Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 6, 2025, pp. 625~632
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.6.625

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

수송부문 운행단계 탄소배출 영향 측면에서의 수소시범도시 수소전기트램 도입 효과

신가영[1] · 이준희[2] · 이재영[1,3] · 이철규[1†] · 김보경[2]

[1]한국철도기술연구원 교통환경연구실, [2]한국철도기술연구원 추진시스템연구실, [3]과학기술연합대학원 교통시스템공학부

Effect of Introducing Hydrogen Fuel Cell Trams in Hydrogen Pilot Cities on Carbon Emission Impact in the Operation Phase of the Transport Sector

KAYOUNG SHIN[1], JUNE HEE LEE[2], JAE-YOUNG LEE[1,3], CHEUL-KYU LEE[1†], BO-KYOUNG KIM[2]

[1]Transportation Environmental Research Department, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 16105, Korea
[2]Propulsion System Research Department, Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 16105, Korea
[3]Transportation System Engineering, University of Science Technology, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 16105, Korea

†Corresponding author : cheul@krri.re.kr

Received 1 October, 2025
Revised 20 October, 2025
Accepted 3 November, 2025

Abstract >> This study quantitatively analyzed the carbon emission impact in the transport sector of hydrogen pilot cities when hydrogen fuel cell trams replace public transport, assuming that on tram set replaces three buses. Annual travel distance and fuel consumption were estimated from route distance, operation frequency, and fuel efficiency by energy type. Scenarios considered bus fuel types (diesel, CNG, and electric) and hydrogen production methods (grey, blue, and green). Results indicate that hydrogen fuel cell trams significantly reduce GHG emissions compared with all bus types, with the greatest benefits observed when using green hydrogen, over 97% reduction. The findings highlight that hydrogen fuel cell trams can contribute to the decarbonization of urban transport. Furthermore, the reduction effects differ with transport characteristics and the energy mix, thereby offering a valuable basis for future hydrogen-based transport transition policies and the development of region-specific carbon neutrality strategies.

Key words : Hydrogen fuel cell tram(수소전기트램), Hydrogen production method (수소생산방식), Hydrogen pilot city(수소시범도시), Diesel bus replacement(디젤버스 대체), Decarbonization(탈탄소화)

1. 서 론

전 세계적으로 탄소중립 실현을 위한 에너지 전환이 가속화되는 가운데, 도시는 에너지 소비 및 온실가스 배출의 주된 공간으로서 탈탄소 전략의 핵심 거점으로 부상하고 있다. 국제에너지기구(IEA)에 따르면, 전 세계 인구의 절반 이상인 56%의 인구가 거주하는 도시는 전 세계 에너지 소비의 약 75%, 온실가스 배출량의 약 70%를 차지하는 것으로 나타났다[1]. 정부는 수소경제 활성화 및 탄소중립 달성을 목표로 수소도시 정책을 추진하고 있다. 수소를 중심 에너지원으로 활용하는 도시 내 인프라 및 교통체계 전환이 점진적으로 확산 중이다. 수소도시 2.0 추진전략[2]에 따르면 기존 생활권 단위(3~10 km) 범위를 도시 단위로 확대하고, 활용 분야를 수송, 산업, 건물, 발전 등 도시 구성요소 전 분야로 확대 시행 예정이다. 기존에는 공동주택, 공공청사, 수소차·수소버스 중심의 수소 활용에 머물렀으나 최근 도시형 수송수단인 수소전기트램과 같은 교통 인프라까지 포함한 통합적인 에너지 전환이 강조되고 있다.

도시 수송부문의 탈탄소화가 시급한 과제로 대두되는 가운데, 수소도시 정책은 수송을 포함한 전 분야로 수소 활용을 확대하는 추세이다. 수소에너지는 운행 중 탄소배출이 없는 친환경 에너지원으로 자동차와 버스를 중심으로 적용이 확산되고 있으나, 수소전기트램과 같은 도시형 철도교통수단에 대한 환경성 및 탄소 감축효과에 대한 실증연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 기존연구는 수소 생산 방식에 따른 환경성 및 경제성 비교[3-8], 수소 연료를 활용한 자동차·버스 등 수송수단의 적용성[9-11], 또는 철도부문에서의 기술적 적용 가능성이나 안정성 평가[12-13]에 국한되어 왔다. 특히, 수소 생산 방식에 따라 운행단계에서 수소전기트램의 탄소 감축 성과를 정량적으로 분석한 연구는 부족한 상황이다. 이에 본 연구에서는 수소 시범도시로 지정된 지역 2곳(A도시, B도시)을 대상으로 수소전기트램이 디젤·CNG·전기버스를 대체했을 때 운행단계에서 발생하는 탄소 저감 효과를 수소 생산방식별로 산정하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 수소시범도시 내 수소전기트램을 도입할 경우 운행단계에서 수송부문의 탄소감축 효과를 정량적으로 분석하고자 세 단계로 연구절차를 구성하였다. 우선, 시나리오 설정 단계에서는 분석 대상 수소시범도시를 정하고 비교 대상 교통수단을 선정 후 수소생산방식을 그레이(grey), 블루(blue), 그린(green)수소로 구분하여 시나리오를 세분화하였다. 탄소배출량 산정 단계에서는 도시별 노선거리, 연간 운행횟수, 연료별 평균 연비를 고려하여 각 시나리오의 탄소배출량을 산정하였다. 마지막으로 탄소 감축 효과 분석 단계에서는 산정된 운행단계 배출량을 비교하여, 기존 버스 대비 수소전기트램으로 전환했을 때의 감축량을 도출하였다. 특히, 수소생산방식에 따라 동일한 교통수단으로의 전환이라고 하더라도 생산단계 차이에 따른 감축효과를 분석하였다. 수소버스는 수소전기트램과 동일한 에너지원으로 수송 용량의 차이만을 고려하므로 본 연구 범위에서는 제외하였다.

2.1 시나리오 설정

시나리오 설정 단계에서는 분석 대상 지역을 수소도시 시범 사업이 진행중인 A도시 및 B도시로 정하고 비교 대상 교통수단을 디젤버스, CNG버스, 전기버스로 설정하였으며, 각 운행수단이 100% 운행하는 경우로 가정하였다. 또한 수소전기트램의 경우

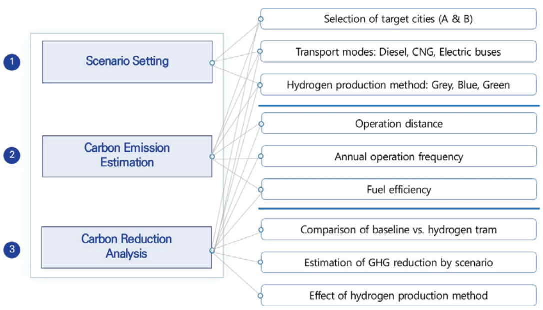


Fig. 1. Research framework

차량 운행단계에서는 직접적인 온실가스 배출이 발생하지 않지만 운행에 필요한 수소 사용량에 따라 간접배출이 발생한다. 특히, 수소생산방식에 따라 배출계수가 상이하므로, 본 연구에서는 수소 사용량을 기준으로 생산방식별 배출계수 차이를 반영하였다. 또한 본 연구의 시스템경계는 운행단계를 중심으로 설정하였으며 수소전기트램의 충전소 내 압축·저장·이송 과정을 포함한 충전단계는 시스템경계에서 제외하였다. 이는 현재 수소전기트램의 충전 인프라가 실증단계에 머물러 있으며, 충전소의 운영 방식, 에너지 소비량, 공급 경로 등 관련 데이터의 신뢰성이 충분히 확보되지 않았기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 충전단계를 시스템경계 외부 요소로 간주하고, 수소 생산단계의 배출계수만을 반영하였다. 이러한 시스템경계 설정은 운행단계에서의 직접적인 탄소저감 효과를 명확히 분석하기 위한 목적이며, 충전 및 공급 인프라 구축이 본격화되면 향후 연구에서는 충전단계를 포함한 Well-to-Wheel 전과정 평가로 확장할 필요가 있다.

2.2 탄소배출량 산정

본 연구에서는 도시 A와 도시 B를 대상으로 교통수단별 탄소배출량을 산정하였다. Table 1에 나타낸 바와 같이 도시별 왕복 노선거리와 일일 운행횟수의 차이를 반영하여 전환비율과 연간 운행일수를 고려하여 연간 주행거리를 산출하고, 이를 연비/전비로 나누어 연간 연료 및 전력사용량을 도출하였다. 전환비율은 트램 1편성이 버스 3대를 대체하는 것으로 가정하였다[14).

디젤버스와 CNG버스의 탄소배출량은 온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침(환경부) [별표6]에서 규정하고 있는 도로부문 이동연소 방법론에 따라 식 (1)을 이용하여 산정하였다. Tier 1 수준에서 보고 대상 온실가스인 이산화탄소(CO_2), 아산화질소(N_2O), 메탄(CH_4)의 기본 배출계수를 연료 소비량에 순발열량을 곱하여 산정하였다. 온실가스 배출량 산정에 있어서, 기본 배출계수는 Table 2에 나타낸 바와 같이, 해당지침에서 제공된 ‘도로부문 기본 배출계수’를 사용하였으며, 지구온난화 계수는 동 지침 [별표2]에서 제시하고 있는 온실가스별 지구온난화 계수인 21 tCO_2/tCH_4 및 310 tCO_2/tN_2O를 적용하였다. 순발열량은 에너지법 시행규칙 [별표] (개정 2022.11.21.) ‘에너지열량 환산기준’에 제시된 값을 적용하였으며, 디젤은 35.3 MJ/L, CNG는 38.5 MJ/Nm^{3}를 적용하였다.

$$E_{i,j} = \sum \left(Q_i \times EC_i \times EF_{i,j} \times GWP_j \times 10^{-9} \right) \quad (1)$$

여기서, $E_{i,j}$는 연료(i)의 연소에 따른 온실가스(j)의 배출량(tGHG), Q_i는 연료(i)의 사용량(디젤: KL-연료, CNG: m^3-연료), EC_i는 연료(i)의 열량계수(순발열량, 디젤: MJ/L-연료, CNG: MJ/Nm^3-연료), $EF_{i,j}$는 연료(i)에 따른 온실가스(j)의 배출계수(kgGHG/TJ-연료), GWP_j는 온실가스(j)의 지구온난화계수(GWP), i는 연료 종류이다.

전기버스는 연료 연소가 아닌 전력 사용으로 인해 간접배출이 발생한다. 따라서 온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침(환경부)에서 제시하는 전력사용 배출량 산정 방법을 적용하였다. 전력 사용량(kWh)에 국가 전력계통 배출계수($kgCO_2eq/kWh$)를 곱하여 산정하며, 별도의 GWP 적용이나 발열량 산정 과정은 필요하지 않아 식 (2)에 따라 산정하였다.

$$E_{elec} = Q_{elec} \times EF_{elec} \times 10^{-3} \quad (2)$$

여기서, E_{elec}은 전력 사용에 따른 온실가스 배출량(tCO_2eq), Q_{elec}은 전력 사용량(kWh), EF_{elec}은 전력 배출계수($kgCO_2eq/kWh$)이다.

수소전기트램은 수소 연료전지를 동력원으로 사용하는 차량으로, 수소 연료전지는 수소와 산소의 화학반응을 통해 전기를 생성하며, 그 전기를 사용하여 차량을 구동하는 시스템이다. 이 과정에서 온실가스가 배출되지 않으며 부산물로 물(H_2O)과 열만 배출되므로 탄소중립적이지만, 실제 운행을 위해

필요한 수소를 생산하는 단계에서는 배출이 발생한다[3,8,12]. 특히 수소의 생산 방식에 따라 배출량이 상이하므로 각 방식별 배출계수를 적용하였으며 Table 3에 나타내었다.

현재 수소전기트램은 실증 단계에 있으며 상용화가 이루어지지 않아 실제 운행 데이터가 제한적이다. 본 연구에서는 실증단계에서 확보된 수소전기트램의 운행 효율을 기반으로 수소 연료소비량을 산정하였다. 해당 차량은 1편성 5량으로 구성되어 있으며, 최대 승차 인원 305인, 1회 충전 주행거리 약 150～200 km, 수소연료전지 용량 95 kW x 4기 (총 380 kW)의 구동시스템을 갖추고 있다. 또한 130 kW급 배터리팩(2기) 기반의 에너지저장시스템(ESS)이 함께 적용되어, 가속 및 제동 시 전력 보조와 회생에너지 관리 기능을 수행한다. 최고속도는 70 km/h이며, 실증단계 차량의 성능평가 결과를 적용한 효율은 약 5.0 km/kg-H_2이다[14]. 비교 대상 버스의 최대 승차인원은 CNG버스 95인, 전기버스 88인 수준으로, 동일 수송 수요 기준으로 트램 1편성이 약 3대의 버스 수송능력을 대체[14]하는 것으로 가정하였다. 이에 따라 각 시나리오별 버스의 연간 연료소비량(디젤·CNG·전기)을 동일 운행거리 조건으로 환산하고, 상기 전환비율을 적용하여 수소전기트램의 연간 수소소비량을 도출하였다. 최종적으로 산출된 수소 연료소비량에 실증단계 차량의 운행 효율을 적용하고, 생산방식별 배출계수를 연계여 생산방식에 따른 탄소배출량을 산정하였다.

Table 1. Operational parameters and fuel efficiency

City	Operation distance[1] (km)	Operation frequency[2] (trips/day)	Fuel Efficiency			
			Diesel[3] (km/L)	CNG[4] (km/m^3)	Electricity[5] (km/kWh)	Hydrogen[6] (km/kg)
City A	44.00	100	2.49	2.05	0.74	5.00
City B	21.98	84				

Source: 1～2) KRRI (2023)[14] and KDI (2023)[17], 3～4) CNI (2017)[18], 5) A.S. Al-Ogaili et al. (2020)[19], 6) KRRI (2023)[14]

Table 2. Default emission factors for diesel, CNG, and electricity

Classfication	Net Calorific Value[1] (NCV)	Density[2] (kg/m^3)	GHG Emission Factors[3]			Electricity Emission Factor[4] ($kgCO_2$/kWh)
			CO_2 (kg/TJ)	CH_4 (kg/TJ)	N_2O (kg/TJ)	
Diesel	35.2 MJ/L	-	74,100	3.9	3.9	-
CNG	38.5 MJ/Nm^3	0.745	56,100	92	3	-
Electricity	-	-	-	-	-	0.4781

Source: 1) MoTIE (2022)[16], 2) Seo et al. (2013)[20] 3) MoE (2014)[15], 4) National Greenhouse Gas Inventory Center(2024)[21]

Table 3. Emission factor for H_2 production

Classification		Emission Factor ($kgCO_2eq$)
Hydrogen Train	Grey H_2	7.51
	Blue H_2	3.01
	Green H_2	0.41

Source: Jang et al. (2024)[3]

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 시범도시 A와 B를 대상으로 디젤, CNG, 전기버스와 수소전기트램을 비교하여 운행단계에서의 온실가스 배출량을 산정하고, 수소 생산방식에 따른 탄소감축 효과를 분석하였으며, 분석 결과는 Fig. 2에 나타내었다.

3.1 교통수단 전환에 따른 탄소 감축 효과 분석

시범도시 A와 B 모두에서 수소전기트램 전환은 기존 디젤·CNG·전기버스 대비 배출량을 크게 감소시키는 것으로 나타났다. 시범도시 A의 경우, 디젤버스와 CNG버스의 연간 배출량은 각각 5,135 tCO_2eq와 5,335 tCO_2eq, 전기버스는 3,113 tCO_2eq로 나타났다. 수소전기트램은 생산방식에 따라 그레이 수소 804 tCO_2eq, 블루 수소 322 tCO_2eq, 그린 수소 44 tCO_2eq로 산정되었다. 이는 그린 수소 기반 수소전기트램으로 전환할 경우, A 도시의 수송 부문 운송단계 탄소배출량 중 연간 약 5,090 tCO_2eq의 감축효과가 나타나고, 블루수소는 4,812 tCO_2eq, 그레이 수소는 4,330 tCO_2eq로 감축 효과가 산정되었다. CNG 버스에서 그린수소 수소전기트램으로 전환 시 약 5,291 tCO_2eq, 전기버스 대체 시에는 약 3,068 tCO_2eq 수준의 탄소배출이 감축되었다. B도시에서는 디젤 대체 시, 연간 2,136 tCO_2eq, CNG는 2,220 tCO_2eq, 전기는 1,278 tCO_2eq의 감축효과가 나타났으며, 모든 시나리오에서 그린수소가 가장 큰 저감효과를 보였다.

3.2 수소생산방식에 따른 탄소 감축 효과 분석

수소전기트램의 배출량은 차량 운행 단계에서 직접 배출이 발생하지 않으며, 탄소배출량은 수소 생산 및 공급단계에서 발생하는 간접배출에 해당한다. 특히, 그레이 수소는 천연가스 개질(Steam Methane Reforming, SMR) 과정에서 발생하는 CO_2를 그대로 배출하기 때문에 배출량이 가장 크며, 블루 수소는 동일한 개질 공정을 사용하되 탄소 포집 및 저장(Carbon Capture Storage, CCS) 기술을 적용하여 일부 CO_2 배출량을 저감시킨다. 그린 수소는 재생에너지를 활용한 수전해 방식으로 생산되므로 탄소중립적인 방식으로 생산된다. 이에 수소 생산방식에 따라 A도시 기준 그레이 수소는 804 tCO_2eq, 블루 수

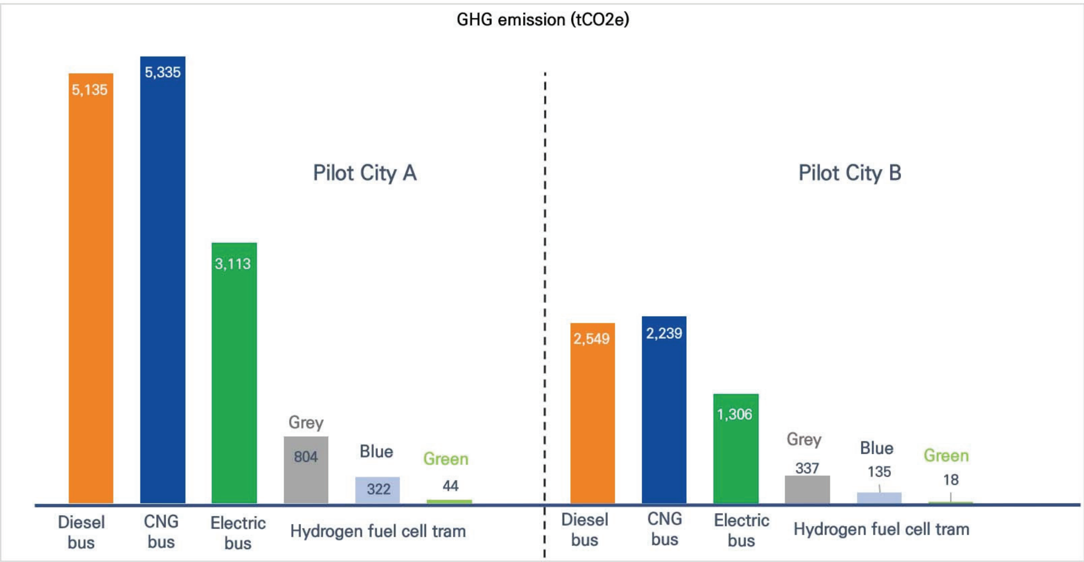


Fig. 2. Senario-based GHG emissions of transport modes in Pilot City A and Pilot City B

소 322 tCO_2eq, 그린 수소 44 tCO_2eq 로 수소생산방식에 따른 탄소 감축 효과가 크게 달라짐을 확인할 수 있었다. 이는 재생에너지 기반의 그린 수소를 활용할 경우 도시 교통부문 탈탄소화를 위한 가장 효과적인 대안임을 보여준다. 도시 교통부문 탄소감축을 위해서는 수소전기트램을 도입하는 것만으로는 충분하지 않으며, 에너지원 공급망의 탈탄소화 정책이 연계될 때 감축효과가 제고되는 것으로 판단된다.

3.3 도시별 조건에 따른 탄소 감축 효과 분석

수소시범도시 A는 왕복 노선거리와 일일 운행횟수 빈도가 높아 배출량이 크게 산정되었으며, 이에 따라 수소전기트램으로 전환 시 감축 효과 역시 큰 것으로 나타났다. 디젤버스를 그린 수소 기반 수소전기트램으로 대체할 경우 약 5,091 tCO_2eq, CNG버스는 5,291 tCO_2eq, 전기버스는 3,069 tCO_2eq 수준의 배출 감축이 달성되었다. 이는 교통 수요가 큰 도시일수록 동일한 기술 전환을 통해 더 큰 절대적 감축량을 확보할 수 있음을 의미한다. 수소시범도시 B는 노선거리와 운행 빈도가 낮아 전체 배출량과 감축량은 상대적으로 작았으나, 감축률 측면에서는 A도시와 거의 유사하게 나타났다. 이는 도시 규모와 관계없이 수소전기트램으로의 전환이 실질적인 저감 효과를 보인다는 것을 의미한다. 감축 효과를 정량적으로 확인하기 위해, 각 도시의 감축률은 식 (3)에 따라 산정하였다.

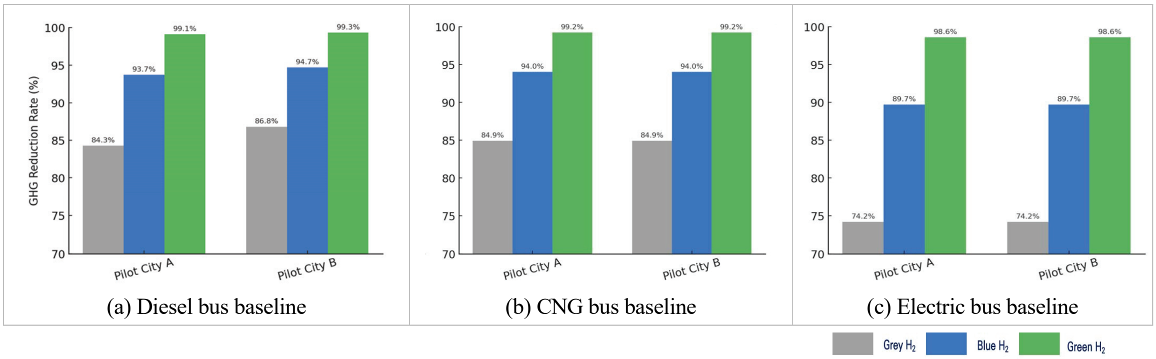
$$GHG\,Reduction\,Rate(\%) = \frac{E_{⌂|,i} - E_{scenario,j}}{E_{⌂|,i}} \times 100 \quad (3)$$

여기서, $E_{baseline,i}$ 는 기존 운행수단별 온실가스 배출량(tCO_2eq), $E_{scenario,j}$ 는 수소전기트램 시나리오별 온실가스 배출량(tCO_2eq)을, i 는 Diesel, CNG, Electric bus를, j 는 Grey, Blue, Green H_2를 각각 나타낸다.

Fig. 3에 나타낸 바와 같이, 디젤버스 대비 수소전기트램으로 전환 시 A도시의 감축률은 그레이 수소 84.3%, 블루 수소 93.7%, 그린 수소 99.1%, B도시는 각각 86.8%, 93.7%, 99.3%로 산정되었다. 두 도시간 감축률 차이는 1-2% 이내로, 도시 규모나 운행조건보다 수소생산 방식에 따른 탄소집약도 차이가 감축 효율에 더 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 또한 CNG버스와 전기버스를 기준으로 비교한 경우에도 A도시와 B도시 모두 감축률이 거의 동일하게 나타나, 도시 간 감축 효율성은 유사한 수준으로 확인되었다. 결과적으로 각 도시의 운영 조건에 따라 규모가 달라지더라도 기존 교통수단 대비 감축 효율성은 유사한 수준으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 수소시범도시 A와 B를 대상으로 디젤·CNG·전기버스 등 기존 버스 교통수단을 수소전기트램으로 전환할 경우 운행단계에서의 온실가스



(a) Diesel bus baseline (b) CNG bus baseline (c) Electric bus baseline

Fig. 3. Comparative GHG reduction performance of hydrogen tram scenarios by baseline vehicle type and pilot city

감축 효과를 정량적으로 분석하였다. 분석 결과, 두 도시 모두에서 수소전기트램은 기존 교통수단 대비 현저히 낮은 배출량을 보였으며, 특히 재생에너지 기반의 그린 수소 적용 시 약 97~99% 이상의 감축률을 달성하는 것으로 나타났다. 이로써 수소전기트램이 도시 교통부문의 탈탄소화 수단으로서의 효과와 적용 타당성이 검증되었다.

또한 본 연구는 수소 생산방식과 버스 연료 유형을 복합적으로 고려하여 수소전기트램 도입이 도시 교통 시스템의 탈탄소화 전환에 기여할 수 있음을 실증적으로 제시하였다는 데에 의의가 있다. 특히 도시별 수송 특성과 에너지원 조합에 따라 감축 효과가 상이함을 확인함으로써, 향후 수소 기반 교통 전환 정책 및 지역 맞춤형 탄소중립 전략 수립을 위한 기초자료로 활용될 수 있다. 나아가 도시 교통부문 탄소 감축을 위해서는 수소전기트램 도입만으로는 충분하지 않으며, 에너지원 공급망의 탈탄소화 정책이 연계될 때 감축 효과가 더욱 제고될 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 수소전기트램의 운행 단계에서 발생하는 온실가스 배출량만을 분석 대상으로 하였으며, 수소전기트램 인프라가 100% 구축되었다는 전제 하에 수행되었다는 한계가 있다. 또한, 본 연구에서는 수소 연료의 전과정(Life cycle) 중 생산 단계부터 사용 단계(Tank to Wheel)까지의 수송 과정은 고려하지 않았다. 즉, 수소 생산지에서 충전소 또는 수소전기트램까지의 수송 과정에서 발생할 수 있는 에너지 소비와 온실가스 배출은 고려하지 않았다. 수소의 운반 방식이나 수송 거리 등에 따라 다양한 결과가 예상되므로 향후 연구에서는 시스템 경계를 수소의 생산, 수송, 저장, 운송을 포함하는 전과정으로 확장하여 종합적인 분석이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 향후 연구에서는 전기버스의 전력 공급원이 신재생에너지로 전환되는 시나리오, 인프라를 고려한 수소버스와의 비교, 원료 채취부터 제조, 사용 및 폐기에 이르는 전과정평가(LCA)를 포함한 통합 분석을 통해 고도화된 교통 부문 탄소중립 전략 수립에 기여할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2024-00417444).

References

1. International Energy Agency (IEA), "Empowering Urban Energy Transitions", International Energy Agency, France, 2024, Retrieved from https://www.iea.org.
2. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), "Strategy for Advancing to Next Level Hydrogen Cities (Hydrogen City 2.0)", MOLIT, Korea, 2024, Retrieved from https://image.starrich.co.kr.
3. S. J. Jang, D. W. Jung, J. Y. Kim, Y. W. Hwang, and H. K. An, "An evaluation of net-zero contribution by introducing clean hydrogen production using life cycle assessment", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 2, 2024, pp. 175-184, doi: https://doi.org/10.7316/jhne.2024.35.2.175.
4. R. Kothari, D. Buddhi, and R. L. Sawhney, "Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 12, No. 2, 2008, pp. 553-563, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.012.
5. I. Dincer and C. Acar, "Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 40, No. 34, 2015, pp. 11094-11111, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035.
6. J. R. Han, J. Park, Y. Kim, Y. C. Lee, and H. S. Kim, "Analysis of CO_2 emission depending on hydrogen production methods in Korea", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 23, No. 2, 2019, pp. 1-8, doi: https://doi.org/10.7842/kigas.2019.23.2.1.
7. S. J. Jang, R. S. Park, Y. H. Choi, and Y. W. Hwang, "An Evaluation of net-zero contribution regarding hydrogen energy conversion in urban building and transport sector", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 2, 2023, pp. 100-112, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.2.100.
8. K. Shin, J. Y. Lee, C. K. Lee, J. H. Ryu, B. K. Kim, and K. H. Kim, "Evaluation of the contribution to carbon neutrality from the introduction of hydrogen trains by hydrogen production methods", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 28, No. 3, 2025, pp. 226-240, doi: https://doi.org/10.7782/JKSR.2025.28.3.226.
9. M. Kim, E. Yoo, and H. H. Song, "Well-to-wheel greenhouse gas emissions analysis of hydrogen fuel cell vehicle - hydrogen produced by naphtha cracking", Transactions of the Korean

Society of Automotive Engineers, Vol. 25, No. 2, 2017, pp. 157-166, doi: https://doi.org/10.7467/KSAE.2017.25.2.157.
10. A. Lubecki, J. Szczurowski, and K. Zaręska, "A comparative environmental Life Cycle Assessment study of hydrogen fuel, electricity and diesel fuel for public buses", Applied Energy, Vol. 350, 2023, pp. 121766, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121766.
11. W. Choi, "Life cycle greenhouse gas reductions according to sectors using green hydrogen: comparison of transportation sector and other sectors", Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 30, No. 10, pp. 793-799, doi: https://doi.org/10.7467/KSAE.2022.30.10.793.
12. J. S. Lee and J. H. Ryu, "Hydrogen fuel-cell/battery hybrid train", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 22, No. 1, 2019, pp. 19-26, doi: https://doi.org/10.7782/JKSR.2019.22.1.19.
13. E. K. Chae, D. H. Shin, and K. W. Lee, "Preliminary hazard analysis of hydrogen fuel cell hybrid train", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 23, No. 1, 2020, pp. 1-9, doi: https://doi.org/10.7782/JKSR.2020.23.1.1.
14. Korea Railroad Research Institute (KRRI), "Final report on planning for urban-friendly green mobility hydrogen electric tram demonstration project", KRRI, Korea, 2023, Retrieved from https://www.codil.or.kr/viewDtlConRpt.do?gubun=rpt&pMetaCode=OTKCRK230764.
15. Ministry of Environment (MoE), "Guidelines for reporting and verification of emission levels of greenhouse gas emission allowance trading [the attached Table 6]", MoE, Korea, 2014, Retrieved from https://www.law.go.kr.
16. Ministry of Trade, Industry and Energy (MoTIE), "Enforcement rule of the energy act [the attached Table]", MoTIE, Korea, 2022, Retrieved from https://www.law.go.kr.
17. Korea Development Institute (KDI), "Feasibility reassessment report for Ulsan Urban Railway Line-1 Project", KDI, Korea, 2023, Retrieved from https://www.kdi.re.kr/research/reportView?pub_no=18122.
18. Chungnam Research Institute (CNI), "An economic impact assessment of CNG bus introduction in Chungnam Province", CNI, Korea, 2017, Retrieved from https://www.cni.re.kr.
19. A. S. Al-Ogaili, A. Ramasamy, T. J. T. Hashim, A. N. Al-Masri, Y. Hoon, M. N. Jebur, R. Verayiah, and M. Marsadek, "Estimation of the energy consumption of battery driven electric buses by integrating digital elevation and longitudinal dynamic models: malaysia as a case study", Applied Energy, Vol. 280, 2020, pp. 115873, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115873.
20. Y. Seo, S. Kwon, and E. Kang, "A study on energy consumption rate measurement and calculation procedures of domestic CNG gaseous fueled vehicle", Journal of the Institute of Convergence Technology, Vol. 3, No. 2, 2013, pp. 57-60, doi: https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=JAKO201313164522027&oCn=JAKO201313164522027&dbt=JAKO&journal=NJOU00576567.
21. National Greenhouse Gas Inventory Center, "Approved national greenhouse gas emission factors 2024: Electricity emission factors", National Greenhouse Gas Inventory Center, Korea, 2024, Retrieved from https://www.gir.go.kr.