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 '저상 트램 아티큘레이터(하부 관절) – KR – articulation, lower joint, for low-floor 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**	저상 트램 아티큘레이터(하부 관절) 1개
2	**지역**	Korea (KR)
3	**기간**	2026-01-01 to 2028-12-31 - Valid for the entire period
4	**참조 제품**	articulation, lower joint, for low-floor rail vehicle (tram) (1 Item)
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(국내 저상트램 설계 문헌 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	articulation, lower joint, for low-floor rail vehicle (tram)		1 Item(s)

	Inputs from technosphere	Amount
1	저합금강[하부 관절]	1.29E+02 kg
2	강 평균 가공[하부 관절]	1.29E+02 kg

4 일반사항

(1) 데이터 개요

본 LCI DB의 대상은 수소철도(트램)(5모듈 저상 노면전차)의 모듈 사이를 잇는 아티큘레이터(아티큘레이션 장치, 관절) 1곳 중 하부 관절의 제조(원료채취와 부품 1차 성형 · 가공)이다. 아티큘레이터는 하부 관절(차체 하부를 잇는 고정 관절)과 상부 관절(회전 · 피치 관절)로 구성된다. 본 데이터셋은 질량 근거가 있는 하부 관절 1개(128.7 kg)만 포함하며, 상부 관절은 질량 자료가 없어 포함하지 않았다(가정 및 제한사항 참조). 통로막(벨로즈) · 턴테이블은 아티큘레이터와 별개 부품으로 본 데이터셋에 포함하지 않는다.
수소철도(트램) 1편성(5모듈)에는 관절 4곳이 있어 상위 Level 1 공정 '① 차체'에 본 데이터셋 4개가 투입된다.

(2) 시장조사 및 대상업체 선정

저상 트램 아티큘레이터의 제작사 BOM은 공개되지 않아 특정 제조업체를 대표로 선정할 수 없으므로, 공개 문헌을 조사하였다.
하부 관절 질량을 직접 보고한 원문은 Jin et al.(2024) 1건이다(국내 저상트램 하부 관절의 FE 설계 최적안 128.7 kg, 앞뒤 프레임 SCM440, 구면 베어링 STB2, 부시 SM45C). 이를 대표값으로 사용하였다.
같은 논문의 초기 설계 143.7 kg은 같은 설계의 다른 안이라 독립 관측이 아니며, HÜBNER FX1000pro 데이터시트의 40 kg은 경계(베어링 유닛, 차체 연결 프레임 미포함)가 달라 참고로만 사용하였다. 상부 관절은 세 차례 조사(특허 · 학술지 · 제조사 · 공공입찰 자료)에서 질량 원문을 찾지 못하였다.
환산식: 투입량 = 하부 관절 1개 질량 128.7 kg × 재질 몫(저합금강 100 %). 가공 서비스는 재료 질량과 1:1로 연결하였다.

(3) 기능단위 설정

	내용	
기능	수소철도(트램) 모듈 차체 사이 연결(하부 관절)	
기능단위	저상 트램 아티큘레이터(하부 관절) 1개 생산	
기준흐름	articulation, lower joint, for low-floor rail vehicle (tram) 1 Item	1개 = 하부 관절 128.7 kg(1편성 4개는 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 대표 문헌이 질량 · 재질만 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

대표 문헌이 보고한 하부 관절 질량을 모두 포함하였다.
질량 근거가 없는 상부 관절(회전 3 + 피치 1)은 0으로 두지 않고 '자료없음(미포함)'으로 표시하였으며, 영향은 가정 및 제한사항에 적었다.
근로자 편의시설 · 사무공간 등 생산과 직접 관련 없는 활동은 제외하였다.

(6) 데이터 범주

	구분		물질명
투입	원료물질		저합금강
	보조물질		가공 서비스: 강 평균 가공 그 밖의 보조물질은 문헌에 자료 없음
	용수		전경 투입 없음(문헌에 자료 없음)
	에너지		1차 성형 · 가공 에너지는 가공 서비스 데이터셋에 포함, 부품 조립 에너지는 문헌에 자료 없음
산출	제품		articulation, lower joint, for low-floor rail vehicle (tram)
	부산물(할당)		해당 없음(단일 산출)
	잔여물	매립	문헌에 자료 없음
		소각	문헌에 자료 없음
		재활용	문헌에 자료 없음
	배출물	대기	문헌에 자료 없음
		수계	문헌에 자료 없음
		토양	문헌에 자료 없음

(7) 데이터 품질 평가 출처

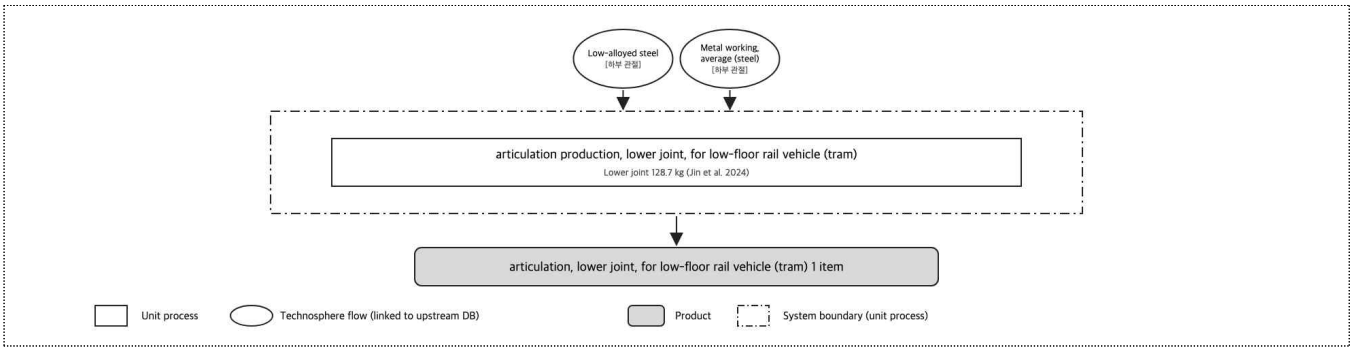
	특정데이터	일반데이터
정밀도(P)		
시간적 대표성(TiR)		4.00
지역적 대표성(GeR)		2.00
기술적 대표성(TeR)		2.50
Total DQR		2.83 (좋음)

(8) 가정 및 제한사항

	내용
공통사항	• 대상제품 생산 활동데이터는 현장데이터 수집이 불가하여 공개 문헌데이터를 사용하였다. • 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. • 원료 수송(A2)은 시스템 경계 표 각주 [1] 과 같이 부분 반영함. • 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. • 부품 전용 제조 에너지 자료가 없어 1차 성형 · 가공 데이터셋으로 대리하였고, 조립 · 용접 에너지는 반영하지 않았다. 본 DB를 단독으로 사용하면 조립 에너지가 포함되지 않음. • 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). • 원자료 재질 · 형상과 정확히 대응하는 데이터셋이 없는 투입은 데이터 수집표와 사용 LCI DB 목록에 '(proxy)'로 표시하고 근거를 아래에 적었다.
아티큘레이터 (하부 관절)	• (proxy) 공법 proxy(형상별 평균 금속가공, 실제 가공 공정 미상): 강 평균 가공[하부 관절] • 하부 관절 128.7 kg 전체를 저합금강으로 모델링하였다(프레임 SCM440 · 베어링 STB2는 저합금강, 부시 SM45C는 질량 분할이 없어 저합금강에 포함, 10~20 %를 비합금강으로 바꿔도 GWP 차이 1 % 미만). 원문에 가공 방법이 없어 강 평균 가공(metal working, average for steel product manufacturing)으로 대리하였다. • 상부 관절(회전 3 + 피치 1)은 질량 원문이 없어 포함하지 않았다(자료없음, 0 아님). 참고로 중국 특허 CN110406558B [0054]는 하부 관절의 하중 용량이 상부 관절의 약 4배라고 기술한다. 이 비를 질량에 그대로 적용하면 상부 관절은 하부(128.7 kg)의 약 1/4인 32 kg으로 추정되며, 이 경우 1개 GWP가 129.6 kg CO2-eq(+25 %) 늘어난다. 하부 관절과 같은 질량 · 재질로 두면 518.3 kg CO2-eq(+100 %) 늘어난다. • 하부 관절 질량은 국내 저상트램 연구 설계(FE 최적안) 1건이며 적용 차량이 확인되지 않았다(교차 확인 문헌 없음).

5 물질 흐름(상세 정보)

(1) 공정흐름도 작성



(2) 데이터 수집 및 계산

본 데이터셋은 단위공정 1개이며, 투입물은 문헌 대표값으로 구성한 부위별 재료와 가공 서비스이다.
물질명은 문헌의 부위 명칭이고, LCI DB 명칭은 연결한 데이터셋이다.

[1] 데이터 수집

구분			물질명	데이터 구분				LCI DB		
				실측	계산	추정	일반	명칭	출처	연도
투입	원료물질		하부 관절				●	market for steel, low-alloyed (GLO)	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011-2025
	가공 서비스		하부 관절 가공				●	(proxy) market for metal working, average for steel product manufacturing (GLO)	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011-2025
	에너지									
	용수									
	수송									
산출	제품		articulation, lower joint, for low-floor rail vehicle (tram)							
	부산물									
	폐기물	매립								
		대기								
		수계								

[2] 데이터 할당

구분		물질명	할당인자
1	대상 모듈공정	articulation, lower joint, for low-floor 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 '① 차체', 1편성 4개 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).
2	물질수지/물수지 검증 및 조정	[문헌 BOM 기준 대조] 현장 공정자료 없이 문헌 값으로 구축하여 공정 손실을 포함한 현장 물질수지는 산정할 수 없다. 기준흐름 1개의 질량 128.7 kg(Jin et al. 2024)은 투입 원료물질(저합금강) 128.7 kg과 같다(투입/산출 100.0%). 가공 서비스는 질량 합에서 제외하며, 상부 관절은 자료없음으로 포함하지 않았다.
3	연료 연소에 따른 배출량 계산	[미해당] 본 공정은 전경에서 연료를 연소하지 않는다.

(3) 물질 투입·산출표

	구분	물질명	데이터 출처				양	단위
			실측	계산	추정	일반		
투입	원료물질	하부 관절				●	1.29E+02	kg
	가공 서비스	하부 관절 가공				●	1.29E+02	kg
	에너지							
	용수							
산출	제품	articulation, lower joint, for low-floor rail vehicle (tram)					1	Item(s)
	폐기물							
	배출물							

(4) 목록분석 결과

* 별도 엑셀파일 참조: 목록분석결과/10_아티큘레이터_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 articulation production, lower joint, for low-floor rail vehicle (tram) (폴더 '수소철도(트램)/제출용 L2 11종(DQR 상위)', 1 Item(s))

(2) 영향평가 결과

[1] 영향범주별 평가 결과

	영향범주	지표	단위	평가결과	기여도(%)
1	Acidification	Accumulated Exceedance (AE)	mol H+-Eq	2.07E+00	저합금강[하부 관절](51.8%), 강 평균 가공[하부 관절](48.2%)
2	Climate change	Radiative forcing as Global Warming Potential (GWP100)	kg CO2-Eq	5.18E+02	저합금강[하부 관절](50.3%), 강 평균 가공[하부 관절](49.7%)
3	Climate change: biogenic	GWP100	kg CO2-Eq	1.09E+01	강 평균 가공[하부 관절](98.2%), 저합금강[하부 관절](1.8%)
4	Climate change: fossil	GWP100	kg CO2-Eq	5.07E+02	저합금강[하부 관절](51.4%), 강 평균 가공[하부 관절](48.6%)
5	Climate change: land use and land use change	GWP100	kg CO2-Eq	4.28E-01	강 평균 가공[하부 관절](61.9%), 저합금강[하부 관절](38.1%)
6	Ecotoxicity: freshwater	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)	CTUe	3.41E+03	저합금강[하부 관절](55.9%), 강 평균 가공[하부 관절](44.1%)

	영향범주	지표	단위	평가결과	기여도(%)
7	Ecotoxicity: freshwater, inorganics	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)	CTUe	3.33E+03	저합금강[하부 관절](55.8%), 강 평균 가공[하부 관절](44.2%)
8	Ecotoxicity: freshwater, organics	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)	CTUe	7.62E+01	저합금강[하부 관절](61.3%), 강 평균 가공[하부 관절](38.7%)
9	Energy resources: non-renewable	Abiotic resource depletion - fossil fuels (ADP-fossil)	MJ, net calorific value	5.90E+03	강 평균 가공[하부 관절](53.3%), 저합금강[하부 관절](46.7%)
10	Eutrophication: freshwater	Fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)	kg P-Eq	2.57E-01	저합금강[하부 관절](59.8%), 강 평균 가공[하부 관절](40.2%)
11	Eutrophication: marine	Fraction of nutrients reaching marine end compartment (N)	kg N-Eq	4.99E-01	저합금강[하부 관절](51.4%), 강 평균 가공[하부 관절](48.6%)
12	Eutrophication: terrestrial	Accumulated Exceedance (AE)	mol N-Eq	4.87E+00	저합금강[하부 관절](53.8%), 강 평균 가공[하부 관절](46.2%)
13	Human toxicity: carcinogenic	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	4.39E-07	저합금강[하부 관절](64.5%), 강 평균 가공[하부 관절](35.5%)
14	Human toxicity: carcinogenic, inorganics	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	1.02E-07	저합금강[하부 관절](61.0%), 강 평균 가공[하부 관절](39.0%)
15	Human toxicity: carcinogenic, organics	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	3.38E-07	저합금강[하부 관절](65.5%), 강 평균 가공[하부 관절](34.5%)
16	Human toxicity: non-carcinogenic	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	7.97E-06	저합금강[하부 관절](64.1%), 강 평균 가공[하부 관절](35.9%)
17	Human toxicity: non-carcinogenic, inorganics	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	7.71E-06	저합금강[하부 관절](64.6%), 강 평균 가공[하부 관절](35.4%)

	영향범주	지표	단위	평가결과	기여도(%)
18	Human toxicity: non-carcinogenic, organics	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	2.58E-07	저합금강[하부 관절](50.0%), 강 평균 가공[하부 관절](50.0%)
19	Ionising radiation: human health	Human exposure efficiency relative to U	kBq U235-Eq	2.88E+01	강 평균 가공[하부 관절](72.6%), 저합금강[하부 관절](27.4%)
20	Land use	Soil quality index	dimensionless	2.21E+03	강 평균 가공[하부 관절](58.0%), 저합금강[하부 관절](42.0%)
21	Material resources: metals/minerals	Abiotic resource depletion (ADP ultimate reserves)	kg Sb-Eq	3.40E-03	저합금강[하부 관절](59.3%), 강 평균 가공[하부 관절](40.7%)
22	Ozone depletion	Ozone Depletion Potential (ODP)	kg CFC-11-Eq	4.50E-06	강 평균 가공[하부 관절](67.5%), 저합금강[하부 관절](32.5%)
23	Particulate matter formation	Human health effects associated with exposure to PM2.5.	disease incidence	4.28E-05	저합금강[하부 관절](60.3%), 강 평균 가공[하부 관절](39.7%)
24	Photochemical oxidant formation: human health	Tropospheric ozone concentration increase	kg NMVOC-Eq	1.63E+00	저합금강[하부 관절](53.6%), 강 평균 가공[하부 관절](46.4%)
25	Water use	User deprivation potential (deprivationweighted water consumption)	m3 world Eq deprived	1.76E+02	저합금강[하부 관절](53.1%), 강 평균 가공[하부 관절](46.9%)

[2] 물질별 영향평가 결과

	구분	흐름	물질명	목록		평가결과 (kg CO_2 eq.)	기여도(%)
				양	단위		
1	투입	중간	저합금강[하부 관절]	1.29E+02	kg	2.61E+02	50.33
2	투입	중간	강 평균 가공[하부 관절]	1.29E+02	kg	2.57E+02	49.67
3	산출	중간	articulation, lower joint, for low-floor rail vehicle (tram)	1	Item(s)	합계 5.18E+02	100.00

8 참고자료

1) Jin et al. (2024). Optimization and Experimental Verification of Lower Articulation for Low-Floor Tram Using Meta-Model. Applied Sciences 14(21):9618. https://doi.org/10.3390/app14219618

2) HÜBNER. Lower Articulation System FXpro for tram and light rail vehicles, data sheet (참고).

3) 江苏远致达. CN110406558B, 저상 트램 관절 장치 특허 [0054](상 · 하부 관절 하중 용량 비, 참고).

9 사용 LCI DB 목록

	물질명	LCI DB 명	국가명	출처	년도	유효기간
1	저합금강[하부 관절]	market for steel, low-alloyed	GLO	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011	2025
2	강 평균 가공[하부 관절]	(proxy) market for metal working, average for steel product manufacturing	GLO	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011	2025

KTR 검토 반영내역

No	구분	검토의견	반영내용
1	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.
2	공통	영향평가 값 소수점 차이(518 → 520)	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.
3	개별	상부 관절 특허 '4배' 문장 확인	특허는 '하부 관절의 하중 용량이 상부의 약 4배'라는 뜻이며 질량 값이 아닙니다(이 비로 추정하면 상부 약 32 kg). 오해가 없게 문장을 고쳤습니다.
4	공통	검토 DQR은 참고용	참고하겠습니다.