KTR KOREA TESTING & RESEARCH INSTITUTE

2026 Critical Review Report

검토 의견서

■ 1차 ■ 2차 □ 3차

*Final Critical Review Report*

# LCI DB 검토의견서

2026. 11. 11.

Korea Testing and Research Institute

| 작성기관 및 작성자 | | |
|---|---|---|
| 작성기관: | ㈜엔스타알앤씨 | |
| | | |

Note 1: 이 문서는 2026년 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행한 연구 결과물로서, 국토교통분야 수소 기술의 LCI DB에 대한 정보를 포함하고 있습니다.

Note 2: 해당 문서에 기재된 사항은 외부에 공개할 수 없으며, 정밀검토 후 해당 자료는 폐기하여야 합니다.

# 1. LCI DB 보고서

Dataset Documentation '수소철도(트램) 함체 · 지지 – KR – equipment carriers and enclosures, for hydrogen rail vehicle (tram)'

** 참고: 이 문서는 데이터세트 정보의 일부만 발췌하여 제공합니다. 교환 속성, 수학적 관계, 매개변수, 저자 및 검토자의 연락처 정보에 대한 추가 데이터는 별도 파일 형식으로 제공되어야 합니다.*

# 1 데이터 세트 식별 정보

| | 구분 | 내용 |
|---|---|---|
| 1 | **데이터 이름** | 수소철도(트램) 함체 · 지지 1 kg |
| 2 | **지역** | Korea (KR) |
| 3 | **기간** | 2026-01-01 to 2028-12-31 – Valid for the entire period |
| 4 | **참조 제품** | equipment carriers and enclosures, for hydrogen rail vehicle (tram) (1 kg) |
| 5 | **데이터 세트 유형** | Transforming activity |
| 6 | **기술 수준** | TRL(Technology Readiness Level 9) |

지리적 위치를 나타낼 수 있는 사진 기입 (선택)

데이터의 지역적 범위: 대한민국(철기연 수소철도(트램) 부품 BOM 기반 기술 대표 데이터, 배경 데이터는 한국 공급 우선 연결)

# 2 데이터 세트 작성자 정보

| | 구분 | 내용 |
|---|---|---|
| 1 | Data entry | 인하대학교 |
| 2 | Data generator | 이광원, ㈜엔스타알앤씨 |
| 3 | Review (1st) | 이름, 소속 |
| 4 | Review (2nd) | 이름, 소속 |
| 5 | Review (3rd) | 이름, 소속 |

# 3 물질 흐름(요약)

| | Reference product | By-product classification | Amount |
|---|---|---|---|
| 1 | equipment carriers and enclosures, for hydrogen rail vehicle (tram) | | 1 kg |

| | Inputs from technosphere | Amount |
|---|---|---|
| 1 | ABS r186 | 1.55E-01 kg |
| 2 | 사출 성형 r186 | 1.56E-01 kg |
| 3 | 알루미늄 AlMg3 r187 | 4.89E-03 kg |
| 4 | 알루미늄 판압연 r187 | 4.89E-03 kg |
| 5 | 알루미늄 전신재 r188 | 2.57E-02 kg |
| 6 | 알루미늄 평균 가공 r188 | 2.57E-02 kg |
| 7 | 탄소강 r189 | 6.11E-03 kg |
| 8 | 강 평균 가공 r189 | 6.11E-03 kg |
| 9 | 구리 r190 | 3.20E-04 kg |
| 10 | 구리 평균 가공 r190 | 3.20E-04 kg |
| 11 | 황동 r191 | 4.32E-02 kg |
| 12 | 구리 평균 가공 r191 | 4.32E-02 kg |
| 13 | 수동 전자부품 r192 | 1.43E-05 kg |
| 14 | FRP r193 | 4.98E-03 kg |
| 15 | 나일론 6 r194 | 1.16E-02 kg |
| 16 | 사출 성형 r194 | 1.17E-02 kg |
| 17 | PC r195 | 2.66E-02 kg |
| 18 | 사출 성형 r195 | 2.68E-02 kg |
| 19 | PVC r196 | 4.18E-06 kg |
| 20 | 압출 r196 | 4.18E-06 kg |
| 21 | 스테인리스강 r197 | 3.79E-01 kg |
| 22 | 스테인리스 판압연 r197 | 3.79E-01 kg |

| | | |
|---|---|---|
| 23 | 탄소강 r198 | 3.79E−02 kg |
| 24 | 강 평균 가공 r198 | 3.79E−02 kg |
| 25 | 저합금강 열연 r199 | 2.95E−01 kg |
| 26 | 강 평균 가공 r199 | 2.95E−01 kg |
| 27 | 합성고무 r200 | 9.53E−03 kg |

# 4 일반사항

### (1) 데이터 개요

본 LCI DB의 대상은 수소철도(트램)(5모듈 저상 노면전차, 1편성 공차 50.5 t)의 Level 2 부품 '함체 · 지지'의 제조(원료채취와 부품 1차 성형 · 가공)이다. 기기 함체 · 커버 · 보드 · 브래킷 · 클램프 등 장치 탑재 구조물을 포함한다.
철기연(한국철도기술연구원)이 제공한 수소철도(트램) BOM 중 L2 'Carrier systems, enclosures'(함체 · 지지) 15행(수소철도(트램) 1편성 1,561.1 kg)의 재질 구성을 1 kg으로 정규화하였다. 기준흐름은 수소철도(트램) 함체 · 지지 1 kg이며, 1편성 투입량 1,561.1 kg은 상위 Level 1 공정 '④ 전기 · 제어 장치'에서 정한다.
수소철도(트램)은 수소 연료전지를 동력원으로 하는 저상 노면전차이며, 본 데이터셋은 그 공통부품 중 '함체 · 지지'에 해당한다.

### (2) 시장조사 및 대상업체 선정

현재 수소철도(트램)은 국내에서 실증 · 도입 초기 단계이며, 차량 제작사의 부품별 BOM은 공개되지 않는다. 따라서 특정 제조업체의 시장 점유율이나 생산량을 기준으로 대표 기업을 선정하는 것은 현재 단계에서 불가능하다.
본 LCI 모듈은 과제 참여기관인 철기연이 제공한 「수소 기술 DB 트리 분석 양식(수소트램)」(2026−08−24 수신)의 수소철도(트램) 부품별 재질 · 질량을 사용하였다. 질량은 철기연 원자료와 철기연이 정한 중량 환산 규칙으로 산정한 수소철도(트램) 1편성 기준 값이다. 향후 수소철도(트램) 제작사 부품 자료가 확보되면 보완 · 개정될 기초 데이터베이스이다.
사용 범위: L2 'Carrier systems, enclosures' 15행(수소철도(트램) 1편성 1,561.1 kg). 원자료의 행은 부품 1개가 아니라 같은 재질 코드로 묶인 질량이다.
환산식: 투입량(kg/kg) = 행 질량 ÷ L2 그룹 질량 합(수소철도(트램) 1편성 1,561.1 kg). 예: r197 Board 외 591.4 kg ÷ 1,561.1 kg = 3.79E−01 kg. 행별 재질은 ecoinvent 재료 데이터셋과 형상별 1차 성형 · 가공 데이터셋(재료 질량과 1:1)으로 연결하였다.

### (3) 기능단위 설정

| | 내용 | |
|---|---|---|
| 기능 | 수소철도(트램) 1편성 제작에 쓰이는 함체 · 지지 공급 | |
| 기능단위 | 수소철도(트램) 함체 · 지지 1 kg 생산 | |
| 기준흐름 | equipment carriers and enclosures, for hydrogen rail vehicle (tram) 1 kg | 수소철도(트램) 함체 · 지지 재질 구성 1 kg(1편성 투입량 1,561.1 kg은 상위 Level 1에서 정함) |

(4) 시스템 경계

| | 원료채취 | 물질/제품 제조 | | 사용 | | 폐기 | | 재활용 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Raw material extraction | Transportation | Product manufacturing | Use | Maintenance | Transportation | Final disposal | Transportation |
| 공정 | ● | ×[1] | × | × | × | × | × | × |

원료채취(원재료 생산)와 부품 1차 성형 · 가공(판압연 · 압출 · 신선 · 평균 금속가공 · 사출 등 ecoinvent 가공 서비스 데이터셋)을 포함한다. 부품 조립(제품 제조) 단계는 원자료(철기연 BOM)가 재질 · 질량만 제공하여 포함하지 않았다(×). 원료 수송은 각주 [1] 과 같이 부분 반영하였고(×[1] ), 사용 · 폐기 단계는 부품 단위 cradle-to-gate 데이터셋이므로 제외하였다. 근로자 편의시설 · 사무공간 등 생산과 직접 관련 없는 활동은 제외하였다.

[1] A2(원료 수송): 원료의 수송은 ecoinvent 'market for' 데이터셋에 포함된 평균 수송으로 반영되며, 부품 공급사에서 차량 제작사까지의 수송은 공급처를 특정할 수 없어 반영하지 않았다.

(5) 제외 기준

원자료(철기연 수소철도(트램) BOM) L2 'Carrier systems, enclosures'의 행 15개를 질량 · 영향 기여와 관계없이 모두 포함하였다(질량 기준 컷오프 미적용).
원자료가 제공하지 않은 부품 조립 에너지 · 보조물질 · 폐기물 · 배출물은 임의로 채우지 않았다(가정 및 제한사항 참조).
근로자 편의시설 · 사무공간 등 생산과 직접 관련 없는 활동은 제외하였다.

(6) 데이터 범주

| | 구분 | | 물질명 |
|---|---|---|---|
| 투입 | 원료물질 | | ABS, 알루미늄 AlMg3, 알루미늄 전신재, 탄소강, 구리, 황동, 수동 전자부품, FRP, 나일론 6, PC, PVC, 스테인리스강, 저합금강 열연, 합성고무 |
| | 보조물질 | | 가공 서비스: 사출 성형, 알루미늄 판압연, 알루미늄 평균 가공, 강 평균 가공, 구리 평균 가공, 압출, 스테인리스 판압연<br>그 밖의 보조물질은 원자료에 자료 없음 |
| | 용수 | | 전경 투입 없음(원자료에 자료 없음) |
| | 에너지 | | 1차 성형 · 가공 에너지는 가공 서비스 데이터셋에 포함, 부품 조립 에너지는 원자료에 자료 없음 |
| 산출 | 제품 | | equipment carriers and enclosures, for hydrogen rail vehicle (tram) |
| | 부산물(할당) | | 해당 없음(단일 산출) |
| | 잔여물 | 매립 | 원자료에 자료 없음 |
| | | 소각 | 원자료에 자료 없음 |
| | | 재활용 | 원자료에 자료 없음 |
| | 배출물 | 대기 | 원자료에 자료 없음 |
| | | 수계 | 원자료에 자료 없음 |
| | | 토양 | 원자료에 자료 없음 |

(7) 데이터 품질 평가 출처

| | 특정데이터 | 일반데이터 |
|---|---|---|
| 정밀도(P) | | |
| 시간적 대표성(TiR) | | 4.05 |
| 지역적 대표성(GeR) | | 2.00 |
| 기술적 대표성(TeR) | | 2.60 |
| Total DQR | | 2.88 (좋음) |

(8) 가정 및 제한사항

| | 내용 |
|---|---|
| 공통 사항 | • 대상제품 생산 활동데이터는 현장데이터 수집이 불가하여 철기연이 제공한 수소철도(트램) 부품별 재질 · 질량(「수소 기술 DB 트리 분석 양식(수소트램)」)을 사용하였다.<br>• 원자료의 수소철도(트램) 질량은 철기연 원자료와 철기연 중량 환산 규칙으로 산정한 값으로 제작사 실측 BOM이 아니며, 저상 대차 · 제동 방식 등 수소철도(트램) 고유 설계가 충분히 반영되지 않았을 수 있다.<br>• 배경(상위흐름) 데이터는 ecoinvent 3.12 Cutoff System을 사용하고, 한국 공급 우선순위(KR → Asia → RoW → GLO)로 연결하였다. 한국 데이터셋이 없는 재료 · 가공은 GLO/RoW 시장 데이터셋을 사용하였다.<br>• 원료 수송(A2)은 시스템 경계 표 각주 [1] 과 같이 부분 반영함.<br>• 본 DB는 부품 단위의 cradle-to-gate DB로, 제품 수송(A4)과 설치(A5)는 이를 사용하는 상위 시스템(수소철도(트램) Level 1 · 차량 공정)에서 적용함.<br>• 부품의 1차 성형 · 가공 에너지는 가공 서비스 데이터셋으로 반영하였으나, 부품 조립 단계의 에너지 · 폐기물은 원자료에 자료가 없어 반영하지 않았다. 본 DB를 단독으로 사용하면 조립 에너지가 포함되지 않음.<br>• 전력 · 열 · 용수 등 유틸리티를 전경에서 직접 투입하지 않아 국가 LCI DB 유틸리티 데이터셋의 연결 대상이 없다(가공 서비스 데이터셋 내부의 전력은 ecoinvent 배경 데이터).<br>• 원자료 재질 · 형상과 정확히 대응하는 데이터셋이 없는 투입은 데이터 수집표와 사용 LCI DB 목록에 '(proxy)'로 표시하고 근거를 아래에 적었다. |

[함체 · 지지]

• 재질 코드는 원자료의 LCIDB 코드(V열)를 그대로 사용하였다.

• (proxy) 관련 재료 · 등급 proxy(알루미늄 합금 조성 미지정 → 전신재 평균): 알루미늄 전신재 r188

• (proxy) 공법 proxy(형상별 평균 금속가공, 실제 가공 공정 미상): 알루미늄 평균 가공 r188, 강 평균 가공 r189, 구리 평균 가공 r190, 구리 평균 가공 r191, 강 평균 가공 r198, 강 평균 가공 r199

• (proxy) 관련 재료 · 등급 proxy(클램프 강재 미지정 → 비합금강): 탄소강 r189

• (proxy) 관련 재료 · 등급 proxy(구리합금 미지정 → 황동): 황동 r191

• (proxy) 관련 제품 proxy(수동 전자부품 평균): 수동 전자부품 r192

• (proxy) 관련 재료 · 등급 proxy(FRP hand lay-up): FRP r193

• (proxy) 관련 재료 · 등급 proxy(스테인리스 강종 미지정 → 18/8): 스테인리스강 r197

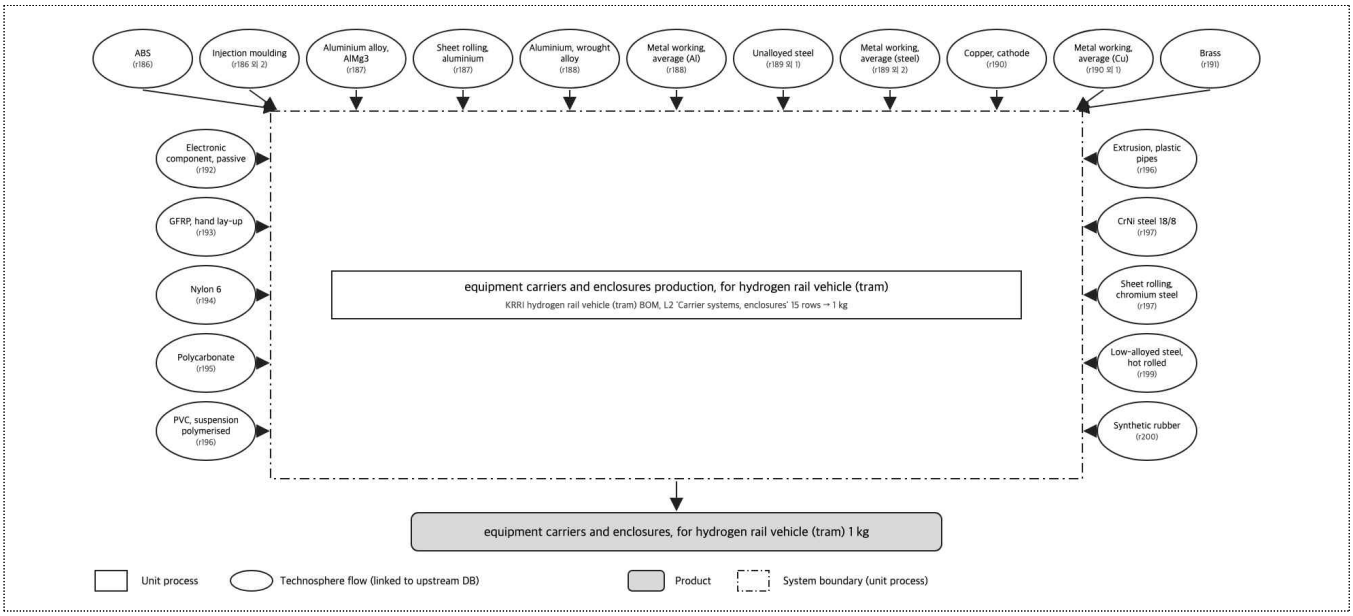
• (proxy) 관련 재료 · 등급 proxy(고무 종류 미지정 → 합성고무 평균): 합성고무 r200

• FRP(r193 Box(플라스틱))는 원자료 재질이 '플라스틱'인 성형 부품이다. ecoinvent 유리섬유강화플라스틱 데이터셋 중 열경화성 패널 · 성형품에 해당하는 폴리에스터 수지 hand lay-up을 사용하였다(다른 하나는 폴리아미드 사출 성형품). 실제 성형법은 원자료로 확인되지 않는다.

• 사출 성형 서비스는 제품 질량의 1/0.994배(성형 수율 99.4 %)로 연결하였다(수지 투입량은 제품 질량과 같음).

# 5 물질 흐름(상세 정보)

## (1) 공정흐름도 작성




## (2) 데이터 수집 및 계산

본 데이터셋은 단위공정 1개이며, 투입물은 원자료(철기연 수소철도(트램) BOM) L2 'Carrier systems, enclosures' 15행의 재료와 형상별 가공 서비스이다. 물질명은 원자료 표기(행 번호 · 대표 부품명 · 재질)이고, LCI DB 명칭은 연결한 데이터셋이다.

[1] 데이터 수집

| 구분 | | 물질명 | 데이터 구분 | | | | LCI DB | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 실측 | 계산 | 추정 | 일반 | 명칭 | 출처 | 연도 |
| 투입 | 원료물질 | r186 Box(플라스틱) | | ● | | | market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer (GLO) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011-2025 |
| | 가공 서비스 | r186 Box(플라스틱) 가공 | | ● | | | injection moulding (RoW) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 1993-2025 |
| | 원료물질 | r187 Plate 외(알루미늄 합금) | | ● | | | market for aluminium alloy, AlMg3 (GLO) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011-2025 |
| | 가공 서비스 | r187 Plate 외(알루미늄 합금) 가공 | | ● | | | market for sheet rolling, aluminium (GLO) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011-2025 |
| | 원료물질 | r188 Cover 외(알루미늄 합금) | | ● | | | (proxy) market for aluminium, wrought alloy (GLO) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011-2025 |
| | 가공 서비스 | r188 Cover 외(알루미늄 합금) 가공 | | ● | | | (proxy) market for metal working, average for aluminium product manufacturing (GLO) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011-2025 |
| | 원료물질 | r189 Clamp, C(-) | | ● | | | (proxy) market for steel, unalloyed (GLO) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011-2025 |
| | 가공 서비스 | r189 Clamp, C(-) 가공 | | ● | | | (proxy) market for metal working, average for steel product manufacturing (GLO) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011-2025 |
| | 원료물질 | r190 Bracket 외(구리합금) | | ● | | | market for copper, cathode (GLO) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011-2025 |
| | 가공 서비스 | r190 Bracket 외(구리합금) 가공 | | ● | | | (proxy) market for metal working, average for copper product manufacturing (GLO) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011-2025 |
| | 원료물질 | r191 Board 외(구리합금) | | ● | | | (proxy) market for brass (RoW) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011-2025 |
| | 가공 서비스 | r191 Board 외(구리합금) 가공 | | ● | | | (proxy) market for metal working, average for copper product manufacturing (GLO) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011-2025 |
| | 원료물질 | r192 Cleat(-) | | ● | | | (proxy) market for | ecoinvent | 2011-2025 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | electronic component, passive, unspecified (GLO) | 3.12 Cutoff | |
| | 원료물질 | r193 Box(플라스틱) | | ● | | | (proxy) market for glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up (GLO) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011-2025 |
| | 원료물질 | r194 Cleat 외(플라스틱) | | ● | | | market for nylon 6 (RoW) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011-2025 |
| | 가공 서비스 | r194 Cleat 외(플라스틱) 가공 | | ● | | | injection moulding (RoW) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 1993-2025 |
| | 원료물질 | r195 Board 외(플라스틱) | | ● | | | market for polycarbonate (RoW) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011-2025 |
| | 가공 서비스 | r195 Board 외(플라스틱) 가공 | | ● | | | injection moulding (RoW) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 1993-2025 |
| | 원료물질 | r196 Liner(플라스틱) | | ● | | | market for polyvinyl chloride, suspension polymerised (RAS without CN) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011-2025 |
| | 가공 서비스 | r196 Liner(플라스틱) 가공 | | ● | | | market for extrusion, plastic pipes (GLO) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011-2025 |
| | 원료물질 | r197 Board 외(steel) | | ● | | | (proxy) market for steel, chromium steel 18/8 (GLO) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011-2025 |
| | 가공 서비스 | r197 Board 외(steel) 가공 | | ● | | | market for sheet rolling, chromium steel (GLO) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011-2025 |
| | 원료물질 | r198 Bracket 외(steel) | | ● | | | market for steel, unalloyed (GLO) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011-2025 |
| | 가공 서비스 | r198 Bracket 외(steel) 가공 | | ● | | | (proxy) market for metal working, average for steel product manufacturing (GLO) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011-2025 |
| | 원료물질 | r199 Special 외(steel) | | ● | | | market for steel, low-alloyed, hot rolled (GLO) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011-2025 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 가공 서비스 | r199 Special 외(steel) 가공 | | ● | | | (proxy) market for metal working, average for steel product manufacturing (GLO) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011-2025 |
| | 원료물질 | r200 Packing 외(합성고무) | | ● | | | (proxy) market for synthetic rubber (GLO) | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011-2025 |
| | 에너지 | | | | | | | | |
| | 용수 | | | | | | | | |
| | 수송 | | | | | | | | |
| 산출 | 제품 | equipment carriers and enclosures, for hydrogen rail vehicle (tram) | | | | | | | |
| | 부산물 | | | | | | | | |
| | 폐기물 매립 | | | | | | | | |
| | 폐기물 대기 | | | | | | | | |
| | 폐기물 수계 | | | | | | | | |

[2] 데이터 할당

| 구분 | | 물질명 | 할당인자 |
|---|---|---|---|
| 1 | 대상 모듈공정 | equipment carriers and enclosures, for hydrogen rail vehicle (tram) | 100% |
| 2 | 부산물 | | - |

공정 중 다중 산출이 발생하지 않아 할당을 수행하지 않았다.

[3] 데이터 계산

| 구분 | | 내용 |
|---|---|---|
| 1 | 상·하위 흐름 연결을 위한 계산 | openLCA 2.7.0에서 기준흐름으로 연결(본 공정 → 상위 Level 1 '④ 전기·제어 장치', 1편성 1,561.1 kg 투입). 배경 provider는 UUID로 직접 지정. 투입물별 기여(투입량 × 공급 공정 1단위당 상류 포함 영향)의 합이 openLCA 계산 총량과 일치함을 확인하였다(EF v3.1 25개 범주).<br>투입량 = 행 질량 ÷ L2 그룹 질량 합(수소철도(트램) 1편성 1,561.1 kg). 같은 데이터셋에 연결되는 행도 원자료 행별로 기재함. |
| 2 | 물질수지/물수지 검증 및 조정 | [원자료 BOM 기준 대조] 현장 공정자료 없이 원자료 BOM(재질·질량)으로 구축하여 공정 손실을 포함한 현장 물질수지는 산정할 수 없다. 기준흐름 1 kg의 질량은 투입 원료물질 질량의 합 1.000 kg과 같다(원자료 BOM 기준 일치, 투입/산출 100.0%). 원자료 15행의 질량 합 1,561.1 kg은 L2 그룹 질량(수소철도(트램) 1편성 1,561.1 kg)과 같다. 가공 서비스는 가공 대상 질량에 대한 서비스로 질량 합에서 제외한다. |
| 3 | 연료 연소에 따른 배출량 계산 | [미해당]<br>본 공정은 전경에서 연료를 연소하지 않는다. |

### (3) 물질 투입 · 산출표

| | 구분 | 물질명 | 데이터 출처 | | | | 양 | 단위 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 실측 | 계산 | 추정 | 일반 | | |
| 투입 | 원료물질 | r186 Box(플라스틱) | | ● | | | 1.55E-01 | kg |
| | 가공 서비스 | r186 Box(플라스틱) 가공 | | ● | | | 1.56E-01 | kg |
| | 원료물질 | r187 Plate 외(알루미늄 합금) | | ● | | | 4.89E-03 | kg |
| | 가공 서비스 | r187 Plate 외(알루미늄 합금) 가공 | | ● | | | 4.89E-03 | kg |
| | 원료물질 | r188 Cover 외(알루미늄 합금) | | ● | | | 2.57E-02 | kg |
| | 가공 서비스 | r188 Cover 외(알루미늄 합금) 가공 | | ● | | | 2.57E-02 | kg |
| | 원료물질 | r189 Clamp, C(-) | | ● | | | 6.11E-03 | kg |
| | 가공 서비스 | r189 Clamp, C(-) 가공 | | ● | | | 6.11E-03 | kg |
| | 원료물질 | r190 Bracket 외(구리합금) | | ● | | | 3.20E-04 | kg |
| | 가공 서비스 | r190 Bracket 외(구리합금) 가공 | | ● | | | 3.20E-04 | kg |
| | 원료물질 | r191 Board 외(구리합금) | | ● | | | 4.32E-02 | kg |
| | 가공 서비스 | r191 Board 외(구리합금) 가공 | | ● | | | 4.32E-02 | kg |
| | 원료물질 | r192 Cleat(-) | | ● | | | 1.43E-05 | kg |
| | 원료물질 | r193 Box(플라스틱) | | ● | | | 4.98E-03 | kg |
| | 원료물질 | r194 Cleat 외(플라스틱) | | ● | | | 1.16E-02 | kg |
| | 가공 서비스 | r194 Cleat 외(플라스틱) 가공 | | ● | | | 1.17E-02 | kg |
| | 원료물질 | r195 Board 외(플라스틱) | | ● | | | 2.66E-02 | kg |
| | 가공 서비스 | r195 Board 외(플라스틱) 가공 | | ● | | | 2.68E-02 | kg |
| | 원료물질 | r196 Liner(플라스틱) | | ● | | | 4.18E-06 | kg |
| | 가공 서비스 | r196 Liner(플라스틱) 가공 | | ● | | | 4.18E-06 | kg |
| | 원료물질 | r197 Board 외(steel) | | ● | | | 3.79E-01 | kg |
| | 가공 서비스 | r197 Board 외(steel) 가공 | | ● | | | 3.79E-01 | kg |
| | 원료물질 | r198 Bracket 외(steel) | | ● | | | 3.79E-02 | kg |
| | 가공 서비스 | r198 Bracket 외(steel) 가공 | | ● | | | 3.79E-02 | kg |
| | 원료물질 | r199 Special 외(steel) | | ● | | | 2.95E-01 | kg |
| | 가공 서비스 | r199 Special 외(steel) 가공 | | ● | | | 2.95E-01 | kg |
| | 원료물질 | r200 Packing 외(합성고무) | | ● | | | 9.53E-03 | kg |
| | 에너지 | | | | | | | |
| | 용수 | | | | | | | |
| 산출 | 제품 | equipment carriers and enclosures, for hydrogen rail vehicle (tram) | | | | | 1 | kg |

| | 구분 | 물질명 | 데이터 출처 | | | | 양 | 단위 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 실측 | 계산 | 추정 | 일반 | | |
| | 폐기물 | | | | | | | |
| | 배출물 | | | | | | | |

*※ 물질명의 r번호는 철기연 원자료 행 번호이며, 행별 원자료 부품명 · 재질과 재질 판정 근거는 목록분석결과 엑셀(openLCA process export) Inputs 시트 Description 열에 있다.*

### (4) 목록분석 결과

** 별도 엑셀파일 참조: 목록분석결과/08_함체지지_목록분석결과.xlsx*

# 6 환경영향평가 결과

## (1) 영향평가 정보

| | 지표 | 내용 |
|---|---|---|
| 1 | 평가 소프트웨어 | openLCA 2.7.0 |
| 2 | 평가 방법론 | Environmental footprint 3.1 (EF v3.1, ecoinvent 3.12 Methods) |
| 3 | 배경 데이터베이스 | ecoinvent 3.12 Cutoff System (2026-04-14) |
| 4 | 계산 대상 | openLCA 공정 equipment carriers and enclosures production, for hydrogen rail vehicle (tram) (폴더 '수소철도(트램)/제출용 L2 11종(DQR 상위)', 1 kg) |

## (2) 영향평가 결과

[1] 영향범주별 평가 결과

| | 영향범주 | 지표 | 단위 | 평가결과 | 기여도(%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Acidification | Accumulated Exceedance (AE) | mol H+-Eq | 4.90E-02 | 황동 r191(35.5%), 스테인리스강 r197(21.9%), 구리 평균 가공 r191(11.6%), 저합금강 열연 r199(5.6%), ABS r186(5.0%), 기타(20.4%) |
| 2 | Climate change | Radiative forcing as Global Warming Potential (GWP100) | kg CO2-Eq | 5.72E+00 | 스테인리스강 r197(32.8%), ABS r186(12.7%), 저합금강 열연 r199(11.8%), 강 평균 가공 r199(10.3%), 알루미늄 전신재 r188(5.8%), 기타(26.7%) |
| 3 | Climate change: biogenic | GWP100 | kg CO2-Eq | 4.20E-02 | 강 평균 가공 r199(58.4%), 구리 평균 가공 r191(8.9%), 강 평균 가공 r198(7.5%), 스테인리스강 r197(6.2%), 알루미늄 평균 가공 r188(5.2%), 기타(13.7%) |
| 4 | Climate change: fossil | GWP100 | kg CO2-Eq | 5.67E+00 | 스테인리스강 r197(33.0%), ABS r186(12.7%), 저합금강 열연 r199(11.8%), 강 평균 가공 r199(10.0%), 알루미늄 전신재 r188(5.8%), 기타(26.7%) |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 5 | Climate change: land use and land use change | GWP100 | kg CO2-Eq | 6.35E-03 | 스테인리스강 r197(32.6%), 알루미늄 전신재 r188(10.9%), 강 평균 가공 r199(9.5%), 황동 r191(8.9%), 저합금강 열연 r199(7.0%), 기타(31.1%) |
| 6 | Ecotoxicity: freshwater | Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe) | CTUe | 7.99E+01 | 황동 r191(32.4%), 스테인리스강 r197(32.1%), 구리 평균 가공 r191(8.1%), 저합금강 열연 r199(5.8%), 스테인리스 판압연 r197(5.2%), 기타(16.5%) |
| 7 | Ecotoxicity: freshwater, inorganics | Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe) | CTUe | 7.85E+01 | 황동 r191(32.9%), 스테인리스강 r197(32.4%), 구리 평균 가공 r191(8.2%), 저합금강 열연 r199(5.7%), 스테인리스 판압연 r197(5.2%), 기타(15.6%) |
| 8 | Ecotoxicity: freshwater, organics | Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe) | CTUe | 1.42E+00 | PC r195(50.6%), 스테인리스강 r197(16.2%), 저합금강 열연 r199(8.2%), 강 평균 가공 r199(4.8%), 황동 r191(3.5%), 기타(16.7%) |
| 9 | Energy resources: non-renewable | Abiotic resource depletion - fossil fuels (ADP-fossil) | MJ, net calorific value | 7.47E+01 | 스테인리스강 r197(28.6%), ABS r186(19.7%), 저합금강 열연 r199(9.8%), 강 평균 가공 r199(9.7%), 사출 성형 r186(4.4%), 기타(27.9%) |
| 10 | Eutrophication: freshwater | Fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P) | kg P-Eq | 4.99E-03 | 스테인리스강 r197(38.0%), 황동 r191(28.2%), 구리 평균 가공 r191(9.2%), 저합금강 열연 r199(7.6%), 강 평균 가공 r199(4.7%), 기타(12.3%) |
| 11 | Eutrophication: marine | Fraction of nutrients reaching marine end compartment (N) | kg N-Eq | 6.37E-03 | 스테인리스강 r197(31.2%), 황동 r191(14.7%), 저합금강 열연 r199(10.2%), 강 평균 가공 r199(8.7%), ABS r186(7.0%), 기타(28.1%) |
| 12 | Eutrophication: terrestrial | Accumulated Exceedance (AE) | mol N-Eq | 6.90E-02 | 스테인리스강 r197(30.1%), 황동 r191(18.5%), 저합금강 열연 r199(9.7%), 강 평균 가공 r199(7.5%), ABS r186(6.3%), 기타(28.0%) |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 13 | Human toxicity: carcinogenic | Comparative Toxic Unit for humans (CTUh) | CTUh | 6.36E-09 | 황동 r191(31.0%), 스테인리스강 r197(28.1%), 저합금강 열연 r199(11.0%), 구리 평균 가공 r191(9.3%), 강 평균 가공 r199(5.6%), 기타(15.1%) |
| 14 | Human toxicity: carcinogenic, inorganics | Comparative Toxic Unit for humans (CTUh) | CTUh | 4.24E-09 | 황동 r191(45.2%), 스테인리스강 r197(28.6%), 구리 평균 가공 r191(13.1%), 저합금강 열연 r199(3.8%), 스테인리스 판압연 r197(2.2%), 기타(7.1%) |
| 15 | Human toxicity: carcinogenic, organics | Comparative Toxic Unit for humans (CTUh) | CTUh | 2.11E-09 | 스테인리스강 r197(26.9%), 저합금강 열연 r199(25.5%), 강 평균 가공 r199(12.6%), 알루미늄 전신재 r188(7.9%), PC r195(6.7%), 기타(20.4%) |
| 16 | Human toxicity: non-carcinogenic | Comparative Toxic Unit for humans (CTUh) | CTUh | 3.17E-07 | 황동 r191(58.3%), 구리 평균 가공 r191(18.3%), 스테인리스강 r197(12.5%), 저합금강 열연 r199(3.8%), 강 평균 가공 r199(2.1%), 기타(5.0%) |
| 17 | Human toxicity: non-carcinogenic, inorganics | Comparative Toxic Unit for humans (CTUh) | CTUh | 3.00E-07 | 황동 r191(57.9%), 구리 평균 가공 r191(18.1%), 스테인리스강 r197(13.0%), 저합금강 열연 r199(3.9%), 강 평균 가공 r199(2.1%), 기타(4.9%) |
| 18 | Human toxicity: non-carcinogenic, organics | Comparative Toxic Unit for humans (CTUh) | CTUh | 1.70E-08 | 황동 r191(65.2%), 구리 평균 가공 r191(21.1%), 스테인리스강 r197(4.0%), ABS r186(2.1%), 저합금강 열연 r199(1.9%), 기타(5.7%) |
| 19 | Ionising radiation: human health | Human exposure efficiency relative to U | kBq U235-Eq | 3.11E-01 | 스테인리스강 r197(38.1%), 강 평균 가공 r199(15.4%), 황동 r191(9.5%), 스테인리스 판압연 r197(8.8%), 저합금강 열연 r199(7.5%), 기타(20.7%) |
| 20 | Land use | Soil quality index | dimensionless | 2.91E+01 | 스테인리스강 r197(35.6%), 황동 r191(19.9%), 강 평균 가공 r199(10.1%), 저합금강 열연 r199(7.9%), 구리 평균 가공 r191(7.2%), 기타(19.4%) |
| 21 | Material resources: metals/minerals | Abiotic resource depletion (ADP ultimate reserves) | kg Sb-Eq | 3.89E-04 | 황동 r191(62.8%), 구리 평균 가공 r191(18.2%), 스테인리스강 r197(13.5%), 저합금강 열연 r199(1.2%), 스테인리스 판압연 r197(0.8%), 기타(3.6%) |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 22 | Ozone depletion | Ozone Depletion Potential (ODP) | kg CFC-11 -Eq | 5.40E-08 | 스테인리스강 r197(25.2%), 강 평균 가공 r199(12.9%), 사출 성형 r186(12.0%), PC r195(9.7%), 저합금강 열연 r199(7.6%), 기타(32.5%) |
| 23 | Particulate matter formation | Human health effects associated with exposure to PM2.5. | disease incidence | 4.68E-07 | 스테인리스강 r197(35.7%), 저합금강 열연 r199(13.9%), 황동 r191(8.9%), 강 평균 가공 r199(8.3%), ABS r186(7.9%), 기타(25.3%) |
| 24 | Photochemical oxidant formation: human health | Tropospheric ozone concentration increase | kg NMVOC-Eq | 2.24E-02 | 스테인리스강 r197(28.5%), 황동 r191(15.9%), 저합금강 열연 r199(10.4%), ABS r186(9.1%), 강 평균 가공 r199(7.7%), 기타(28.4%) |
| 25 | Water use | User deprivation potential (deprivationweighted water consumption) | m3 world Eq deprived | 2.45E+00 | 스테인리스강 r197(29.7%), ABS r186(15.7%), 저합금강 열연 r199(13.1%), 황동 r191(9.2%), 강 평균 가공 r199(7.7%), 기타(24.6%) |

[2] 물질별 영향평가 결과

| | 구분 | 흐름 | 물질명 | 목록 | | 평가결과 (kg $CO_2$ eq.) | 기여도(%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 양 | 단위 | | |
| 1 | 투입 | 중간 | ABS r186 | 1.55E-01 | kg | 7.24E-01 | 12.65 |
| 2 | 투입 | 중간 | 사출 성형 r186 | 1.56E-01 | kg | 2.22E-01 | 3.89 |
| 3 | 투입 | 중간 | 알루미늄 AlMg3 r187 | 4.89E-03 | kg | 3.88E-02 | 0.68 |
| 4 | 투입 | 중간 | 알루미늄 판압연 r187 | 4.89E-03 | kg | 3.06E-03 | 0.05 |
| 5 | 투입 | 중간 | 알루미늄 전신재 r188 | 2.57E-02 | kg | 3.31E-01 | 5.78 |
| 6 | 투입 | 중간 | 알루미늄 평균 가공 r188 | 2.57E-02 | kg | 1.01E-01 | 1.76 |
| 7 | 투입 | 중간 | 탄소강 r189 | 6.11E-03 | kg | 1.13E-02 | 0.20 |
| 8 | 투입 | 중간 | 강 평균 가공 r189 | 6.11E-03 | kg | 1.22E-02 | 0.21 |
| 9 | 투입 | 중간 | 구리 r190 | 3.20E-04 | kg | 2.13E-03 | 0.04 |
| 10 | 투입 | 중간 | 구리 평균 가공 r190 | 3.20E-04 | kg | 9.58E-04 | 0.02 |
| 11 | 투입 | 중간 | 황동 r191 | 4.32E-02 | kg | 2.49E-01 | 4.35 |
| 12 | 투입 | 중간 | 구리 평균 가공 r191 | 4.32E-02 | kg | 1.30E-01 | 2.27 |
| 13 | 투입 | 중간 | 수동 전자부품 r192 | 1.43E-05 | kg | 9.13E-04 | 0.02 |
| 14 | 투입 | 중간 | FRP r193 | 4.98E-03 | kg | 1.93E-02 | 0.34 |
| 15 | 투입 | 중간 | 나일론 6 r194 | 1.16E-02 | kg | 1.09E-01 | 1.90 |
| 16 | 투입 | 중간 | 사출 성형 r194 | 1.17E-02 | kg | 1.66E-02 | 0.29 |
| 17 | 투입 | 중간 | PC r195 | 2.66E-02 | kg | 1.66E-01 | 2.90 |
| 18 | 투입 | 중간 | 사출 성형 r195 | 2.68E-02 | kg | 3.81E-02 | 0.67 |
| 19 | 투입 | 중간 | PVC r196 | 4.18E-06 | kg | 1.10E-05 | 0.00 |
| 20 | 투입 | 중간 | 압출 r196 | 4.18E-06 | kg | 1.71E-06 | 0.00 |
| 21 | 투입 | 중간 | 스테인리스강 r197 | 3.79E-01 | kg | 1.88E+00 | 32.78 |
| 22 | 투입 | 중간 | 스테인리스 판압연 r197 | 3.79E-01 | kg | 2.33E-01 | 4.07 |
| 23 | 투입 | 중간 | 탄소강 r198 | 3.79E-02 | kg | 7.02E-02 | 1.23 |
| 24 | 투입 | 중간 | 강 평균 가공 r198 | 3.79E-02 | kg | 7.58E-02 | 1.33 |
| 25 | 투입 | 중간 | 저합금강 열연 r199 | 2.95E-01 | kg | 6.73E-01 | 11.76 |
| 26 | 투입 | 중간 | 강 평균 가공 r199 | 2.95E-01 | kg | 5.90E-01 | 10.31 |
| 27 | 투입 | 중간 | 합성고무 r200 | 9.53E-03 | kg | 3.03E-02 | 0.53 |
| 28 | 산출 | 중간 | equipment carriers and enclosures, for hydrogen rail vehicle (tram) | 1 | kg | 합계 5.72E+00 | 100.00 |

# 8 참고자료

1) 한국철도기술연구원(철기연). 「4. (250905) 수소 기술 DB 트리 분석 양식_엔스타 송부용.xlsx」 및 「제외 및 수량보정 부품_26.08.24.pptx」, 2026-08-24 수신.

# 9 사용 LCI DB 목록

| | 물질명 | LCI DB 명 | 국가명 | 출처 | 년도 | 유효기간 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ABS r186 | market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer | GLO | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |
| 2 | 사출 성형 r186 | injection moulding | RoW | ecoinvent 3.12 Cutoff | 1993 | 2025 |
| 3 | 알루미늄 AlMg3 r187 | market for aluminium alloy, AlMg3 | GLO | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |
| 4 | 알루미늄 판압연 r187 | market for sheet rolling, aluminium | GLO | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |
| 5 | 알루미늄 전신재 r188 | (proxy) market for aluminium, wrought alloy | GLO | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |
| 6 | 알루미늄 평균 가공 r188 | (proxy) market for metal working, average for aluminium product manufacturing | GLO | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |
| 7 | 탄소강 r189 | (proxy) market for steel, unalloyed | GLO | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |
| 8 | 강 평균 가공 r189 | (proxy) market for metal working, average for steel product manufacturing | GLO | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |
| 9 | 구리 r190 | market for copper, cathode | GLO | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |
| 10 | 구리 평균 가공 r190 | (proxy) market for metal working, average for copper product manufacturing | GLO | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |
| 11 | 황동 r191 | (proxy) market for brass | RoW | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |
| 12 | 구리 평균 가공 r191 | (proxy) market for metal working, average for copper product manufacturing | GLO | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |
| 13 | 수동 전자부품 r192 | (proxy) market for electronic component, passive, unspecified | GLO | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 14 | FRP r193 | (proxy) market for glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up | GLO | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |
| 15 | 나일론 6 r194 | market for nylon 6 | RoW | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |
| 16 | 사출 성형 r194 | injection moulding | RoW | ecoinvent 3.12 Cutoff | 1993 | 2025 |
| 17 | PC r195 | market for polycarbonate | RoW | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |
| 18 | 사출 성형 r195 | injection moulding | RoW | ecoinvent 3.12 Cutoff | 1993 | 2025 |
| 19 | PVC r196 | market for polyvinyl chloride, suspension polymerised | RAS without CN | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |
| 20 | 압출 r196 | market for extrusion, plastic pipes | GLO | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |
| 21 | 스테인리스강 r197 | (proxy) market for steel, chromium steel 18/8 | GLO | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |
| 22 | 스테인리스 판압연 r197 | market for sheet rolling, chromium steel | GLO | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |
| 23 | 탄소강 r198 | market for steel, unalloyed | GLO | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |
| 24 | 강 평균 가공 r198 | (proxy) market for metal working, average for steel product manufacturing | GLO | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |
| 25 | 저합금강 열연 r199 | market for steel, low-alloyed, hot rolled | GLO | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |
| 26 | 강 평균 가공 r199 | (proxy) market for metal working, average for steel product manufacturing | GLO | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |
| 27 | 합성고무 r200 | (proxy) market for synthetic rubber | GLO | ecoinvent 3.12 Cutoff | 2011 | 2025 |

# KTR 검토 반영내역

| No | 구분 | 검토의견 | 반영내용 |
|---|---|---|---|
| 1 | 공통 | 사용 LCI DB 목록: 같은 물질을 합친 행 분리 | 물질마다 1행으로 나눴습니다. |
| 2 | 공통 | 5쪽 물질 흐름(요약)과 본문 목록 불일치 | 요약 목록을 본문과 같은 이름 · 순서 · 양으로 맞췄습니다. BOP는 부품별 투입을 재료로 펼친 목록임을 표 아래 적었습니다. |
| 3 | 공통 | 영향평가 값 소수점 차이(5.73 → 5.72) | 같은 데이터셋을 썼고 차이는 0.4 % 이하입니다. 보고서 표가 투입량을 유효숫자 3자리로 적은 데 따른 계산 정밀도 차이로 추정됩니다(예: ⑱ 128.7 kg → 1.29E+02로 약 1.2 kg $CO_2$ e). 원값은 목록분석결과 엑셀에 있습니다. |
| 4 | 공통 | 검토 DQR은 참고용 | 참고하겠습니다. |