Check for updates

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 6, 2025, pp. 699~707
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.6.699

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

국내외 LCI DB를 적용한 수소 튜브트레일러의 탄소배출량 산정에 관한 연구

강병주 · 이병현 · 송유근 · 곽인호†

(주)엔디렉션

A Study on the Carbon Emissions of Hydrogen Tube Trailers Applying the Domestic and International LCI DB

BYOUNGJU KANG, BYEONGHYUN LEE, YUGEUN SONG, INHO KWAK†

ENDIRECTION, #402,552 Eonju-ro, Gangnam-gu, Seoul, Korea

†Corresponding author :
inho@endi.kr

Received 16 October, 2025
Revised 14 November, 2025
Accepted 17 November, 2025

Abstract >> This study quantified the carbon emissions of domestically supplied hydrogen tube trailers by applying high-pressure vessel design equations for cylinders and utilizing domestic and international Life Cycle Inventory (LCI) databases. The assessment covered the entire life cycle from raw material acquisition to the manufacturing of storage tubes. In addition, the embodied carbon of hydrogen tube trailers and a transport scenario analysis within the Ulsan region were carried out based on the calculated results. The carbon emissions intensity values proposed in this study are expected to serve as fundamental data for estimating potential greenhouse gas emissions associated with the construction of new hydrogen cities or the future deployment of hydrogen tube trailers.

Key words : Hydrogen Tube Trailer(수소튜브트레일러), Life Cycle Assessment(전과정평가), Carbon Emissions(탄소배출량), LCI(전과정목록), Embodied Carbon(내재탄소)

1. 서 론

전 세계적인 탄소중립 요구 속에서 수소는 대표적인 대체 에너지원으로 주목받고 있다. 수소는 사용 과정에서 대기오염물질이나 온실가스를 직접 배출하지 않으며, 다양한 저탄소 에너지원으로부터 생산될 수 있다. 또한 기체·액체 등 여러 형태로 운반·저장이 가능하고, 발전, 모빌리티 연료, 석유화학·철강 등 다양한 산업 분야에서 원료 및 에너지원으로 활용될 수 있다는 점에서 높은 활용 잠재력을 지니고 있다[1].

현재 전 세계적으로 200건이 넘는 저탄소 수소 생산 프로젝트가 추진 중이며, 이에 따라 2030년까지 저탄소 수소 생산량은 연간 최대 3,700만 톤에 이를 것으로 전망된다[2]. 이에 따라 주요국은 수소경제 전환을 위한 로드맵을 수립하고 있다. EU는 수소 전략 3단계를 통해 저탄소 수소 상용화를 위한 다양한 인프라 투자 및 개발 계획을 수립하였으며, 일본은 수소기본전략을 통해 인프라 투자, 분야별 규격 표준화 정

책을 추진하여, 수요 창출 및 가격 저감을 도모할 계획이다. 또한, 미국은 민관 협력체를 중심으로 FCEV 상용화 촉진 및 충전 인프라 확대를 추진하고 있다[3].

우리나라도 이러한 국제적 흐름에 발맞추어 「수소경제 활성화 로드맵」을 발표하였다. 이 로드맵은 2040년까지 수소충전소 1,200개소 등 수소 인프라를 구축하고, 이를 통한 수소 산업 생태계 조성을 주요 전략으로 제시하고 있다[4]. 이러한 전략을 효과적으로 실행하기 위해서는 수소의 생산에서 최종 소비에 이르는 공급망 전반을 체계적으로 이해하고 관리해야 하며, 전과정에 걸친 탄소배출량 산정이 요구된다.

수소 공급망은 원료 공급, 생산, 저장, 환적, 운송, 전환 및 재전환, 소비의 7개 부문으로 구성된다. 이 중에서도 저장·환적·운송 단계는 막대한 인프라 구축 비용과 기존 시설의 용량 제약으로 인해 수소 생태계 확산의 주요 걸림돌로 지적되고 있다[5]. 향후 수소 인프라 확대에 따라 이러한 저장·운송 시설의 신규 구축과 운영 규모는 더욱 증가할 것으로 예상된다[6]. 그러나 수소 인프라의 물리적 확장은 대규모 자원 소비와 온실가스 배출 증가를 수반할 수 있으므로, 이러한 시설의 전과정에서 발생하는 탄소배출을 정량적으로 평가할 수 있는 체계적 접근이 필요하다.

본 연구는 수소 저장·운송 인프라의 필수 요소인 수소 튜브트레일러를 대상으로 국내외 LCI DB (Life Cycle Inventory DB, 전과정목록)를 활용하여 탄소배출량을 정량화하고, 국내 공급된 수소 튜브트레일러를 대상으로 제작과정에서 발생한 내재탄소(Embodied Carbon)를 정량화하였다. 아울러, 특정 지역 내 운송 시나리오를 설정하여 수소 튜브트레일러 제작에서 수소 운송에 이르는 전 과정에 대한 탄소배출량을 산정하고 그 결과를 제시하였다.

2. 연구방법

2.1 전과정 평가(LCA)

전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)는 ISO 14040 및 ISO 14044에서 정하는 제품이나 서비스의 전과정에서 발생하는 환경영향을 정량화하고 평가하는 방법이다[7,8].

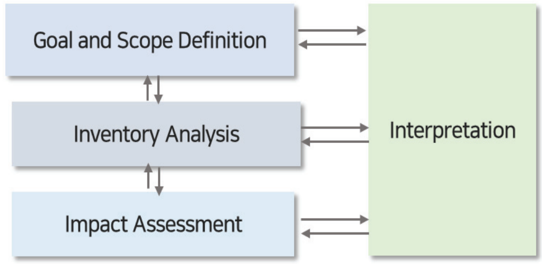

Fig. 1. LCA Framework

LCA의 수행방법은 Fig. 1과 같이 4단계의 절차를 통해 수행된다. 첫째, 목적 및 범위 정의(Goal and Scope Definition)단계에서는 연구의 목적, 분석 대상, 기능단위, 시스템 경계, 가정과 제약조건을 명확히 설정한다. 둘째, 목록분석(Inventory Analysis)단계에서는 투입되는 원자재, 에너지, 배출가스 등 모든 자원·환경 흐름 데이터를 수집한다. 셋째, 영향평가(Impact Assessment)단계에서는 목록분석에서 도출된 자원 사용 및 배출 항목을 각 환경영향 범주(예: 기후변화, 산성화 등)와 연결시킨 뒤, 특성화 계수를 적용하여 정량화한다. 넷째, 결과해석(Interpretation)단계에서는 각 단계의 결과를 종합하여 연구의 목적에 부합하는 결론을 도출하고, 정책적·기술적 시사점을 제시한다.

2.2 선행연구

수소 튜브트레일러는 고압의 수소를 저장한 후 이를 운송하는 복합 시스템이지만, 차량 섀시(Chassis)나 운송 플랫폼 자체는 일반 화물 운송 시스템과 구조적·기능적으로 큰 차이가 없다. 반면, 고압 수소를 저장·관리하는 다본(多本) 구조의 저장튜브는 수소 튜브트레일러의 기능적 차별성을 규정짓는 핵심 구성요소이자, 시스템 내 주요 환경부하 기여 요인으로 평가된다. 이에 본 연구에서는 수소 운송 시스템의 환경영향을 결정짓는 핵심 요소인 저장탱크 단계에 초점을 두고, 관련 전과정평가(LCA) 선행연구를 검토

Table 1. Summary of Previous Studies

Reference	Type of tank	System Boundary	Functional unit	Result
Linghe Ye, Lin Lu (2023)	Type III and Type IV high pressure vessel, Cryogenic vessel	Manufacture and Utilization (materials and energy consumption)	Capacity of 7.2 kg	• Cryogenic vessel: Highest emissions (≈135,000 $kgCO_2eq$), 98% from storage process. • Type 3: ≈7,219 $kgCO_2eq$ (13% from storage process). • Type 4: ≈5,539 $kgCO_2eq$ (16% from storage process). • Carbon fiber production accounts for >80% of manufacturing emissions.
M.S. Saharudin et al. (2025)	Type V (Carbon T-700/Epoxy, Kevlar/Epoxy, E-Glass Fiber/Epoxy, Basalt/Epoxy)	Cradle to Use (End-of-life scenarios are presented separately)	Storing 11.93 g of hydrogen at 700 bar	• Carbon T-700/Epoxy: Best mechanical performance, but highest environmental impact • Basalt/Epoxy: Weaker mechanically, but most sustainable (low GWP) • Kevlar/Epoxy & E-Glass: Moderate-to-low performance, suited for lower pressure use
A. Kampker et al. (2024)	Type III and Type IV compressed gas tank, LH2 tanks, Cryo-compressed Hydrogen (CcH_2)	The raw and process material and ends with the actual production process	1 kg H_2	• The production of a finished Type IV CGH_2 storage system results in the highest emissions, whereas the LH_2 storage technology exhibits the lowest emissions
Agostini A. et al. (2018)	solid state hydride tank (SS), type III and Type IV compressed gas tank	Manufacturing and Use Phases	1 unit of the SSH2S APU	• APU systems with solid-state storage tanks show similar environmental performance to Type III and IV compressed gas systems

하였으며, 검토된 주요 내용을 Table 1에 정리하였다.

Ye와 Lu[9]는 ISO 14040 및 14044 표준에 따라 고압기체식(Type III·IV)과 극저온식(Cryogenic) 저장용기의 제조·운영단계에서 재료 및 에너지 투입을 분석하였다. EF 3.1 기반 기후변화 영향평가 결과, 극저온식 저장방식의 총 배출량은 약 135,000 $kgCO_2eq$로 가장 높게 나타났으며, 탄소섬유 생산이 전체 배출의 80% 이상을 차지하였다.

Saharudin 등[10]은 cradle-to-use 범위의 LCA를 수행하여 Type V 복합압력용기의 재질별(탄소섬유·케블라·바잘트 등) 환경영향을 비교하였고, 복합재의 기계적 성능과 환경성 간 상충관계(trade-off)를 제시하였다.

Kampker 등[11]은 DIN EN ISO 14040에 따른 Shortened LCA를 수행하여 Type III·IV 압축가스 저장, LH_2 및 Cryo-compressed 저장기술을 대상으로 원재료·가공 공정·제조단계를 비교하였다. 분석 결과, Type IV 압축탱크의 제작단계가 가장 높은 배출량을 유발하였으며, LH_2 저장기술이 상대적으로 낮은 환경부하를 보였다.

Agostini 등[12]은 GaBi 6.3과 Ecoinvent DB를 기반으로 FC-HyGuide를 적용하여, 연료전지 보조전원장치(APU)에 사용된 고체수소화물탱크와 Type III·IV 압축가스탱크를 비교하였다. 제조 및 사용단계를 포함한 비교 결과, 두 방식은 유사한 수준의 환경부하를 나타냈다.

이들 연구는 모두 ISO 14040 및 14044 표준을 준용하였으나, 사용된 데이터베이스(Ecoinvent, GaBi 등)와 영향평가 기법(EF 3.1, CML-IA 등)은 상이하다. 대부분의 연구는 저장탱크 제조 및 운영단계에 초점을 둔 형태로 수행되었으며, 이는 수소 공급망 전반(운송, 유지보수, 폐기 등)에 대한 실측 데이터 확보

가 어렵고 연구 목적이 주로 저장방식 간 비교분석에 집중되었기 때문이다.

이에 본 연구에서는 기존 연구의 전과정평가 접근틀을 유지하되, 국내 수소 튜브트레일러의 규격과 재료 특성, 및 한국환경산업기술원(KEITI)에서 2022년부터 구축하고 있는 최신 국가 LCI DB를 반영하여 수소 튜브트레일러 제조시 발생된 내재탄소에 집중하여 탄소배출량을 산출하고, 해당 결과를 활용한 시나리오 분석을 실시하였다.

3. 결 과

3.1 수소 튜브트레일러 저장모듈의 탄소배출량

3.1.1 목적 및 범위설정

본 연구의 목적은 수소도시 등에서 튜브트레일러를 구입·운영할 때 활용 가능한 탄소배출 원단위 제시하고, 현재 국내 공급된 수소 튜브트레일러의 내재탄소를 산정하고 활용하는데 있다. 본 연구의 목적, 범위, 기능단위 및 주요 가정사항은 Table 2에 요약하여 제시하였다.

수소 튜브트레일러 저장모듈에 대한 시스템 경계(System Boundary)는 원료 취득부터 제품의 제조단계까지로 설정하였다. 특히 분석의 핵심이 저장 기능에 있으므로, 제품의 제조단계는 수소 튜브트레일러의 주요 구성요소인 수소 저장모듈(실린더)의 제작단계를 중심으로 정의하였다. 이는 차체 및 기타 보조 구성품과 같이 저장기능과 직접적으로 관련되지 않는 요소로 인해 발생할 수 있는 변동성을 배제하고, 저장용기 자체의 환경부하를 명확하게 평가하기 위함이다. 또한 실린더를 지지하는 스키드(Skid) 등은 분석의 효율성과 일관성을 고려하여 평가 범위에서 제외하였다.

설정된 시스템 경계 내에서는 실린더 제조과정에서 발생하는 원재료 투입량, 공정 에너지 사용량, 그리고 울산 지역 내 수소 출하기지에서 각 충전소로 운송되는 과정(튜브트레일러 운영 시나리오)을 포함하여 단계별 탄소배출량을 정량적으로 산정하였다.

Table 2. Goal and Scope Definition

Category	Description
Goal	• Provide embodied carbon estimates for hydrogen tube trailers supplied in Korea and develop carbon emissions factors applicable to future procurement and operation.
Scope	• Assess carbon emissions associated with raw material acquisition, manufacturing
Functional Unit	• FU1: Emissions per single cylinder • FU2: Emissions per 1 kg of stored hydrogen
Limitations & Assumptions	• Skid frame and vehicle chassis are excluded from the assessment

Table 3. Specifications of hydrogen tube trailer in South Korea

Skid Length	Tube Q`ty	Working Pressure (bar)	Total Gas Capacity (H_2/m^3)
32ft	8	200	2,391
40ft	10	200	4,053

기능단위(Functional Unit)는 대표 규격 실린더 1본으로 설정하였으며, 저장설비 간 비교 및 효율적 해석을 위해 수소 저장용량 1 kg 기준의 결과도 함께 제시하였다.

이를 위해 국내 주요 공급기업 3社의 제품사양과 설계 도면을 검토하여, 국내 시장에서 주로 운영되는 수소 튜브트레일러의 국내 대표 규격 및 재료 정보를 확인하였다. 국내에서 제작·운영되는 수소 튜브트레일러는 스키드(Skid) 구조를 기반으로 차량 적재함 위에 설치된 강철 프레임에 다수의 실린더(Pressure Vessel)를 고정하여 모듈 형태로 운영하는 방식이다. 이러한 구조는 운반·적재의 안정성을 높이고, 실린더 교체 및 유지보수를 용이하게 하는 장점이 있다.

국내 수소 튜브트레일러의 기본적인 성능지표는 Table 3에 나타내었다. 국내에서 운영되는 수소 튜브트레일러 실린더의 대표 규격은 32 ft 및 40 ft 길이의 스키드 기반 트레일러로 각각 8본(32 ft)과 10본(40 ft)의 실린더를 장착하는 구조를 갖으며, 32 ft 모델의 총 저장용량은 약 2,391 m^3, 40 ft 모델은 약 4,053 m^3로 제시되어 있다[13-15]. 수소의 표준상태 밀

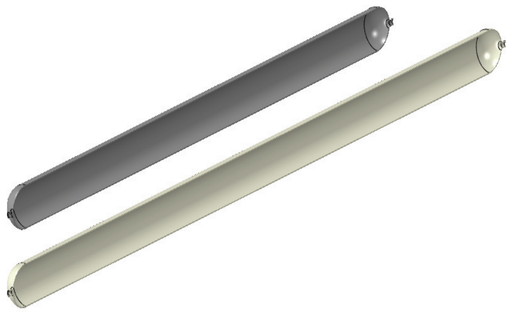

Fig. 2. Illustration of 32 ft & 40 ft Hydrogen Storage Vessel

Table 4. Calculation Results of Steel Consumption

Results	32 ft	40 ft
Material	SA372 (Applicable to STS 316)	
Density (ton/m^3)	7.85	
Volume (mm^3)	220,654,592	286,265,024
Weight (kg)	1,732	2,247

도(0.0899 kg/Nm³)를 적용하여 수소 튜브트레일러의 저장용량을 질량으로 환산한 결과, 32 ft 모델 약 215 kg, 40 ft 모델은 약 364 kg의 수소 저장용량을 가지는 것으로 분석되었다. 또한 현재 국내 시장에서 사용되는 실린더는 내압 설계기준에 따라 강재(steel)로 제작되며, 저장압력은 일반적으로 200 bar 수준에서 운영되고 있다[16].

3.1.2 목록분석

수소 튜브트레일러의 탄소배출량을 정량화하기 위해서 Table 3에 나타낸 국내 수소 튜브트레일러 일반 사양 자료와 KGS AC 212(2022)에 따라 규격에 맞게 실린더를 설계하여 적용하였으며, 생김새는 Fig 2와 같다.

실린더의 두께는 KGS AC 212(2022)기준에 따라, 제시된 식 (1)과 식 (2)를 적용하여 산정할 수 있으며[17], 본 연구에서는 식 (2)를 통하여 Table 4와 같이 각 모델의 구조적 제원을 적용하여 실린더의 실제 두께를 산정하였으며, 이 두께 값을 활용하여 사용된 강재의 중량을 계산하였다. 그 결과, 32 ft 모델의 중량은 약 1,732 kg, 40 ft 모델은 약 2,247 kg으로 산출되었다.

$$t = \frac{D}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{S-1.3P}{S+0.4P}}\right) \tag{1}$$

$$t = \frac{D}{2}\left(\sqrt{\frac{S+0.4P}{S-1.3P}} - 1\right) \tag{2}$$

where, t = Calculated thickness of cylindrical shell (mm)

P = Hydraulic test pressure (MPa)

D = Outside diameter (mm)

S = Allowable stress (N/mm^2)

= Yield strength x 5/6

실제 실린더의 재질은 SA372 강재가 일반적으로 적용되나, 스테인리스강(STS 316)으로 대체 적용이 가능하므로 국내 생산공정의 배출 특성을 반영하기 위해 한국환경산업기술원(KEITI)이 구축한 국가 LCI DB의 “Stainless steel cold rolled sheet (ILCD, EF 3.1)” 데이터를 활용하였다[18].

실린더 제조는 고압용기의 특성을 고려하여 심리스(Seamless) 방식으로 제조되므로 철강재를 압출하는 공정 DB인 Ecoinvent v3.11의 “impact extrusion of steel, cold, tempering, RoW” 공정 데이터를 참조하여 냉간압연강 1kg 압출 시 액화천연가스(LNG) 소비량 2.4598 MJ(약 0.04 kg)으로 정량화하여 적용였다[19]. 액화천연가스(LNG) 소비에 따른 환경영향은 국내 국가 LCI DB의 “Liquefied Natural Gas, Natural gas (ILCD, EF 3.1)” 데이터셋과 연계하여 국내 배출계수를 반영하였다[20].

3.1.3 탄소배출량 산출

본 연구의 영향평가(LCIA) 단계에서는 전과정목록분석(LCI) 결과를 바탕으로 EF 3.1 방법론을 적용하여 환경영향을 평가하였다. EF 3.1은 다수의 환경영향 범주에 대한 표준화된 특성화계수를 제공하며, 본 연구에서는 그중 Climate Change(기후변화) 범주를 활용하여 탄소배출량을 산정하였다. 또한, 모든 온실

Table 5. GHG emissions calculation results

Skid Length	Weight (kg)	GHG Emissions (Single cylinder) ($kgCO_2$-eq) [ⓐ]	Hydrogen Capacity (Single cylinder) (kg) [ⓑ]	Tube Q\`ty [ⓒ]	GHG Emissions Intensity ($kgCO_2$-eq/kgH_2) [ⓐ/ⓑ]	GHG Emissions (Tube trailer) ($kgCO_2$-eq) [ⓐxⓒ]
32ft	1,732	4,762.59	215	8	22.15	38,101
40ft	2,247	6,178.72	364	10	16.97	61,787

가스 배출량은 IPCC GWP 100년 기준으로 환산하여 이산화탄소 환산량($kgCO_2$-eq)으로 제시하였다.

실린더 1 본의 강재 사용량을 기준으로 탄소배출량을 산정하고, 수소 저장용량 기준으로 탄소배출 원단위를 비교하여 Table 5에 나타내었다. 산정 결과, 32 ft 실린더 1 본의 탄소배출량은 약 4,762.59 $kgCO_2$-eq, 40 ft 실린더 1 본의 탄소배출량은 약 6,178.72 $kgCO_2$-eq로 산정되었다.

이 결과를 기반으로 트레일러 1대 기준(32 ft: 8본, 40 ft: 10본)으로 총 배출량을 산정한 결과, 32 ft 트레일러는 약 38,101 $kgCO_2$-eq/대, 40 ft 트레일러는 약 61,787 $kgCO_2$-eq/대의 온실가스를 배출하는 것으로 나타났다.

이는 수소 튜브트레일러의 실린더 제조과정에서 발생하는 탄소배출량으로, 전체 트레일러 제조단계 중 저장 기능 수행 부문의 환경부하를 대표하는 수치라 할 수 있다.

3.2 국내 등록된 수소 튜브트레일러의 내재탄소 추정

한국수소연합이 운영하는 「수소경제종합정보포털」에 따르면, 2023년 12월 기준 국내에 등록된 수소 튜브트레일러는 총 861대이다[21]. 하지만 해당 데이터에서는 현재 통용되는 튜브트레일러 차량에 대해서 규격별 등록 차량의 숫자를 확인할 수 없기 때문에 본 연구에서는 등록된 모든 차량이 32 ft 규격으로 등록되었을 경우와 40 ft 규격으로 등록되었을 경우로 구분하여 Table 6과 같이 국내 등록된 수소 튜브트레일러에 대한 내재 탄소를 정량화하였다.

Table 6. Embodied carbon calculation results for 32 ft & 40 ft hydrogen tube trailers operating in South Korea

Parameters	32 ft	40 ft
Registered hydrogen tube trailer (unit) [ⓐ]	861	
GHG emissions[a)] ($kgCO_2$-eq) [ⓑ]	38,101	61,787
Embodied carbon ($tonCO_2$-eq) [ⓐxⓑ]	32,805	53,199
a) Refer to Table 4		

분석 결과 현재 국내에 공급된 수소 튜브트레일러의 내재 탄소는 최소 32,805 $tonCO_2$-eq～최대 53,199 $tonCO_2$-eq로 추정된다. 이는 수소 운송 인프라 확충 과정에서 수소 운반을 위한 튜브트레일러 제조시 이미 배출된 탄소의 누적 영향을 정량적으로 보여주는 결과이다.

3.3 수소도시내 튜브트레일러 운송 시나리오 분석

수소 튜브트레일러의 핵심이 되는 실린더와 트레일러에 대한 원료 취득부터 제조까지 탄소배출량은 3.1～3.2절에 거쳐 분석하여 제시하였다. 본 절에서는 해당 결과를 활용하여 튜브트레일러를 통하여 수소를 운반하는 과정을 포함하여 전과정 탄소배출량을 산정하였다.

운영단계의 경우, 튜브트레일러의 내구수명 및 누적 운영횟수를 반영한 평가가 필요하나, 사용처에 따라 운영거리 및 횟수가 달라지고, 튜브트레일러의 폐기 사례 및 누적 운영횟수가 공개되지 않은 점을 고려할 때 현재 분석이 어려울 수 있다. 특정 지역에서 튜브트레일러 1회 왕복 운행을 기준으로 탄소배출량을 산정하였다.

실제 수소 운송은 수요에 따라 이루어지고 국내 모든 수소 튜브트레일러의 운송현황을 모니터링할 수 없기 때문에 본 연구에서는 국내 최대 수소공급 도시

인 울산을 대상으로 수소생산기지에서 수소충전소로 운송시에 대한 시나리오 설정하여 분석하였으며, 시나리오 선정시 활용된 분석 조건은 다음과 같다.

울산권역에 공급되는 수소는 울산 남구 부곡동에 위치한 (주)카프로 수소출하기지에서 생산·정제되어 출하된다고 가정하였다. 해당 출하센터는 2025년 준공된 국내 최대규모(43톤/일) 시설로, 자체 생산한

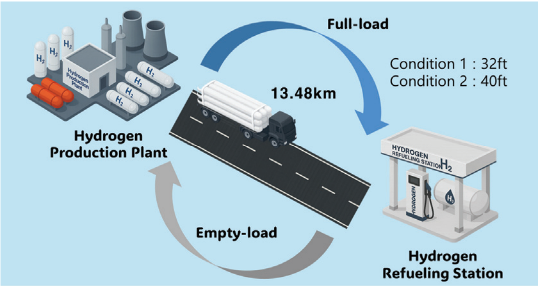

Fig. 3. Hydrogen Transport Scenario in Ulsan

Table 7. Distances between Ulsan Hydrogen Shipment Center and Hydrogen Stations

Hydrogen Station	Distance (km)
Okdong Hydrogen Complex Station	6.1
Gyeongdong Station	11
Shinil Complex Station	18
Green Complex Station	6.6
Eonyang (Seoul) Station	30
Deokha Station	4.2
Hyundai Motor Line 52 Station	12
Kyung Station	15
Hydrogen Tram Station	6.9
Eonyang Station	25
Average	13.48

Table 8. Weight Parameters of 32ft & 40ft trailer

Parameters	32 ft	40 ft
Total tube weight	13,856 kg	22,470 kg
Trailer curb weight	3,840 kg	4,000 kg
Hydrogen storage capacity	1,720 kg	3,640 kg
Empty weight	17,696 kg	26,470 kg
Gross weight	19,416 kg	30,110 kg

수소를 압축·저장한 후, 튜브트레일러를 통해 울산권역 내 저장식 수소충전소로 공급하는 역할을 수행한다. 수소출하기지에서 울산권역 내 10개 저장식 충전소(튜브트레일러 방식)까지의 평균 운송거리는 Table 7에 제시된 값을 이용하여 약 13.48 km로 산정하였다. 이에 따라 1회 운송당 편도 운송거리는 13.48 km, 왕복거리는 26.96 km로 설정하였다. 또한, 수소 튜브트레일러는 1회 운송시 공차 운행과 만차 운행이 반복되므로, Table 8에 나타낸 것과 같이, 공차 중량과 1회 운반 중량을 함께 고려하였다.

수소 튜브트레일러를 통한 운송시 탄소배출량은 수송량과 거리의 곱으로 산정되는 톤키로(ton·km)를 활용하여 계산할 수 있으며, Ecoinvent 3.11 데이터베이스의 “market for transport, freight, tractor and trailer, diesel, agricultural” 항목에서 제시된 단위 배출계수(0.383 kg CO_2-eq/(ton·km))를 활용하여 정량화 하였으며[22], Table 9에 해당 결과를 정리하여 나타내었다.

Fig. 3과 같이 (주)카프로 수소출하기지에서 각 수소충전소로의 운송거리를 13.48 km로 설정할 경우, 40ft 모델 기준 공차 편도 1회 운송시 약 136.66 kg CO_2-eq, 만차 편도 1회 운송시 약 155.45 kgCO_2-eq가 배출되는 것으로 산정된다. 따라서 왕복 1회 운송 사이클의 총 배출량은 약 292.11 kgCO_2-eq로 나타난다.

이는 수소 튜브트레일러 실린더의 제조단계(약 61.8 tonCO_2-eq/대)에 비해 왕복운행 1회당 약 0.47% 수준으로 낮은 비중을 차지하지만, 내구 수명 및 누적 운행 회수 및 등록 차량 수를 고려할 경우 누적 배출량은 무시할 수 없는 수준으로 확대될 수 있다.

특히, 울산권역에 등록된 수소 튜브트레일러 346

Table 9. GHG Emissions from Hydrogen Transport in Ulsan

Transport Route	32ft (kgCO_2-eq)	40ft (kgCO_2-eq)
Empty-load (one-way)	91.36	136.66
Full-load (one-way)	100.24	155.45
Total (round-trip)	191.60	292.11
Total emissions for 346 registered trailers (round-trip)	66,294.75	101,071.27

대가 동일 조건((주)카프로 수소출하기지 → 충전소)에서 1회 왕복 운행한다고 가정할 경우, 총 탄소배출량은 약 66.29~101.07 tonCO_2-eq에 달하는 것으로 추정된다. 이는 수소 운송 과정에서 발생하는 배출량이 개별 차량 단위로는 미미하지만, 전체 공급망 차원에서는 의미 있는 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

4. 결론 및 시사점

본 연구는 수소 튜브트레일러 실린더에 대한 고압용기 설계식과 국내외 LCI DB를 활용하여 국내 공급된 수소 튜브트레일러에 대하여 원료 취득부터 저장튜브 제조까지 전과정에 걸친 탄소배출량을 산정하였고, 이를 활용하여 국내 보급된 수소 튜브트레일러에 대한 내재탄소와 울산 지역내 운송 시나리오 분석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 수소 튜브트레일러는 운송중에 연료를 소비하여 탄소를 지속적으로 배출하는 설비이지만, 수소를 저장해야하는 튜브트레일러내 저장실린더 제조시 탄소가 배출되므로 제조시 탄소배출량을 산정하였다.
2) 수소 튜브트레일러는 저장 모듈인 실린더 이외 장착 스키드가 포함되어 구성되나 본 연구에서는 해당 부문을 고려하지 않았으므로 향후 해당 부문에 대한 조사 분석이 추가로 요구된다.
3) 수소 튜브트레일러는 32 ft 규격, 40 ft 규격이 국내에서 운영 중이며, 이를 기준으로 수소 튜브트레일러 1대 기준으로 원료취득부터 제조까지 탄소배출량을 산출하면, 각각 32 ft 트레일러는 약 38,101 kgCO_2-eq, 40 ft 트레일러는 약 61,787 kgCO_2-eq 으로 나타났다.
4) 현재 국내에 공급된 수소 튜브트레일러의 내재탄소는 최소 32,805 tonCO_2-eq~최대 53,199 tonCO_2-eq로 추정된다.
5) 본 연구를 통하여 산정된 튜브트레일러 제조단계 탄소배출량을 활용하여 울산지역내 운송 시나리오에 따른 탄소배출량은 13,249.24~21,479.37 tonCO_2-eq(제작, 왕복 1회 운송)으로 나타났다.
6) 향후 본 연구에서 제시한 탄소배출량 원단위를 활용하여 신규 수소도시 건설 또는 수소 튜브트레일러 공급시 예상 탄소배출량을 산정하기 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.
7) 수소 튜브트레일러는 수소도시를 구성하는데 핵심 인프라시설 중 하나로 본 연구에서 제시한 제조단계까지 내재탄소량을 활용하여 도시 내 도입시 탄소배출량을 산정할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 수소도시내 수소공급량과 사용량에 대하여 실시간으로 모니터링하고 관리하는 종합관리센터 등을 통하여 운영 데이터가 지속적으로 쌓이게 되면 수소튜브트레일러에 대한 전과정 탄소발자국 산정이 가능할 것으로 판단되므로 지속적인 데이터 확보와 활용방안에 대한 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 연구개발과제인 “국토교통분야 수소 기술의 전과정 평가 방법론 개발 및 시범 적용(RS-2024-00417444)” 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. International Energy Agency (IEA), “The Future of Hydrogen, Report prepared by the IEA for the G20”, Japan, IEA Publications, 2019, pp. 17-20, Retrieved from https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen.
2. International Energy Agency (IEA), “Global Hydrogen Review 2025, IEA Publications, 2025”, pp. 7, Retrieved from https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025.
3. C. Kim, G. Kim, and H. Kim, “Analysis of domestic and foreign policy and technology trends for hydrogen industry development”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 2, 2023, pp. 122-131, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.2.122.
4. Ministry of Trade, Industry and Energy, “Hydrogen Economy Roadmap of Korea”, Press Release, Government of Korea, 2019, Retrieved from http://www.motie.go.kr.

5. X. Lu, A. C. Krutoff, M. Wappler, and A. Fischer, "Key influencing factors on hydrogen storage and transportation costs: a systematic literature review", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 105, 2025, pp. 308-325, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.196.
6. D. W. Yim, "Governance leadership for hydrogen economy revitalization", Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 31, No. 3, 2020, pp. 265-275, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.3.265.
7. Korean Standards Association, "Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework (KS I ISO 14040)", National Institute of Technology and Standards, Korea, 2023, Retrieved from https://www.kssn.net/search/stddetail.do?itemNo=K001010145054.
8. Korean Standards Association, "Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines (KS I ISO 14044)", National Institute of Technology and Standards, Korea, 2023, Retrieved from https://www.kssn.net/search/stddetail.do?itemNo=K001010145056.
9. L. Ye and L. Lu, "Environmental and economic evaluation of the high-pressured and cryogenic vessels for hydrogen storage on the sedan", International Journal of Low-Carbon Technologies, Vol. 18, 2023, pp. 144-149, doi: https://doi.org/10.1093/ijlct/ctac126.
10. M. S. Saharudin, S. Hasbi, S. K. Sahu, Q. Ma, and M. Younas, "Numerical analysis and life cycle assessment of Type V hydrogen pressure vessels", Journal of Composites Science, Vol. 9, No. 2, 2025, pp. 75, doi: https://doi.org/10.3390/jcs9020075.
11. A. Kampker, H. Heimes, M. Kehrer, S. Hagedorn, P. Euchner, and H. Butzer, "Economic and ecological analysis of hydrogen storage systems", Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics (CPSL 2024), publish-Ing., Hannover, Germany, 2024, doi: https://doi.org/10.15488/17739.
12. A. Agostini, N. Belmonte, A. Masala, J. Hu, P. Rizzi, M. Fichtner, P. Moretto, C. Luetto, M. Sgroi, and M. Baricco, "Role of hydrogen tanks in the life cycle assessment of fuel cell-based auxiliary power units", Applied Energy, Vol. 215, 2018, pp. 1-12, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.095.
13. DS Aether CT Co., Ltd., "Hydrogen Tube Trailers", DS Aether CT Official Website, October 1, 2025, Retrieved from https://www.dsaetherct.com/hyd01.html.
14. KOREA TRAILER Co., Ltd., "Special Trailer – Hydrogen/LNG GAS Trailer", KOREA TRAILER Official Website, October 1, 2025, Retrieved from http://www.kortrailer.com/bbs/board.php?bo_table=b31&wr_id=95&sca=%ED%8A%B9%EC%88%98%ED%8A%B8%EB%A0%88%EC%9D%BC%EB%9F%AC.
15. NK Co., Ltd., "Hydrogen Gas Tube Trailer – 2290 Liter × 10 Bottle", Manufacturer's Design Specification.
16. Ministry of SMEs and Startups, "Pilot project launched for high-pressure carbon composite hydrogen transport containers exceeding domestic standards", Press Release, Government of Korea, Oct. 29, 2021, Retrieved from https://www.mss.go.kr/site/smba/ex/bbs/View.do?cbIdx=86&bcIdx=1029684&parentSeq=1029684.
17. Korea Gas Safety Corporation (KGS), "KGS AC 212: Facility/Technical/Inspection Code for Manufacture of Seamless Cylinders for High-pressure Gases", Korea, 2022, pp. 6, Retrieved from https://cyber.kgs.or.kr/kgscode.codeSearch.view.ex.do?onEngYn=F&pblcRlmCd=&pblcMdclCd=&pblcCd=AC212_221012&stDayY=2008&stDayM=01&etDayY=2025&etDayM=10.
18. Ministry of Environment, National Life Cycle Inventory Database (LCI DB): "Stainless steel cold rolled sheet (ILCD, EF 3.1)", Korea, 2022, Retrieved from https://www.globallcadataaccess.org/search?query=Cold+rolled+steel+sheet%3B+production+mix%2C.
19. Ecoinvent Association, ecoinvent v3.11 Dataset Documentation: "impact extrusion of steel, cold, tempering, RoW", ecoinvent Association, Switzerland, 2025, Retrieved from https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/1860/documentation.
20. Ministry of Environment, National Life Cycle Inventory Database (LCI DB): "Liquefied Natural Gas, Natural gas(ILCD, EF 3.1)", Korea, 2022, Retrieved from https://ecosq.or.kr/websquare.do#w2xPath=/ui/cer/ic/oh/ICOH510M02.xml&lciDatabaseSn=761&lciDbLcCd=001&imgFile=&excelFile=&pdfFile=&callbackFn=scwin.fn_Search&menuSn=20018500.
21. Korea Hydrogen Association, "Domestic Transportation Equipment Status by Region – Hydrogen Tube Trailer," Hydrogen Economy Information Portal (H_2Hub), 2023, Retrieved from https://h2hub.or.kr/main/stat/stat_distribute_area_tube.do.
22. Ecoinvent Association, ecoinvent 3.11 Dataset Documentation: "market for transport, freight, tractor and trailer, diesel, agricultural – RoW", ecoinvent Association, Switzerland, 2025, Retrieved from https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/21389/documentation.