Check for updates

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 5, 2025, pp. 562~568
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.5.562

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

철도 차량 연료별 에너지 효율 및 온실가스 배출량 비교: 전기, 디젤, 수소의 분석

홍성광[1] · 최원재[2†] · 최재헌[3†]

[1]한국철도기술연구원 철도차량본부, [2]이화여자대학교 휴먼기계바이오공학부, [3]인천대학교 안전공학과

Comparative Study on the Energy Efficiency and Greenhouse Gas (GHG) Emissions of Railway Fuels: Electricity, Diesel, and Hydrogen

SEONG KWANG HONG[1], WONJAE CHOI[2†], JAEHEON CHOE[3†]

[1]Rail Vehicle Division, Korea Railroad Research Institute. Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 16105, Korea
[2]Department of Mechanical and Biomedical Engineering, Ewha Womans University. 52, Ewhayeodae-gil, Seodaemun-gu, Seoul 03760, Korea
[3]Department of Safety Engineering, Incheon National University. 119, Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Korea

†Corresponding author :
wj_choi@ewha.ac.kr
jhc@inu.ac.kr

Received 13 October, 2025
Revised 20 October, 2025
Accepted 20 October, 2025

Abstract >> This study analyzes energy efficiency and greenhouse gas (GHG) emissions of railway vehicles in Korea. National statistical data were used to quantify well-to-wheel (WTW) GHG emissions for electric-, diesel-, and hydrogen-powered trains. Total emissions were found to decrease from diesel to electric to hydrogen. Although emissions from hydrogen train depend on production pathways and import scenarios, life cycle assessment indicates substantial reductions relative to conventional fuels. These findings suggest that hydrogen railway vehicles can accelerate rail decarbonization in Korea and provide evidence to inform fuel-switching strategies and low-carbon policy.

Key words : Energy efficiency(에너지 효율), Greenhouse gas emission(온실가스 배출), Well-to-wheel(웰투휠), Railway vehicle(철도 차량), Hydrogen train(수소 열차)

1. 서 론

철도 교통은 높은 수송 효율성과 대량 운송 능력으로 인해 도로 및 항공 교통 대비 에너지 소비와 온실가스 배출 측면에서 상대적으로 유리한 교통수단으로 알려져 있다. 그러나 자동차의 연비나 전비처럼 직관적으로 에너지 효율을 비교할 수 있는 정량적 지표가 철도에는 부재하며, 현재 전기・디젤・수소 등 다양한 연료 체계가 공존하고 있어 연료별 효율이나 환경에 미치는 영향을 명확히 비교하기 어렵다. 특히 전기철도의 경우 변전소에서 전차선을 통해 다수의 열차에 전력이 동시에 공급되기 때문에 특정 열차 한 대의 전력 소비를 정확히 산출하기가 쉽지 않다. 이를 보완하기 위해 차량에 전력계를 탑재하여

소비량을 직접 계측하는 방법이 있으나, 국내에서는 일반적으로 활용되지 않고 있다.

한편, EU는 국가 간 철도 운행이 빈번하다는 특성상 운영사 간 전력 사용량을 명확히 구분할 필요성이 크다. 이에 따라 차량 탑재형 에너지 계량 시스템(Energy Measurement System, EMS)의 도입을 권고하고 있으며, 유럽 표준 규격 EN 50463에 따라 소비 전력을 계측하여 정확한 견인 에너지 계량과 정산을 시행하고 있다. 이와 같은 제도는 국경 간 운행에서 공정한 정산을 가능하게 할 뿐 아니라, 에너지 효율 개선 및 온실가스 감축을 위한 연구 자료로 활용할 수 있다.

국내의 경우 한국철도공사에서 발간하는 철도통계연보를 통해 지역 간 철도, 도시철도, 광역철도의 노선 및 구간별 총 전력 사용량이 공개되고 있으나, 차종별·편성별·수송 단위(승객 수, 화물 톤수)를 고려한 정량적 비교 연구는 미비하다. 이러한 상황에서 철도의 연료 효율과 온실가스 배출 특성을 정확히 파악하기 위해서는 이러한 데이터에 대해서 세분화하고 체계적인 분석이 필요하다.

현재 한국 정부는 2050 장기 저탄소 발전전략에 대응하여 국가 온실가스 총배출량의 약 14%를 차지하는 수송 부문에서 석유 연료 기반 체계를 수소 등 저탄소 청정에너지 기반으로 전환하기 위해 다양한 노력을 하고 있다[1]. 철도는 대표적인 저탄소 교통수단으로 알려져 있으나, 여전히 전체 철도 에너지 소비의 약 17.9%가 디젤 연료에 의존하고 있으며, 이는 온실가스 배출량으로 환산하면 약 10.6%에 해당한다[2]. 또한, 비전철화 구간 운행이 불가피하고, 기존 디젤 열차를 대체할 수 있는 철도 시스템의 기술 부재로 인해 노후 디젤 동차 및 기관차를 운행할 수 밖에 없는 실정이다. 이에 따라 최근 국내에서는 수소 전기트램, 수소 하이브리드 추진 시스템, 액화수소 기관차 등 다양한 수소 철도 관련 기술 개발과 상용화를 위한 실증이 활발히 진행되고 있다[3].

이러한 기술 개발에 앞서, 기존의 전기 및 디젤 기반 철도 시스템과 향후 도입될 수소 기반 철도 차량이 에너지 효율과 온실가스 저감 측면에서 어떠한 효과를 나타낼 수 있는지를 검증하는 것은 매우 중요하다. 지금까지의 선행 연구는 주로 연료 생산 과정에서 발생하는 온실가스의 전과정 분석(LCA, Life Cycle Assessment)에 집중되어 왔으나[4-6], 이렇게 생산된 연료가 실제 철도 차량 운행에 사용되면서 발생하는 전과정적 온실가스 배출량 비교 연구는 미흡하다.

따라서 본 연구에서는 국내 지역 간 철도에서 운행 중인 주요 차량을 대상으로 통계자료를 분석하여 전비 및 연비 비교 기준을 마련하고, 차량 및 연료별 온실가스 배출량을 정량적으로 비교·분석하고자 한다. 또한 향후 도입이 예상되는 수소 철도 차량에 대해 국내외 공개 자료를 활용해 연비를 예측하고, 전과정적 온실가스 배출량을 평가함으로써 수소 철도의 환경적 효과를 정량적으로 제시하고자 한다. 본 연구의 결과는 향후 철도 부문에서 저탄소·친환경 연료 전환 전략을 수립하는 데 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 전비/연비 분석

철도 차량별 전비 및 연비는 국내외 통계자료와 보고서 및 논문 등을 활용하여 계산하였다.

2.1 국내 철도

고속선(KTX, SRT)의 경우 일반 노선과 별도로 전력을 공급받고 있기 때문에 국토교통부와 한국철도공사가 공동 발행하는 「철도통계연보」와 「한국철도통계」에 제시된 노선별 전력 사용량을 활용하여 계산하였다[7,8]. 다만, 전력 사용량 통계에서는 KTX-1과 KTX-산천이 각각 구분되어 있지 않기 때문에, 계산에 사용한 차량 하중과 좌석 수는 일일 운행되는 편성 수를 고려하여 추정하였다. 고속선 외의 노선에 대해서는 철도 전력 공급 방식의 특성상 일반선과 화물선의 전력 사용량이 통합 집계되고 있었고, 디젤 차량의 경우 노선별 차종, 편성 수, 수송 대상이 구분되지 않아 별도로 운영사로부터 직접 입수한 자료를 활용하였다. 이로부터 고속철도인 KTX, KTX-산천, 일반철도인 ITX-새마을, 무궁화호(전기, 디젤)에 대

해서 연료 효율 분석을 수행하였다[9].

연간 열차 운행거리와 전력/연료 소모량으로부터 계산된 km당 소모 전력량(kWh/km)을 기준으로, 연간 열차 운행거리, 차량 하중, 좌석 수 등을 고려하여 열차 하중(ton)당 전비, 좌석당 전비 등을 함께 산정하였다. 철도 차종별 정보와 전비 및 연비 분석 결과는 Table 1에 정리하였다.

KTX(avg.)는 「철도통계연보」를 기반으로 산출된 KTX-1과 KTX-산천을 모두 포함한 평균값을 의미한다. 전비(단위 거리당 소모 전력량)는 24.39 kWh/km로, 운영사로부터 제공받은 별도의 자료로 추정한 KTX-1의 전비(23.74 kWh/km)와 유사하였으며, KTX-산천의 전비(18.69 kWh/km)보다 전력 소모량이 높은 것으로 나타났다. 이는 하중 차이와 후기 모델인 KTX-산천에서의 경량화 및 회생제동 등의 성능 개선에 기인한 결과로 해석된다. 또한 KTX-1과 KTX-산천의 평일 기준 일일 운행 횟수 비율이 약 6:4임을 고려하여, 환산 차량 하중(582 t)과 좌석 수(718석)를 반영한 차량 하중당 전비, 좌석당 전비, 그리고 차량 하중 및 좌석당 전비를 각각 산출하였다.

SRT의 경우 한가지 차종(KTX-산천)으로 운영하고 있으며, 전력 사용량이 구간별로 공개되어 있다. 단위 거리당 소모 전력량은 18.06 kWh/km로 운영사 자료로 추정한 KTX-산천의 전비와 거의 유사한 것을 확인할 수 있었다.

마찬가지로 운행 최고속도가 150 km/h로 동일한 ITX-새마을, 무궁화호(전기)에 대해서도 전비 분석을 수행하였다. 무궁화호(전기)의 경우 운행 노선과 시간대별로 편성 수의 차이가 존재하나, 객차 수를 5량 기준으로 환산하였다. 전비 계산 결과 ITX-새마을이 6.55 kWh/km, 무궁화호가 16.37 kWh/km이며, 차량 하중과 좌석 수를 고려하더라도 ITX-새마을이 월등하게 높은 전비 성능을 보여줬다. 또한 디젤 연료를 사용하는 무궁화호(디젤)의 연비(단위 거리당 소모 연료량)는 3.21 *l*/km로 정도로, 무궁화호(전기)와 마찬가지로 5량 객차를 기준으로 연비를 산출하였다.

2.2 국외 철도

유럽과 일본의 철도 차종별 전비 및 연비에 대한 분석도 수행하였다. 영국, 프랑스, 일본의 일부 차종에 대한 전비, 차량 하중당 전비, 좌석당 전비, 차량 하중 및 좌석당 전비를 산출하여 Table 2에 정리하였다. 디젤 열차의 경우 유럽 통계를 기반으로 산출된 표준값을 활용하였다[10,11].

앞서 도출한 국내 차종별 전비 산출 결과(Table 1)와 비교해 본 결과, 국외 차종 역시 국내와 마찬가지로 차량 하중당 전비가 대체로 40±10 Wh/(km・t)

Table 1. Comparison of energy efficiency of domestic railway vehicles in Korea

Train (Electric)	Vehicle mass (t)	Seats	Speed (km/h)	Energy efficiency				Source
				kWh/km	Wh/(km・t)	Wh/(seat-km)	Wh/(seat-km・t)	
KTX(avg.)	582	718	300	24.39	41.90	33.96	0.0584	3, 4
SRT (KTX-Sancheon)	406	410	300	18.06	44.49	44.06	0.1085	
KTX-1	701	955	300	23.74	33.87	24.86	0.0355	5
KTX-Sancheon	403	363	300	18.69	46.38	51.49	0.1278	
ITX-Saemaeul	267	376	150	6.55	24.53	17.42	0.0652	
Mugunghwa-ho (Electric)	341	360	150	16.37	48.01	45.47	0.1334	
Train (Diesel)	Vehicle mass (t)	Seats	Speed (km/h)	*l*/km	*l*/(km・t)	*l*/(seat-km)	*l*/(seat-km・t)	Source
Mugunghwa-ho (Diesel)	347	360	150	3.21	9.25×10^{-3}	8.92×10^{-3}	2.57×10^{-5}	5

Table 2. Comparison of energy efficiency of overseas railway vehicles

Train (Electric)	Vehicle mass (t)	Seats	Speed (km/h)	Energy efficiency				Source
				kWh/km	Wh/(km · t)	Wh/(seat-km)	Wh/(seat-km · t)	
UK Class 373 Eurostar	752	750	300	30.75	40.89	41.00	0.0545	6
UK Class 91 InterCity 225	476	536	200	18.76	39.41	35.00	0.0735	
France TGV Duplex	380	545	300	20.17	53.07	37.00	0.0974	
Japan Tokaido N700	715	1323	300	30.43	42.56	23.00	0.0322	
Train (Diesel)	Vehicle mass (t)	Seats	Speed (km/h)	*l*/km	*l*/(km · t)	*l*/(seat-km)	*l*/(seat-km · t)	Source
Intercity or regional	330	330	85	2.50	7.56×10^{-3}	7.56×10^{-3}	2.29×10^{-5}	7

범위에 분포하는 것으로 나타났다. 또한 좌석당 전비와 차량 하중 및 좌석당 전비 역시 차종에 관계없이 유사한 수준을 보였다. 한편, 디젤 열차의 경우 유럽 차종은 제원상 무궁화호(디젤)와 유사함에도 불구하고 연료 소모가 더 적은 것으로 확인되었는데, 이는 운행 속도 차이에 따른 결과로 해석된다.

3. 온실가스 배출량 분석

3.1 차량 계산 모델

철도 연료별 에너지 효율 계산을 위해 전기 및 디젤 연료의 경우에는 Table 1과 Table 2에 제시된 산출 결과를 활용하였다. 수소 열차의 경우 실제 운행 차량에 대한 정보가 불확실하므로, 전기철도 차량의 산출 결과를 적용하여 필요 전력 소모량이 탑재된 수소 연료전지와 배터리로부터 전부 공급된다고 가정하였다. 이때 수소 연료전지는 양성자 교환막 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)의 일반적 효율인 50%를 적용하였으며, 수소 연료가 이 효율로 전기에너지로 변환되는 것으로 전제하였다. 한편 수소연료전지 기관차는 기존 전기기관차에서 필요했던 주변압기 등 고전압 장치가 불필요하며, 연료전지와 배터리의 용량도 차량 용도와 요구 주행거리에 따라 달라질 수 있다. 이에 본 연구에서는 연료전지 시스템 탑재로 인한 하중 증가는 분석 대상에서 제외하였다.

3.2 연료별 온실가스 배출량

철도 차량의 연료별 온실가스 배출량을 분석하기 위하여 연구진의 기존 연구에서 분석한 디젤, 전기, 수소의 well-to-wheel 온실가스 배출량 데이터를 활용하였다. 동일한 에너지량을 생산하기 위하여 연료의 전과정에서 발생하는 온실가스 배출량은 아래와 같다. 전기는 한국 평균 전기값을 사용하였으며, 수소의 경우 생산지, 생산방법, 수입방식에 따라서 다양한 값을 가지므로, 각 경우에 대한 결과를 함께 표시하였다. 참고로, 기존의 연구를 참고하여 주요 수입국이자 온실가스 배출량이 비교적 낮은 것으로 분석된 UAE에서 암모니아 형태로 수입하는 경우에 대한 데이터를 활용하였다. 블루수소는 천연가스 개질 후 탄소포집을 한 경우를, 그린수소는 재생전력 수전해의 경우를, 옐로수소는 원전 수전해의 경우를 의미한다. Well-to-wheel 분석의 범위는 연료에 대한 전과정(cradle-to-grave)만을 다루며, 관련된 인프라 및 장비 건설에서 배출되는 것은 제외하였다. 온실가스로는 대표 3종(CO_2, CH_4, N_2O)를 활용하였고, global warming potential(GWP) 계산에는 IPCC AR6 값인 1(CO_2), 29.8(CH_4), 273(N_2O)를 활용하였다[12]. 순발열량은 에너지법 시행규칙 [별표] (개정 2022.11.21.) ‘에너지열량 환산기준’에 제시된 값을 적용하였으며,

Table 3. Comparison of well-to-wheel greenhouse gas (GHG) emissions of diesel, electricity, and hydrogen

$g\text{-}CO_2\text{-}eq./MJ$		Well-to-Wheel GHG Emissions
Diesel[13]		86.2
Electricity[13,14]		133.3
Hydrogen[15]	Domestic Blue	37.5
	Domestic Green	1.0
	Domestic Yellow	3.25
	Imported Blue	56.2
	Imported Green	22.1
	Imported Yellow	25.2

디젤은 35.3 MJ/*l*, 수소는 120 MJ/kg을 활용하였다.

Table 3은 동일한 에너지량을 생산하기 위해서 배출되는 온실가스 배출량을 의미하였으므로, 이와 Table 1에서 분석한 철도차량의 에너지효율과 결합하여 분석하면 km, km・t, seat-km, seat-km・t 당 연료별 well-to-wheel 온실가스 배출량을 Fig. 1과 같이 계산할 수 있다. 참고로 수소 연료의 경우 전기철도 결과를 그대로 사용하되 효율 50%를 가정하고 계산하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 기존 연료(전기, 디젤) 차량의 온실가스 배출량

Fig. 1을 보면, 일반적으로 승객 1명을 1 km 이동시킬 때 배출되는 well-to-wheel 온실가스 배출량이 전기의 경우 8.4~24.7 $g\text{-}CO_2\text{-}eq./(seat\text{-}km)$로 계산되었다. 고속운전을 하는 KTX의 경우 비교적 그 배출

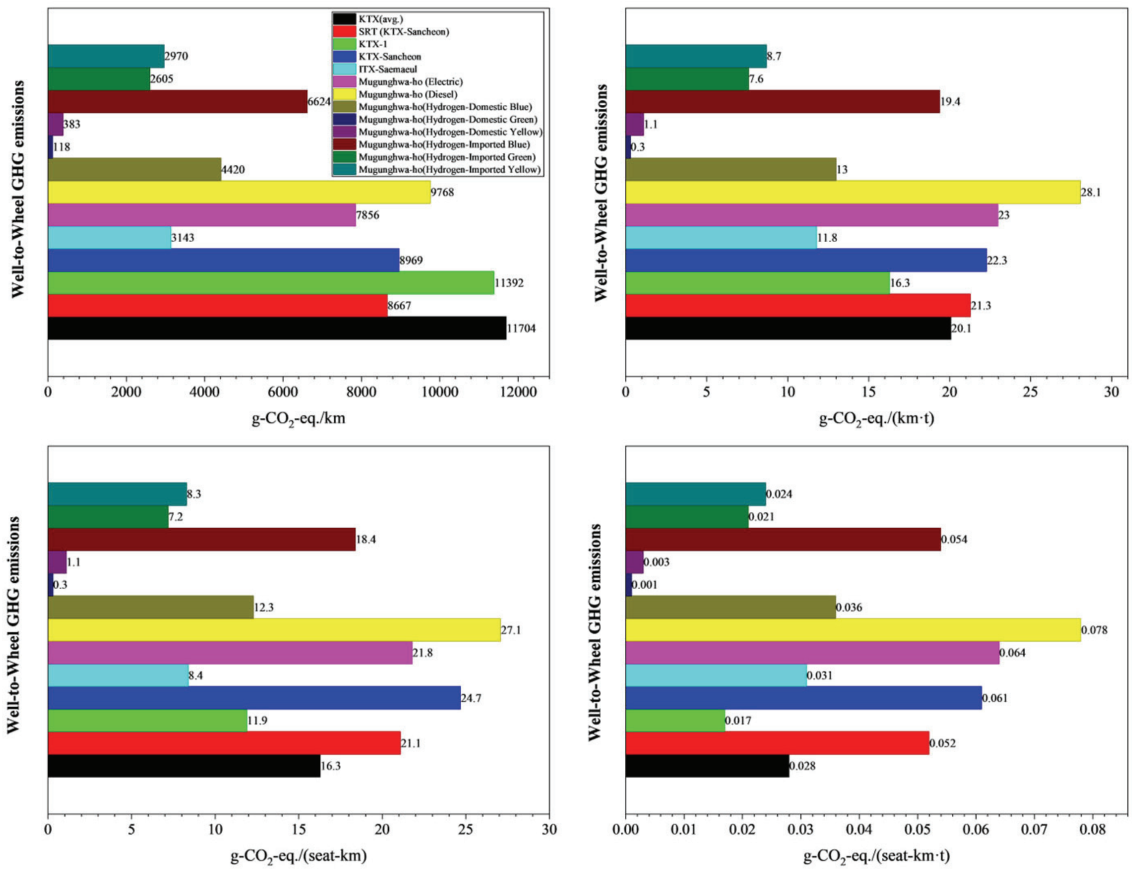

Fig. 1. Comparison of well-to-wheel greenhouse gas (GHG) emissions of domestic railway vehicles in Korea

량이 높았고, 상대적으로 저속운전을 하는 새마을호나 무궁화호는 배출량이 더 낮았다. 디젤연료로 운전되는 무궁화호와 전기로 운전되는 무궁화호를 비교하였을 때에 디젤연료로 운전되는 경우가 온실가스 배출량이 더 높았다. Table 3에서 MJ 당 온실가스 배출량이 디젤이 더 낮았지만, 디젤의 경우는 MJ이 열에너지를 의미하고, 전기의 경우 MJ이 전기에너지를 의미하므로, 열에너지를 전기에너지로 변환하는 과정에서의 효율을 고려하면 seat-km당 온실가스 배출량 결과는 역전되는 것을 볼 수 있었다. 이러한 점을 볼 때에 비전동화 및 노후화된 디젤 열차의 대체가 필요함을 알 수 있었다. 참고로 자동차 승용차량의 경우 well-to-wheel 온실가스 배출량이 2023년 우리나라 평균 전기차의 경우~130 g-CO_2-eq./km인 것을 고려한다면, 철도 차량의 승객당 전과정적 온실가스 배출량은 승용차량에 비해서 크게 낮은 것도 알 수 있었다[15].

4.2 수소 연료 차량의 온실가스 배출량

동일한 무궁화호를 대상으로 비교한 결과, 수소 연료 철도 차량의 well-to-wheel 온실가스 배출량은 수소의 생산방법과 수입 여부에 따라 0.3~18.4 g-CO_2-eq./(seat-km)로 산정되었다. 이는 동일한 무궁화호 전기, 디젤 차량 대비 더 낮은 수준으로, 특히 수입 블루수소를 활용하는 경우에도 기존의 전기 대비 3.4 g-CO_2-eq./(seat-km), 디젤 대비 8.7 g-CO_2-eq./ (seat-km)의 온실가스 감축 효과를 확인할 수 있었다. 따라서 철도 부문에서 수소 열차의 도입은 온실가스 저감 측면에서 매우 의미있는 결과를 제시하며, 향후 국내 그린수소 또는 옐로수소를 활용할 경우 온실가스 저감효과를 극대화할 수 있을 것으로 기대한다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내 지역 간 철도에서 운행 중인 주요 차량의 전비 및 연비, 차량 및 연료별 온실가스 배출량을 정량적으로 비교·분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1) 국내 최초로 디젤, 전기, 수소 연료 철도 차량의 well-to-wheel 온실가스 배출량을 분석하였고, 동일한 무궁화호를 기준으로 비교한 결과, 디젤, 전기, 수소 순으로 각각 27.1, 21.8, 0.3~18.4 g-CO_2-eq./(seat-km)의 온실가스 배출량이 산정되었다.
2) 수소 열차의 온실가스 배출량은 수소의 생산방식 및 수입 여부에 따라 크게 달라지지만, 일반적으로 기존 연료를 사용하는 철도 차량에 비해 온실가스 배출량을 현저히 감소시킬 수 있음을 확인하였다.
3) 이러한 결과는 향후 수소 철도 차량의 개발이 철도 부문의 온실가스 감축에 매우 중요한 역할을 할 수 있음을 보여주며, 관련 정책 수립 및 전략적 의사결정에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 기본사업(철도 신산업 창출을 위한 핵심기술 개발, PK2504B2)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea (GIR), "National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea", Korea, 2023.
2. Korea Energy Agency, "2019 All Sectors Energy and GHG Emission Statistics", Korea, 2019, Retrieved from https://www.energy.or.kr/front/board/View9.do?boardMngNo=9&boardNo=22051.
3. H. Lee, D. Oh, and Y. Seo, "Prediction of deformation and safety of type IV hydrogen tank for hydrogen fuel cell railway according to internal pressure using FEA", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 3, 2025, pp. 207-212, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.3.207.
4. J. Ahn, C. Kim, and W. Choi, "Life cycle greenhouse gas emissions of passenger cars in South Korea: focusing on the

Hyundai KONA and NEXO", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 4, 2025, pp. 440-447, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.4.440.

5. H. J. Kim, J. T. Lee, Y. S. Lim, C. W. Yun, J. H. Keel, and Y. D. Hong, "A study on greenhouse gas emission characteristics of passenger car and van with LPG fuel according to displacement and vehicle weight", Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 29, No. 5, 2018, pp. 497-502, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.5.497.
6. Y. Lee, W. Shin, Y. Yu, and H. Song, "Life cycle analysis of greenhouse gas emissions of by-product hydrogen produced from coke oven gas in steel mill", Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 33, No. 6, 2022, pp. 636-642, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.6.636.
7. Korail, "Statistical Yearbook of Railroad", Korea, 2023, Retrieved from https://www.kric.go.kr/KricFileDownload.do?file=M0103072041.
8. Korail, "Korea Railway Statistics", Korea, 2024, Retrieved from https://www.kric.go.kr/KricFileDownload.do?file=M0103072061.
9. Korail, Internal report of Korail, Korea, 2016.
10. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, "Comparison of Passenger Rail Energy Consumption with Competing Modes", The National Academies Press, 2015, pp. 14-41, doi: https://doi.org/10.17226/22083.
11. TOSCA (Technology Opportunities and Strategies toward Climate-friendly trAnsport), "Rail passenger transport", European project FP7-TPT-2008-RTD-1. Deliverable D4, WP3 report No 1, 2011, pp. 1-43.
12. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "Sixth assessment report", IPCC, 2023, Retrieved from https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6.
13. W. Choi, E. Yoo, E. Seol, M. Kim, and H. H. Song, "Greenhouse gas emissions of conversional and alternative vehicles: Predictions based on energy policy analysis in South Korea", Applied Energy, Vol. 265, 2020, pp. 114754, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114754.
14. Korea Electric Power Corporation, "Statistics of electric power in Korea", Korea, 2024, Korea Power Exchange (KPX), "Power generation amount by source", Open Government Data Portal, 2024, Retrieved from https://www.data.go.kr/data/15081098/fileData.do?recommend%20DataYn=Y.
15. G. Kwak, Y. Jung, and W. Choi, "Life cycle greenhouse gas emissions of hydrogen imported by maritime transportation: A South Korean case study", Energy Conversion and Management: X, Vol. 26, 2025, pp. 100887, doi: https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100887.