 온실가스 감축효과는 국내 발전원 비중 및 수소 생산방식에 따라 저감량이 상이하므로, 친환경 화물차 전환과 더불어 연료 생산단계의 이산화탄소 배출을 줄이기 위한 노력이 병행되어야 한다.

주요어: 친환경 화물차, 온실가스 감축효과, 수소트럭, 총소유비용, 전기트럭

서론

온실가스 배출량의 급격한 증가는 지구 온난화로 인한 기후변화와 환경문제를 초래함에 따라 전 지구적으로 중요한 문제가 되었다. 이에 대응하고자 2015년 신기후체제인 파리협정 채택으로 지구 평균온도 상승을 산업화 이전 대비 1.5°C 이하로 제한하기로 하였으며, 세계 각국은 온실가스 감축을 위해 이산화탄소 배출 '제로(0)'를 실현하는 탄소중립을 선언했다.

국내 온실가스 배출량은 2020년 기준 656.2백만 톤CO₂eq이며, 수송부문 온실가스 배출량은 약 9,618만 톤 CO₂eq로 총 배출량 기준 14.7%를 차지한다(Greenhouse Gas Inventory and Research Center, 2022). 수송부문 온실가스 배출량의 약 97%를 차지하는 도로 부문 배출량을 차종별로 살펴보면, 화물차는 승용차 대비 등록 대수가 적지만 온실가스 배출에 미치는 영향이 크다. 국내 화물차 등록 대수는 2020년 기준 전체 등록 대수의 14.9% 수준이지만, 전체 차종 온실가스 배출량의 33.7%를 차지한다(Korea Transportation Safety Authority, 2022). 그리고 국내 물동량 중 화물차를 이용하는 도로 수송량은 2022년 기준 약 1,576만 TEU로 전체 운송수단 부담률의 94.6%를 차지하고 있다(Korea Transport Institute, 2022). 주요 도로 화물 운송수단인 영업용 화물차를 대상으로 한국교통연구원에서 차종별 온실가스 배출량을 분석한 결과, 12톤 초과 대형 화물차는 약 9만 8천 대로 전체 등록 대수의 22.8%에 불과하지만, CO₂ 배출량은 전체 화물차의 51.8%로 나타났다. 따라서 대형 화물차는 다른 차종 대비 친환경차 보급 시 환경개선 효과가 높을 것으로 기대된다. 2022년 말 친환경 화물차 전환을 위한 국내기업의 중대형급 수소트럭 상용화에 이어, 글로벌 기업은 국내 시장에 대형 전기트럭 출시를 발표하고 전용 충전 인프라를 구축하겠다는 중장기 로드맵을 수립하였다.

2030년 국가 온실가스 감축목표(NDC)를 40% 감축으로 상향함에 따라 국내 수송부문은 2030년까지 2018년 대비 37.8% 감축해야 한다. 온실가스 감축을 위한 대형 화물차 전환 필요성에도 불구하고, 국내 친환경차 경제성 연구는 기술 개발 및 정부 보조금 정책에 따라 주로 보급이 이루어진 승용차와 소형 전기트럭을 대상으로 수행되었다. 화물차는 자가용 승용차와 다르게 이윤 창출을 목적으로 운행되는 상업적 운송수단임에 따라 경제성 확보가 필수적이다. 즉, 국내 대형 화물차의 친환경차 전환을 위해서는 친환경 화물차가 내연기관 화물차와 비교하여 경쟁할 수 있을 수준의 경제성을 확보해야 한다.

따라서 본 연구는 국내 대형 화물차 전환 시 파워트레인별 총소유비용을 분석하여 전기·수소트럭의 경제성을 평가하고, 친환경차 전환의 궁극적 목표인 온실가스 감축효과를 비교하고자 한다. 본 연구는 다음과 같은 구성을 따른다. 2장에서 총소유비용 분석을 활용한 친환경차 경제성 연구와 연료주기 분석과 관련된 선행연구를 고찰한다. 3장에서는 총소유비용 분석과 연료주기 분석의 방법론과 활용 자료를 설명한다. 이어지는 4장과 5장에서는 분석을 통해 얻은 결과를 서술하고 시사점을 도출하였으며, 마지막으로 6장에서 연구 결론과 향후 연구 방향을 제시한다.

선행연구 검토

1. 총소유비용 기반 친환경차 경제성 분석 연구

총소유비용(Total Cost of Ownership, TCO)은 소비자 관점에서 자동차를 소유하는데 발생하는 모든 비용을 의미한다. 탄소중립 달성을 위해 전동화(Electrification)된 자동차 시장이 성장함에 따라, 총소유비용 분석을 기반으로 내연기관차가 아닌 다른 구동계 유형 차량의 경제성을 분석하고자 하는 수요가 증가하였다(Kim, 2022). International Council on Clean Transportation(ICCT)(2019)은 경유·전기·수소트럭의 총소유비용을 분석하고, 전기트럭의 긴 충전시간 및 배터리 무게로 인한 유효 탑재중량(Payload) 손실을 비용으로 반영하였다. 전기트럭의 약점을 고려해도 전기트럭이 수소트럭보다 빠르게 경제성을 확보할 것으로 전망하였다. Hunter et al.(2021)은 연구 대상을 Class 4, Class 8 장거리·단거리 운행 트럭으로 정하고 충전 시간과 탑재중량 손실 비용 유무에 따른 네 가지 조건을 가정하여 총소유비용을 비교하였다. 그 결과 Class 8 트럭은 장거리 운행 시 수소트럭이 가장 경제적이며, Class 4 및 Class 8 단거리 운행은 전기트럭 전환이 경제적이라고 판단하였다. Noll et al.(2022)은 통합적인 총소유비용 평가 방법을 개발하여 유럽 10개국의 화물 트럭을 대상으로 주행거리당 총소유비용(EUR/km)을 비교하였다. 수소트럭은 높은 수소 가격으로 인해 전기트럭보다 경제성이 낮고, 공해부담금(LSVA)이 높게 적용되는 스위스에서 장거리 운행 시 수소트럭이 내연기관 트럭 대비 경쟁력을 가질 수 있을 것으로 나타났다. Strack et al.(2022)은 12톤 이상 대형 화물차를 대상으로 재생에너지 보급률과 수요를 가정한 시나리오에 따른 총소유비용을 분석했다. 재생에너지 보급률이 높은 시나리오일수록 전기가격이 하락하여 전기 및 수소트럭의 경제성이 높아지지만, 수전해 기술의 생산성으로 인해 수소트럭보다 전기트럭의 경제성이 높을 것으로 보았다. Zhang et al.(2022)은 2040년까지 중국 대형트럭의 파워트레인별 총소유비용을 전망하고, 대형트럭 전환 시 플러그인 하이브리드 트럭이 가장 경제적인 것으로 제시하였다. 대형 화물차 경제성을 분석한 해외 연구별 총소유비용 구성 항목 및 분석 대상 파워트레인 등 자세한 내용은 Table 1을 참조한다.

Table 1. Previous studies abroad of total cost of ownership for heavy-duty truck

Researcher (Year)	Prerequisites for total cost of ownership	Powertrain	Region (ISO-3166)
ICCT (2019)	• (Purchase) vehicle cost • (Operation) fuel, maintenance, charging infrastructure, opportunity cost (time and weight penalty)	ICEV, BEV, FCEV (NG), FCEV (Renewable)	USA
Hunter et al. (2021)	• (Purchase) vehicle cost • (Operation) fuel, maintenance, insurance, charging infrastructure, opportunity cost (lost payload, dwell time)	ICEV, BEV, HEV, NG, PHEV, FCEV	USA
Noll et al. (2022)	• (Purchase) vehicle cost, residual value, subsidy • (Operation) fuel, maintenance, insurance, road charges, charging infrastructure	ICEV, BEV, HEV, NG, FCEV	EEE
Strack et al. (2022)	• (Purchase) vehicle cost • (Operation) fuel, maintenance, road charges	BEV, FCEV	NLD
Zhang et al. (2022)	• (Purchase) vehicle cost, residual value • (Operation) fuel, maintenance, charging infrastructure	ICEV, BEV, PHEV, BECV, FCEV	CHN

국내에서 수행된 총소유비용 기반 친환경차 경제성 분석 연구를 살펴보면 Park et al.(2020)은 5톤급 중형 트럭을 대상으로 전기·수소트럭의 총소유비용을 경유트럭과 비교하였다. 차량 출시 시점으로 전망한 2023년 구매 시 경유트럭 대비 전기트럭의 총소유비용은 1.3배, 수소트럭은 3.9배 수준으로 나타났다. 2030년 구매 시에는 전기트럭의 총소유비용이 경유트럭보다 낮지만, 수소트럭은 여전히 약 2.2배 수준으로 비용이 높을 것으로 분석하였다. Shin(2021)는 중형 SUV를 대상으로 소유기간에 발생하는 총비용을 주행거리로 나눈 주행거리 균등화 비용

(LCOD)를 전망하였다. 모든 시나리오에서 전기차의 LCOD가 경유차보다 낮아지는 시점이 수소차보다 빠를 것으로 예측하였다. Kim(2022)은 중형 해치백 차종의 총소유비용을 분석하였으며, 전기차 충전기 접근성 및 내연기관 대비 긴 충전 시간을 비용으로 반영하였다. Chen et al.(2022)은 1톤급 전기트럭의 구매비용, 연료비용, 자동차세, 감가상각비, 환경비용을 기반으로 경유트럭 대비 경제성을 분석하였다.

선행연구 고찰에서 알 수 있듯이 해외에서는 대형 화물차를 친환경차로 전환했을 때의 총소유비용을 분석한 연구들이 진행되었으나, 국내의 경우 주로 소형차를 대상으로 총소유비용을 분석한 연구를 찾을 수 있었다. 국내 총중량 28톤급 수소트럭은 2022년 12월 상용화되었고 대형 전기트럭은 국내 시장 출시 예정임에 따라 보급이 이루어진 소형차를 중심으로 연구를 수행한 것으로 보인다. 본 연구는 국내 수송부문 온실가스 감축에 필요한 화물차 전환과 관련하여, 총중량 10톤 이상 대형 화물차를 대상으로 총소유비용을 분석하였다는 점에서 이전의 국내 연구들과 차별성이 있다. 또한, Park et al.(2020)의 연구와 총소유비용 분석을 활용하여 전기·수소트럭의 경제성을 경유트럭과 비교하였다는 점에서 유사하나, 분석 데이터에 있어 2040년까지의 연료비용의 전망 값을 반영하였다는 점과, 탄소세, 전기 충전 시간비용 등 시나리오를 기반으로 경유트럭 대비 친환경 화물차의 경제성 확보 시점을 전망했다는 점이 다르다.

2. 연료주기 분석 연구

전기트럭과 수소트럭은 차량 운행 과정에서 온실가스가 배출되지 않아 친환경차로 평가되지만, 발전 방식과 수소 생산방식에 따라 연료 생산과정에서 온실가스가 발생한다. 전기트럭의 경우 전력 생산 시 석탄, 재생에너지 등 발전원 구성에 따라 연료 생산단계의 배출량이 결정되며, 수소트럭은 개질, 수전해 등 수소 생산방식에 따라 결정된다. 이에 대형 화물차의 환경성 분석으로 연료 생산단계를 포함하여 온실가스 배출량을 분석하는 연료주기 분석(Well-to-Wheel, WTW)을 적용하기 위해 문헌을 살펴보았다.

Choi et al.(2020)은 연료주기 분석을 수행하여 내연기관차, 하이브리드, 플러그인 하이브리드, 전기차, 수소차의 온실가스 배출량을 비교하였다. 이를 위해 제8차 전력수급기본계획 등 미래 에너지 정책을 기반으로 국내 연료 생산단계의 온실가스 배출계수를 도출하였다. Yeo(2021)은 기술과 연료비용 등을 최소화하는 에너지시스템모형을 활용하여 도로수송 부문을 구성하는 차종별 보급량 및 친환경차 보급 정도를 전망하고, 연료주기 분석을 통해 도로수송 온실가스 배출량을 분석하였다. Zhang et al.(2022)은 중국 대형 화물차의 친환경차 전환을 위한 파워트레인별 경쟁력 평가를 위해 경제성과 더불어 차량 생산단계에서 발생하는 배출량과 연료주기 배출량을 분석하였다. 본 연구는 선행연구의 국내 배출계수를 토대로 국내 발전원 비중과 수소 생산방식 비중 전망을 반영하여 경유트럭 한 대 전환 시 2022년, 2030년, 2040년 전기트럭과 수소트럭의 온실가스 감축효과를 비교한다는 점에서 차별성을 가진다.

연구 방법론 및 자료 수집

1. 연구 방법론

1) 총소유비용 분석

총소유비용은 차량 소유 기간 동안 발생하는 비용으로, 차량 구매비용뿐만 아니라 운영하는 데 필요한 유지비용 등을 포괄하는 일종의 차량 수명 비용(Vehicle Lifetime Cost)이다. 이에 총소유비용은 차량 구매비용과 운영비용 두 가지로 나누어 Equation 1과 같이 분석하며, 소유 기간은 조달청이 고시한 차량의 내용연수표(제2021-41호)를 토대로 9년으로 적용하였다. 차량 구매비용은 차량 구매 가격에 취득세 및 차량 잔존가치를 반영하고, 차량 운영비용은 연료비용, 유지보수비용, 자동차세의 합계로 산정한다. 차량 운영비용의 할인율은 한국개발연구원에서 제시한 사회적 할인율 4.5%를 적용하였다.

$$\text{총소유비용} = (\text{차량 구매비용} - \text{잔존가치} \times PVF) + \sum_{t=1}^9 \frac{\text{차량 운영비용}}{(1 + \text{할인율})^t} \quad (1)$$

본 연구는 연료가격 고정과 연료가격 변동 시나리오로 구분하여 총소유비용을 분석한다. 그리고 연료가격 고정 보다는 미래 전망치를 반영하는 것이 현실과 부합할 것으로 판단하여, 연료가격 변동을 기준으로 여섯 가지 전제조건(Table 2)을 반영한 후 총소유비용 패리티 도달 시점을 2040년까지 전망한다.

Table 2. Summary table of scenario analysis

Scenario	Fuel price	Scenario description
Fixed fuel price	Fixed	- Base scenario that fuel price fixed at 2022
Reflecting fuel price outlook	Outlook	- Base scenario with projections for fuel price (2023-2040)
• Carbon tax	Outlook	- Reflecting carbon tax based on social cost of CO ₂
• Charging infrastructure	Outlook	- Reflecting zero-emission truck charging infrastructure related cost
• Cost of refueling time	Outlook	- Reflecting BET's cost of refueling time
• Long-haul	Outlook	- Assuming annual driving distance is 150,000km
• Purchase subsidy	Outlook	- Reflecting FCET purchase subsidy
• Fuel price subsidy	Outlook	- Reflecting ICET, FCET fuel price subsidy

첫째, 탄소세 시나리오에는 경유트럭 연평균 배출량에 따른 탄소세를 부과하여 총소유비용을 분석한다. 탄소세는 탄소 가격을 직접적으로 부과하는 질적 정책으로, 일정 부문 감축을 주된 목적으로 정한 영국과 칠레 등 국가를 제외하고 대부분 수송부문을 탄소세 과세 대상으로 포함하고 있다. 이에 U.S. Environmental Protection Agency (EPA)(2016)에서 2050년까지 전망한 톤당 사회적 탄소비용을 기반으로 국내 경유트럭에 탄소세 부과를 가정하였으며, 사회적 탄소비용은 2007년 환율 기반으로 환산하여 적용하였다. 둘째, 충전 인프라 시나리오는 이미 충전 시설이 형성된 내연기관과 다르게 전기·수소트럭의 충전 편의성이 보장되어야 하는 점에 기인하여 충전 인프라 구축 및 운영비용을 반영한다. 충전 인프라 비용은 차량을 소유하는 화물차 운전자에게 직접적으로 발생하는 비용은 아니지만, 친환경 화물차 전환에 필수적인 충전 인프라 비용을 포함하여 사회적 비용을 평가하는 측면에서 의의가 있다. 연료별 일 충전 가능 대수 산정을 위해 전기·수소 충전소 모두 충전기(디스펜서) 1기 설치를 가정하였다. 전기차 충전기 구축비용은 300kW 이상을 기준으로 한전 불입금을 포함하였으며, 수소충전소 관련 비용은 환경부 수소충전소 설치 보조금 지원 기준 특수 수소충전소 사업비용 및 Korea Hydrogen Industry Association (KHIA)(2018)을 활용하였다. 충전 인프라 구축비용에 충전소당 충전 가능한 차량대수(Charging station Capacity, CC)를 역수로 취해 총소유비용에 반영한 Zhang et al.(2022)을 참고하여, 본 연구는 충전 인프라 비용을 Equation 2와 같이 정의한다. 구축비용은 연료별로 상이한 충전소 수명(L)에 따라 할인율을 적용한다.

$$IC_i = \sum_i \frac{1}{CC_i} \times \left[CAPEX_i \times \frac{r(1+r)^{L_i}}{(1+r)^{L_i} - 1} + OPEX_i \right] \quad (2)$$

셋째, 충전 시간비용 시나리오는 250kW 급속 충전(Direct Current)시 완충에 약 2.5시간이 소요되는 대형 전기트럭의 긴 충전 시간을 비용 요소로 반영한다. 내연기관차 대비 전기차의 연료 충전 시간에 따른 불편함을 비용으로 반영한 Levinson and West(2018)를 활용하였다. 선행연구를 토대로 시간가치를 시간당 2012년 환율 기준 \$25.93으로 하고, 본 연구에서 정한 전기트럭 모델의 충전 소요시간을 곱한 값으로 충전 시간비용을 도출하였다. 넷째, 장거리 시나리오는 기준 시나리오 대비 장거리를 운행하였을 경우를 가정하여, 연간 주행거리를 150,000km로 적용한 후 총소유비용을 분석하였다. 다섯째, 정부 구매 보조금 시나리오에서는 국내 수소트럭 구매 시 지급되는 보조금을 반영하였다. 지자체별 보조금이 상이함에 따라 무공해차 보급 사업을 통해 정액 보조되는 대당 국비 2.5억 원을

차량 구매 가격에서 제외된 후 총소유비용을 도출한다. 친환경차 구매 보조금은 시장 초기 보급 활성화를 위한 정책 입에 따라 2030년까지 적용될 것으로 가정하였다. 마지막으로, 연료 보조금 시나리오에는 화물차 유가보조금 관리 규정(국토교통부 고시 제2022-898호) 제8조에 따른 경유트럭과 수소트럭의 연료 보조금을 반영하였다. 경유트럭은 경유 가격과 기준 가격(1,700원/ℓ) 차액의 50%가 보조금으로 지급되며, 수소트럭에는 kg당 4,100원이 지급된다. 수소트럭 연료 보조금은 연료 가격 변동 등에 따라 조정할 수 있다고 명시되어 있음에 따라, 2023년 월별 전국 평균 수소충전소 판매가격에서 보조금이 차지하는 비중의 평균으로 연료가격 전망치에 연료 보조금을 반영하였다.

2) 연료주기 분석

연료주기 분석은 파워트레인별 연료 생산 및 정제 등에서 발생하는 배출량을 추정하는 데 사용되는 방법론으로, 연료 생산단계(WTT)와 연료 사용단계(TTW) 두 단계로 구분된다(European Commission, 2024). UN 기후변화협약(UNFCCC)에서는 인위적 요인에 의해 배출되는 7대 온실가스를 지정하였으나, 본 연구에서는 감축 필요성이 가장 대두되는 이산화탄소(CO₂)만을 온실가스 감축효과 비교 대상으로 한다. 연료 생산단계의 온실가스 배출량 산정을 위한 배출계수는 한국을 대상으로 연료주기 분석을 수행하여 배출계수를 도출한 Choi et al.(2020)의 연구를 활용하였다. 국내의 경우 원유 수입률이 100%임에 따라 Choi et al.(2020)은 원유 수입 후 추출·정제 등의 과정에 따른 온실가스 배출계수를 분석하였다. 본 연구는 동일한 연간 주행거리를 운행할 때 파워트레인별 연료 사용량을 기반으로 배출량을 산정하기 위해 연료별 생산 배출계수를 각각 gCO₂eq/ℓ, gCO₂eq/kWh, gCO₂eq/kg로 환산하여 사용한다(Table 3).

Table 3. CO₂ emission coefficients by fuel production

Diesel (gCO ₂ eq/ℓ)	Electricity (gCO ₂ eq/kWh)			Hydrogen (gCO ₂ eq/kg)			
		Upstream process	Power generation	Upstream process	H ₂ Production		
Recovery	71.94	Coal	58.86	1008.37	Naphtha	1221.85	3730.85
Import	49.58	Heavy oil	96.03	829.61	Natural gas (Off-site)	2059.06	13043.94
Refining	215.73	Natural Gas	157.93	609.06	Water electrolysis	0.00	0.00
Distribution	13.73	Uranium	10.16	0.00	Import	0.00	0.00
-	-	Renewable	0.00	0.00	-	-	-

전기·수소트럭은 운행 중 온실가스가 발생하지 않음에 따라 연료 생산단계의 배출량을 산정하나, 경유트럭은 연료 생산단계와 더불어 차량 운행 과정의 온실가스 배출량 산정이 필요하다. 운행 활동 배출량은 온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침(환경부 고시 제2021-278호)에 제시된 방법론을 활용한다. 연료 판매량(Q) 기반 산정 방식인 Tier 1에 따른 Equation 3을 활용하였으며, 에너지법 시행규칙(2022)에 따른 경유 순발열량(EC) 35.3MJ/L, 배출계수(EF) 74.100kg/TJ를 적용한다.

$$E_{i,j} = \sum (Q_i \times EC_i \times EF_{i,j} \times 10^{-6}) \tag{3}$$

2. 자료 수집

1) 총소유비용 분석 활용 자료

자동차관리법 시행규칙에 따라 국내 대형 화물차는 최대 적재량이 5톤 이상이거나, 총중량(GVW) 10톤 이상인 차량을 의미한다. 본 연구는 총중량 10톤 이상인 대형 화물차를 연구 대상으로 정하고, 주행거리 등 전제조건 가정

시 일반적인 화물 운송용으로 구분되는 카고형을 기준으로 한다. 우선, 차량 구매비용 가정을 위해 국내 시장 출시 또는 출시 예정인 화물차 모델 중 제원이 비슷한 차량을 선정하였다. 수소트럭은 국내 제조사에서 유일하게 출시한 수소 엑시언트 윈바디 모델을, 내연기관 트럭은 동일한 제조사에서 출시한 엑시언트 제원을 활용한다. 국내 연료별 화물차 등록 현황에 따르면 약 90%가 경유차로 운행되고 있음에 따라 내연기관 트럭은 경유트럭만을 대상으로 하였다. 전기트럭은 해외 제조사에서 국내 출시 예정인 볼보(Volvo) 일렉트릭 모델의 제원을 활용한다. 자동차를 구입할 때 차량 판매가에 따라 취득세가 부과되는 점을 고려하여, 지방세법 제12조 영업용 차량을 기준으로 차량 가격 4%를 취득세로 반영하였다. 화물차 내용연수가 만료되는 시점으로 가정한 소유 기간 이후에 발생하는 잔존가치는 자동차 가액 산정에 필요한 차량의 경과 연수별 잔존가치율(보건복지부 고시 제2022-318호)을 적용한다. 2022년 이후 차량 구매비용은 International Council on Clean Transportation(ICCT)(2023)에서 Table 4와 같이 전망한 2040년까지의 차량 가격 증감률을 활용하여 가정한다. ICCT에 따르면 경유트럭 가격은 2027년까지 증가하지만, 2027년부터 2040년까지 동일한 가격을 보인다. 이는 내연기관 차량 판매 규제에 대응하여 차량 제조사가 새로운 디젤 기술 개발을 중단하는 것의 영향으로 보인다. 전기트럭의 경우 지속적인 배터리 용량 향상 및 가격 하락에 따라 2040년까지 연평균 약 3.14%씩 감소하는 추세를 보인다. 이에 경유트럭 구매 가격과 비교할 때 2033년에 가격 경쟁력을 확보하는 것으로 전망하였다. 수소트럭의 경우 2040년까지 연평균 약 4.64%씩 차량 구매 가격이 감소하는 추세를 보인다. 그러나 친환경 차량 기술 개발에 따른 차량 가격 감소 추세에도 수소트럭 가격은 2040년까지 경유트럭 대비 가격 경쟁력을 확보하지 못하는 것으로 나타났다.

Table 4. Forecast of class 8 straight truck price from 2022 to 2040 (\$₂₀₂₂)

Year	ICET	BET	FCET
2022	158,000	270,000	472,000
2023	159,000	256,000	439,000
2024	160,000	241,000	407,000
2025	161,000	228,000	375,000
2030	162,000	167,000	230,000
2035	162,000	158,000	214,000
2040	162,000	150,000	198,000

source : ICCT(2023)

차량 운영비용은 연료비용, 유지보수비용, 자동차세로 구성한다. 화물차주의 월평균 지출액에 따르면 운영비용은 유류비, 수리비, 통행료, 주차비, 숙박비 등으로 이루어진다(Korea Transport Institute, 2022). 하지만 통행료, 주차비와 같이 파워트레인별 특성과 상관없이 동일하게 발생하는 비용은 제외하였으며, 2022년 기준 총소유비용은 항목별로 Table 5와 같이 산정하였다. 연료비용은 파워트레인별 연비와 연평균 주행거리, 국내 연료 판매가격을 통해 산정한다. 연비는 본 연구에서 참조한 차량 모델의 제원을 기반으로 하며, 수소트럭 연비는 국내 수소차 보급 대상 차종 표(MOE, 2023)를 참고하였다. 연평균 주행거리는 화물 운송시장 동향 연간보고서 중 8톤 이상-12톤 미만의 카고형 화물차의 톤급별 일 평균 차량 운행 특성을 기준으로 가정하며, 경유, 전기, 수소 판매가격은 모두 2022년 12월을 기준으로 한다. 경유 가격의 경우 한국석유공사 주유소 평균 판매가격인 1783.21원/ℓ을 적용한다. 전기 충전가격은 국내 전기차 충전요금 혜택 폐지 이후 2022년 9월 1일부터 적용된 100kW 이상 환경부 급속 충전 요금인 347.2원/kWh을 적용한다. 수소 가격은 수소 유통 정보시스템을 기반으로 수집한 한국가스공사의 전국 평균 수소 충전가격 8,798원/kg을 적용한다.

2022년 이후 연료비용은 다음과 같다. 경유는 U.S. Energy Information Administration(EIA)(2023)에서 전망한 교통 부문의 Diesel Fuel(Distillate fuel oil) 데이터 증감률을 국내 경유 기준 가격에 반영하였다. 경유 가격은 2022년부터 2028년까지 감소하는 추세를 보이다가 2029년부터 2040년까지 점차 증가하는 추세를 보인다. 전기차 충전 요금은 전기 충전 기준 가격에 발전원가 전망 증감률을 적용하였다. EIA 교통 부문의 Electricity 데이터보다 국내

전력 상황을 반영하는 것이 적합하다고 판단하여, METER 에너지시스템 모형(Jang et al., 2022)에서 전망한 발전 원가 데이터의 증감률을 활용하였다. METER 에너지 시스템 모형에서는 탄소중립과 신재생에너지 및 저탄소 기술 개발이 동반되는 것으로 가정하여 발전원가를 전망한다. 이에 2040년까지 발전원가가 상승하는 추이를 보이다가 신재생에너지 발전 비용 하락 등으로 2050년까지 발전원가는 감소하는 경향을 보인다. 수소 가격은 수소경제 활성화 로드맵(MOTIE, 2019)에서 제시하고 있는 정부 목표가격을 선형적으로 달성하는 것으로 가정하였다.

유지보수비용의 경우 Korea Transport Institute(2022)의 카고형 일반화물 차주의 월평균 지출액 중 수리비를 적용하였으며, 2022년 기준 30.2만 원으로 전체 지출액의 4.4% 수준이다. 본 연구에서는 전기·수소트럭의 유지보수 비용을 추정된 Wang et al.(2022)을 토대로 하며, 수소 연료전지 시스템 교체 비용을 감안하여 수소트럭 유지보수 비용은 2029년까지 경유트럭과 동일한 수준으로, 2030년부터는 25% 수준 감소할 것으로 가정하였다. 전기트럭 유지보수비용은 2029년까지 경유트럭보다 12% 적은 수준으로, 2030년부터는 29% 수준 절감될 것으로 가정하였다.

자동차세는 자동차관리법 규정에 따라 자동차 등의 소유자에게 지자체가 부과하는 조세이며, 화물차는 적재중량에 따라 지방세법 127조를 기준으로 자동차세가 부과된다. 다만, 10톤 초과 시 추가적으로 10톤 이하 세액에 영업용은 10,000원, 비영업용은 30,000원을 가산한다. 자동차세는 상반기 소유분, 하반기 소유분에 대해 6월, 12월 연간 총 2번 납부해야 한다. 이에 연간 자동차세 계산 시 영업용 차량을 기준으로, 차량에 따른 경감 적용 없이 매년 동일한 자동차세가 부과된다고 가정하였다.

Table 5. Specification and general assumptions for ICET, BET and FCET(2022)

	ICET	BET	FCET
Purchase price (KRW)	141,650,000	348,772,500	610,000,000
Acquisition tax (KRW)	5,666,000	13,950,900	24,400,000
Ownership tax (KRW)	167,500	167,500	167,500
Fuel economy	3.7km/ℓ	1.1km/kWh	17.5km/kg
Fuel price	1783.21KRW/ℓ	347.2KRW/kWh	8,798KRW/kg
Annual driving distance (km)	105,557	105,557	105,557
Maintenance (KRW/year)	3,624,000	3,189,120	3,624,000

note : Price of BET predicted by ICCT was converted into the exchange rate(\$2022) of the Bank of Korea Economic Statistics System

2) 연료주기 분석 활용 자료

연료 생산량 당 온실가스 배출량을 의미하는 통합 배출계수는 국내 발전원과 수소 생산방식 각각 비중의 곱으로 도출한다. 우선 전력 생산단계 온실가스 배출량은 발전원의 구성을 기반으로 결정된다.

국내 발전 방식 비중 전망의 경우 2030년은 산업부 제10차 전력수급기본계획(MOTIE, 2023)에서 전망한 전원 구성 전망을, 2040년 발전방식 비중 전망은 Yeo(2021)의 기준 시나리오 발전량 비중 전망을 활용하였다. 수소는 생산방식에 따라 생산단계 온실가스 배출량이 다르다. 생산단계에서 온실가스가 배출되는 그레이 수소(부생·개질)와 온실가스를 배출하지 않는 그린수소로 구분된다. 국내의 경우 부생수소와 개질수소를 중심으로 수소경제 초기 수소 수요를 충족할 것으로 보인다. 하지만 정유, 철강 등 생산단계에서 발생하는 부생수소는 생산량이 많지 않고, 순도가 낮아 고순도로 정제하는 과정(PSA)이 필요하다. 이에 2030년 수소경제 확산기까지 개질수소 공급 비중이 높을 것으로 전망되며, 수전해 기술 개발에 따라 그린수소 생산이 확대될 것으로 보인다. 국내 수소 생산방식 비중 전망은 수소경제 활성화 로드맵(2019)에서 발표한 수소 생산 방식별 공급 목표를 적용한다. 그리고 정유 부문 배출량은 산업부문 온실가스 감축 목표 달성을 통해 감소할 것으로 전망된다. 탄소중립 녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획에 따른 산업부문 배출량 목표는 2030년 기준 230.7백 만tCO₂로, 2022년 대비 약 6.6% 감축이 필요하다. 이에 산업부문에서 정유 부문 배출량이 차지하는 비중을 반영하여 정유 생산단계 배출량이 점차 감소할 것으로 가정하였다.

연구 결과

1. 총소유비용 분석 결과

시나리오 분석을 통해 내연기관 화물차 대비 친환경 화물차가 비용 경쟁력을 확보하는 시점인 총소유비용 패리티(이하 TCO-Parity)를 전망한 결과는 Table 6과 같다. 연료가격이 2022년 수준으로 유지된다고 가정했을 때 전기트럭은 2026년에 TCO-Parity에 도달하는 반면, 수소트럭은 2040년 이내 경제성을 확보하지 못하는 것으로 분석되었다. 반면 2040년까지 연료가격 전망치를 반영했을 때 전기트럭과 수소트럭은 각각 2031년, 2029년 TCO-Parity에 도달하는 것으로 나타났다. 이에 수소트럭 보급을 위해서는 향후 정책 목표 수준으로의 수소가격 하락이 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

여섯 가지 시나리오를 반영한 결과는 다음과 같다. 탄소세 시나리오에서는 경유트럭 탄소세 부과가 전기트럭의 TCO-Parity 도달 시점이 빨라지는 데 기여할 수 있는 것으로 나타났다. 충전 인프라 시나리오에서는 상용차용 수소 충전 인프라 구축 비용이 전기트럭 대비 높은 수준임에 따라 수소트럭의 TCO-Parity 시점이 2029년에서 2035년으로 늦은 시점에 도달한다. 충전 시간비용 시나리오에서는 전기트럭의 긴 충전 시간이 전기트럭 TCO-Parity 도달 시점을 2037년으로 급격하게 늦추는 데 영향을 주는 것으로 나타났다. 장거리 시나리오의 경우 장거리 운행 시 친환경 대형 화물차의 TCO-Parity 도달 시점이 기준 시나리오보다 빠를 것으로 나타났다. 정부 구매 보조금 시나리오에서 수소트럭의 TCO-Parity 시점이 2026년으로 가장 빠르게 나타났지만, 구매 보조금은 향후 차량가격 변동에 따라 점차 축소될 것을 고려해야 한다. 마지막으로, 경유트럭과 수소트럭을 대상으로 지급되고 있는 화물차 연료 보조금을 적용하였을 경우, 전기트럭의 TCO-Parity 도달 시점이 2032년으로 늦춰지는 것으로 분석되었다.

Table 6. The year that zero-emission trucks reach TCO-Parity by scenario

Scenario	BET	FCET
Fixed fuel price	2026	> 2040
Reflecting fuel price outlook	2031	2029
• Carbon tax	2029	2029
• Charging infrastructure	2032	2035
• Cost of refueling time	2037	2029
• Long-haul	2030	2028
• Purchase subsidy	2031	2026
• Fuel price subsidy	2032	2029

총소유비용 분석은 전망에 사용된 비용 변수가 불확실성을 내재함에 따라, 결과를 확률분포로 평가하는 확률론적 분석이 필요하다. 이에 차량 기술 개발 및 시장에 따라 불확실한 차량 구매비용과 연료비용에 대해 몬테카를로(Monte Carlo Simulation) 시뮬레이션을 적용한다. 몬테카를로 시뮬레이션이란 다중 확률 시뮬레이션이라고도 하며, 난수(Random number)와 확률분포 개념을 활용하여 주로 불확실성을 가진 변수를 포함하여 가능한 결과의 확률을 예측하는 데 사용된다. 이에 차량 구매비용과 연료비용 데이터를 기반으로 난수를 생성할 확률변수의 확률분포 정립하고, 10,000개의 무작위 난수를 생성하였다.

확률론적 분석 결과 2022년 기준 경유트럭의 평균 총소유비용은 4억 6,886만 원, 전기트럭 6억 8,522만 원, 수소트럭 약 11억 원이며, 2022년 전기트럭 경제성 확보 확률은 약 10.68%, 수소트럭은 약 0.06%로 전기트럭의 경제성 확보 확률이 더 높은 것으로 나타났다. 2030년에는 전기트럭, 수소트럭 각각 32.23%, 13.98%, 2040년 39.05%, 35.27%로 전기트럭의 경제성 확보 확률이 높게 나타났으며, 중장기적으로 수소트럭의 경제성 확보 가능성이 점차 높아질 것으로 전망된다(Table 7).

Table 7. Probability of securing economic feasibility of zero-emission truck compared to diesel truck (%)

Probability Distribution	BET	FCET	Distribution for TCO(2022)	
Purchase price	Log-normal distribution			
Fuel price	Triangular distribution			
Forecast of probability	2022	10.68		0.06
	2030	32.23		13.98
	2040	39.05	35.27	

2. 연료주기 분석 결과

발전 및 수소 생산 방식별 통합 배출계수를 기반으로 연료 생산단계를 포함한 전기트럭과 수소트럭의 해당 온실가스 배출량을 산정한 결과는 Table 8과 같다. 2022년 기준 전기트럭 배출량은 54.08tCO₂, 수소트럭 33.59tCO₂로 전기트럭의 온실가스 배출량이 더 높은 것으로 나타났다. 2030년 전기트럭과 수소트럭 배출량은 각각 38.31tCO₂, 50.63tCO₂, 2040년 30.58tCO₂, 34.20tCO₂로 분석되었다. 2030년에서 2040년은 전기트럭이 수소트럭보다 온실가스 배출량이 낮게 나타났다. 이는 국내 재생에너지 발전 비중은 증가할 것으로 전망되는 반면, 국내 수소경제 확산 기인 2030년까지 수소 공급에서 개질수소가 차지하는 비중이 높을 것으로 전망되는 것의 영향으로 해석할 수 있다. 기존 경유트럭을 전기트럭과 수소트럭으로 전환할 때, 2022년 기준 연간 해당 온실가스 저감량은 전기트럭 30.56tCO₂, 수소트럭 51.05tCO₂이다. 2030년 전기트럭 저감량은 해당 46.00tCO₂, 수소트럭은 33.68tCO₂로 재생에너지 발전 비중 확대에 따라 전기트럭의 환경개선 효과가 12.32tCO₂ 높을 것으로 분석되었다. 수소트럭의 경우 수전해 수소 기술 개발 이전 수소경제 확산기에는 개질수소를 중심으로 수소 공급 인프라를 확충하여 해당 저감량이 낮은 것으로 해석할 수 있다. 2040년에는 전기트럭 저감량은 해당 53.40tCO₂, 수소트럭은 49.78tCO₂로, 친환경 화물차 전환 시 전기트럭의 온실가스 감축 효과가 2040년 기준 해당 약 3.62tCO₂ 높을 것으로 전망하였다.

Table 8. Forecast of annual emission and reduction effect (tCO₂)

Year	Annual Emission per vehicle			Reduction Effect	
	ICET (A)	BET (B)	FCET (C)	BET (D=A-B)	FCET (E=A-C)
2022	84.64	54.08	33.59	30.56	51.05
2030	84.31	38.31	50.63	46.00	33.68
2040	83.98	30.58	34.20	53.40	49.78

연구 결과의 시사점

본 연구는 총소유비용 분석 및 연료주기 분석으로 전기트럭과 수소트럭의 경제적, 환경적 경쟁력을 비교하였으며, 연구 결과를 토대로 도출한 시사점은 다음과 같다.

첫째, 대형 화물차는 연간 주행거리가 승용차보다 길어 운영비용이 큰 비중을 차지하며, 연료비용이 총소유비용에 크게 영향을 준다. 수소트럭은 연료가격 고정 시나리오에서는 2040년 이내 TCO-Parity에 도달하지 못하지만, 정부 수소가격 목표 달성을 가정한 연료가격 변동 시나리오에서는 TCO-Parity에 도달할 수 있을 것으로 전망되었다. 즉, 국내 수소트럭 보급 확산을 위해서는 내연기관 대비 경쟁력 있는 충전가격 형성이 중요하다. 반면, 연료가격 고정 시나리오에서 수소트럭 대비 빠른 경제성 확보가 가능할 것으로 전망된 전기트럭은 연료가격 변동 시나리오에서 TCO-Parity 도달 시점이 늦춰졌다. 전력단가 전망에서 기인한 전기차 충전 요금 인상 가능성에 따른 것이며, 국

내 한국전력공사의 누적적자 등을 감안해도 향후 전기차 충전요금은 인상될 것으로 전망된다. 이에 수요자 관점에서 친환경 화물차가 내연기관 대비 경제성을 확보하기 위해서는 친환경 화물차의 연료비용이 적정 수준에서 형성되는 것이 중요하다.

둘째, 연료가격 고정 시나리오에 따르면 전기트럭의 TCO-Parity 시점은 2026년으로 빠르고, 확률론적 분석 결과 전기트럭이 경제성을 확보할 확률이 수소트럭보다 높게 나타났다. 또한, 전기트럭 온실가스 감축효과가 수소트럭보다 2030년 12.32tCO₂, 2040년 3.62tCO₂ 높을 것으로 분석되었다. 10톤 이상 화물차 등록 대수가 2023년 6월 기준 약 15.9만 대인 것에 비하면 정부의 수소트럭 보급 목표는 2040년 30,000대로 약 18.85%에 불과하다. 하지만 정부는 국내 화물차 전환을 위해 수소트럭만을 대상으로 구매 보조금 및 세제 혜택을 지원하고 있다. 수송부문 온실가스 감축을 위해서는 대형 전기트럭에 대한 지원 정책을 마련하여 친환경차 전환 과도기에 대형 화물차 전환 방안을 다양화해야 할 필요가 있다.

셋째, 구매 보조금 시나리오에서 수소트럭은 2026년부터 경제성을 확보할 수 있을 것으로 평가된다. 그러나 친환경차 구매 보조금은 지속 가능한 정책이 아님에 따라 시장 초기 단계 이후 친환경 화물차 수요를 형성하는 정책 개발이 필요하다. 본 연구에서 경유트럭을 대상으로 탄소세를 부과하는 것은 전기트럭의 TCO-Parity를 앞당길 수 있는 정책으로 평가되었다. 유류세 등 국내 정책 여건을 고려한 수송부문 탄소세 부과 정책적 방안을 마련하여, 점진적으로 경유트럭의 친환경 화물차 전환을 유도할 필요가 있다.

넷째, 연료주기 분석을 통해 온실가스 감축효과를 비교한 결과, 전기·수소트럭으로 전환하더라도 연료 생산단계 배출량에 따라 감축효과가 상이하다. 즉, 진정한 친환경 차량이 되기 위해서는 발전 및 수소 생산에서 배출되는 온실가스를 줄이기 위한 노력도 필요하다. 제1차 수소경제 이행 기본계획에 따른 청정수소 보급 목표 달성률 가정할 경우 2050년 수소트럭은 배출량 제로 수준의 환경개선 효과를 가질 것으로 예상된다. 이에 수송부문 온실가스 감축 목표를 달성하기 위해서는 친환경 화물차 전환뿐만 아니라 국내 신재생에너지원 발전 비중 목표 달성 및 청정수소 생산 비중 확대를 병행하는 것이 필요하다.

결론 및 향후 연구

본 연구는 전기·수소 대형 화물차의 경제성 확보 시점을 2040년까지 전망하고, 해당 온실가스 감축효과를 비교하였다. 이를 위해 총소유비용 분석을 활용하여 기존 경유트럭과 전기·수소트럭의 총소유비용을 전망하였으며, 연료주기 분석을 통해 친환경 화물차의 연료 생산단계 배출량을 고려한 해당 온실가스 저감량을 도출하였다. 본 연구의 방법론을 활용하여 장래 차량 및 연료가격 변화에 따라 효율적인 친환경 대형 화물차 전환 정책을 설정할 수 있을 것으로 기대한다. 예를 들어 TCO-Parity를 앞당길 수 있는 정책을 판단하고, 경유트럭 총소유비용과의 격차를 분석하여 보조금을 조정할 수 있을 것으로 사료된다.

한편, 본 연구는 다음과 같은 한계점이 있다. 연구 대상을 10톤 이상 화물차 중 일반적인 화물 운송용으로 구분되는 카고형으로 한정하였지만, 대형 화물차는 용도에 따라 덤프형, 특수 용도형 등 다양한 차종과 중량으로 구성된다. 장래에는 기술 개발을 통해 친환경 화물차 모델이 다양화될 것임에 따라, 용도와 톤급을 세분화하여 국내 대형 화물차의 경제성 및 환경성을 분석할 수 있을 것으로 예상된다. 국가 수송부문 온실가스 감축을 위한 친환경 화물차 전환에 기여할 수 있는 후속 연구가 수행되기를 기대한다.


Funding


This work was supported by Korea Environment Industry & Technology Institute(KEITI) through “Climate Change R&D Project for New Climate Regime”, funded by Korea Ministry of Environment(MOE) (RS-2022-KE002488).

알림

본 논문은 제 1저자의 석사학위논문(Kim, 2023) 및 대한교통학회 제90회 학술발표회(2024.03.28.)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

ORCID

KIM, So Yun  <http://orcid.org/0009-0003-0782-6163>

AHN, Young-Hwan  <https://orcid.org/0000-0002-4437-2610>

REFERENCES

- Chen M.W., Lee H.S. (2022), Economic Analysis of Electric Truck Investment on Parcel Deliver, Korean Journal of Logistics, 30(3), 1-14.
- Choi W.J., Yoo E.J., Seol E.S., Kim M.S., Song H.H. (2020), Greenhouse Gas Emissions of Conventional and Alternative Vehicles: Predictions Based on Energy Policy Analysis in South Korea, Applied Energy, 265, 114754.
- European Commission, https://joint-research-centre.ec.europa.eu/welcome-jec-website/jec-activities_en, 2024.05.17.
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center(GIR) (2022), 2022 National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea.
- Hunter C., Penev M., Reznicek E., Lustbader J., Birky A., Zhang C. (2021), Spatial and Temporal Analysis of the Total Cost of Ownership for Class 8 Tractors and Class 4 Parcel Delivery Trucks (No. NREL/TP-5400-71796), National Renewable Energy Lab(NREL), Golden, CO, United States.
- International Council on Clean Transportation(ICCT) (2019), Estimating the Infrastructure needs and costs for the launch of zero-emission trucks, White Paper(2019.8.).
- International Council on Clean Transportation(ICCT) (2023), Purchase Costs of Zero-emission Trucks in the United States to Meet Future Phase 3 GHG Standards, Working Paper 2023-10.
- Jang M.J., Lee J.Y., Lee H.J., Ahn Y.H. (2022), A Study on GHG Emission and Emission Intensity Pathways in the Power Sector of Korea by 2050 Carbon Neutrality, Journal of Climate Change, 30(6), 843-858.
- Kim D. W. (2022), Compared to Internal Combustion Engines by Comparing Total Cost of Ownership Electric Vehicle Competitiveness Analysis, Korea Energy Economics Institute(KEEI), Energy Focus, 83, 66-87.
- Kim S. Y. (2023), Economic and Environmental Analysis of Zero-Emission Heavy Duty Vehicles for Greenhouse Gas Reduction : Focusing on Battery-Electric and Hydrogen Fuel Cell Trucks, Master Thesis, Sookmyung Women's University.
- Korea Hydrogen Industry Association (KHIA) (2018), Analysis of costs related to operating domestic hydrogen charging stations. Ulsan Hydrogen Supply Hub City Infrastructure Construction Strategy Seminar(2018.01.16.).
- Korea Transport Institute (2022), Annual Report on Cargo Market Trends, Sejong, South Korea.
- Korea Transportation Safety Authority (2022), Greenhouse Gas Emissions by Region and Type of Vehicle.
- Levinson R.S., West T.H. (2018), Impact of Public Electric Vehicle Charging Infrastructure, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 64, 158-177.

- Ministry of Environment(MOE) (2023), 「Hydrogen Vehicle Distribution and Hydrogen Charging Station Installation Project」 2023 Subsidy Processing Guidelines.
- Ministry of Trade, Industry and Energy(MOTIE) (2019), Hydrogen Economy Roadmap of Korea.
- Ministry of Trade, Industry and Energy(MOTIE) (2023), 10th Plan for Electricity Supply and Demand, 2022-2036.
- Noll B., del Val S., Schmidt T. S., Steffen B. (2022), Analyzing the Competitiveness of Low-carbon Drive-technologies in Road-freight: A Total Cost of Ownership Analysis in Europe, *Applied Energy*, 306, 118079.
- Park J.Y., Kim J.I., Koo Y.M. (2020), Strategic Plans to Introduce Fuel Cell Electric Vehicle Considering Marketability and Eco-friendly Car Industry, Korea Transport Institute, Sejong, South Korea.
- Shin J.W. (2021), A Levelized Cost of Driving Approach to the Assessment of the Green Vehicles, Master Thesis, Sookmyung Women's University.
- Strack F., Scholz F., Roffel H. (2022), Assessing the Competitiveness of Battery-electric and Hydrogen Technologies in Heavy-duty Trucking Using Fuel-costs, University of Groningen.
- U.S. Energy Information Administration(EIA) (2023), Annual Energy Outlook 2023.
- U.S. Environmental Protection Agency(EPA) (2016), Social Cost of Carbon: Technical Documentation.
- Wang et al. (2022), Estimating Maintenance and Repair Costs for Battery Electric and Fuel Cell Heavy Duty Trucks.
- Yeo Y.J. (2021), Analysis of Well-to-Wheel GHG Emission in Road Transportation Using Energy System Model, Master Thesis, Sookmyung Women's University.
- Zhang X., Lin Z., Crawford C., Li S. (2022), Techno-economic Comparison of Electrification for Heavy-duty Trucks in China by 2040, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 102, 103152.