Check for updates

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 6, 2025, pp. 672~681
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.6.672

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

# 수소기술 부품의 전과정목록 데이터 불확도 평가에 대한 연구

이광원† · 정수연 · 도창욱 · 안세민 · 홍선화

(주)엔스타알앤씨

# Study on Assessment of Uncertainty in Life Cycle Inventories of Hydrogen Technology Components

KWANGWON LEE†, SOOYEON JEONG, CHANGWOOK DO, SEMIN AHN, SUNHWA HONG

ENSTAR R&C, 1101, 70 Gasan digital 2-ro, Geumcheon-gu, Seoul, 08589, KOREA

†Corresponding author :
kwanglee12@enstar.kr

Received 21 October, 2025
Revised 13 November, 2025
Accepted 13 November, 2025

Abstract >> Reliable life cycle inventory (LCI) data are essential for accurate life cycle assessment (LCA) of emerging hydrogen technologies. For alkaline water electrolysis (AWE), the scarcity of operational data often leads to reliance on literature-based datasets with high uncertainty. This study quantitatively evaluated the uncertainty of an AWE stack dataset and proposed a correction approach. Uncertainty was quantified using a combined model of basic and pedigree-matrix-based additional uncertainty. The resulting geometric standard deviations (GSDs) were implemented in openLCA, and a Monte Carlo simulation (10,000 iterations) was performed. The mean global warming potential (GWP) was 0.068 kg $CO_2$eq per kg $H_2$ with a relative standard deviation (RSD) of 27.9%, indicating "very poor" data quality. Nickel inputs contributed 70.9% of total variance. To mitigate outlier effects in small samples, the 1-trim rule—excluding the value farthest from the median in log space—was applied. After adjustment, the mean GWP increased slightly to 0.073 kg $CO_2$eq, while the RSD improved to 12.1% (fair). The results demonstrate that the 1-trim-based correction is a practical and transparent method for enhancing the reliability of literature-based LCI datasets for hydrogen technologies.

Key words : Hydrogen technology(수소 기술), Life cycle assessment(전과정평가), Life cycle inventory(전과정목록), Uncertainty(불확도), Lognormal distribution (대수정규분포), Geometirc standard deviation(기하표준편차)

## 1. 서 론

탄소중립 및 수소경제 실현을 위한 기술 전환이 가속화됨에 따라, 수소 생산 및 저장·이용 기술의 환경영향을 과학적으로 평가하기 위한 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)의 중요성이 점점 부각되고

있다. 전과정평가의 신뢰성은 전과정목록(Life Cycle Inventory, LCI) 데이터의 품질에 의해 크게 좌우되며, 특히 알칼라인 수전해(Alkaline Water Electrolysis, AWE) 등 신흥 수소 기술 분야에서는 실증 데이터가 부족하여 문헌 기반 데이터에 의존하는 경우가 많다. 그러나 이러한 문헌 기반 데이터는 표본 수가 적고, 기술적 · 지리적 이질성이 존재하며, 대표성이 제한되어 불확도가 높게 나타나는 한계를 가진다[1,2,3].

국제적으로 에코인벤트(ecoinvent), ILCD (International Reference Life Cycle Data Sysem), PEF (Product Environmenta Footprint) 등 주요 LCI 데이터베이스에서는 불확도를 패디그리 매트릭스(pedigree matrix) 형태로 제시하고 있으며[2,4], 최근에는 데이터 품질 요인의 상호 관련성을 고려하고 이를 통계적 불확도 산정 기법을 결합하려는 시도가 이루어지고 있다[5,6]. 하지만 이러한 접근은 주로 상대적 품질 지표에 머물러 있으며, 문헌 기반의 소표본 데이터를 다룰 때 발생하는 극단값(outlier)이나 표본 왜곡(bias)에 대한 조정 절차는 여전히 미비하다[7,8]. 한편 수소 기술의 전과정평가는 수전해 장비별 설계 차이, 소재 구성, 전력 구조 등에 따라 민감하게 달라지며, 입력 데이터의 불확도로 인해 결과의 신뢰성이 크게 영향을 받는다[9,10]. 따라서 문헌 기반 LCI 데이터 구축 시, 불확도의 정량적 제시와 보정 절차의 투명화가 필수적이다[11,12].

이에 본 연구는 문헌 기반 데이터를 활용한 수소 기술 핵심부품(AWE 스택)의 LCI 데이터 구축 과정에서 발생하는 불확도를 정량적으로 평가하고, 그 특성을 개선하기 위한 절차를 제시하는 것을 목적으로 한다. 구체적으로는 문헌 기반 LCI 데이터의 표본 수(n)에 따른 기본 불확도 모델을 제시하고, 패디그리 매트릭스를 이용하여 데이터 품질 요인별 추가 불확도 모델을 구축한다. 이후 몬테카를로(Monte Carlo) 시뮬레이션을 수행하여 전체 데이터의 통합 불확도를 상대표준편차(RSD)를 통해 검증하고, 소표본 데이터의 극단값 영향을 완화하기 위한 1-trim 규칙을 적용하여 그 효과를 비교·분석한다.

본 연구는 수전해 기술을 중심으로 문헌 기반 LCI 데이터의 불확도를 실증적으로 평가하고 보정한 사례로서, 향후 수소 LCI 데이터베이스 구축 및 데이터 품질관리 지침에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 불확도 분류 및 분석 절차

불확도는 일반적으로 우연적(aleatory) 불확도와 인식론적(epistemic) 불확도로 구분된다. 전자는 측정 오차나 자연적 변동과 같이 확률적 요인에서 기인하며, 후자는 정보 부족이나 대표성 한계 등으로 발생한다[13].

본 연구에서는 에코인벤트 품질 지침[2]과 ILCD 핸드북[3]을 기반으로 문헌 기반 LCI 데이터의 불확도를 다음 기본 불확도($\sigma_b^2$), 추가 불확도($\sigma_a^2$) 및 통합 불확도($\sigma^2$)의 세 단계로 산정하였다, 불확도는 로그전환 데이터의 분산($\sigma_{ii}^2$)으로 계산하였다.

#### 2.1.1 기본 불확도($\sigma_b^2$)

표본 수(n)에 따라 다음 기준을 적용하였다.

- n = 1: 에코인벤트의 기본 불확도 적용
- n = 2: 최대값과 최소값의 비율을 이용한 근사식 적용
- n ≥ 3: 로그변환 후 표준편차를 사용, 다만 로그분포를 가정하며, 이상치(outlier)가 존재할 경우 IQR 또는 1-trim 규칙으로 보정

문헌 기반 데이터의 표본 수가 3 이하로 적은 경우, 단일 이상치가 전체 불확도를 과대 추정시키는 경향이 있다. 이를 보정하기 위해 본 연구에서는 1-trim 규칙을 적용하였다. 이는 로그공간에서 중앙값으로부터의 거리가 가장 큰 값을 제거하는 방식으로 강건한 통계(robust statistics)에서 제안된 α-trimmed estimator 개념에 기반한다[7,8]. 이 방법은 특히 $n \le 3$인 소표본 데이터에 유효하며, $\ln(x_{max}/x_{min}) > 4$ 또는 기하표준편차(Geometric Standard Deviation, GSD) > 2 이상일 때 이상치 가능성이 높은 것으로

간주하였다. 1-trim 적용 후 남은 데이터(n = 2)에 대하여 불확도($\sigma_b^2$)를 재계산하였다.

#### 2.1.2 추가 불확도($\sigma_a^2$)

에코인벤트 패디그리 매트릭스의 다섯 가지 품질 지표(신뢰성, 완전성, 시간 상관성, 지리 상관성, 기술 상관성)에 따라 점수를 부여하고, 각 등급별 가중 분산값($\sigma_i^2$)을 합산하였다.

#### 2.1.3 통합 불확도($\sigma^2$) = $\sigma_b^2 + \sigma_a^2$

기본 불확도($\sigma_b^2$)와 추가 불확도($\sigma_a^2$)의 합으로 산정된다. 통합 불확도($\sigma^2$)는 식 (1)에 따라 기하표준편차(GSD)로 산정된다. 산정된 기하표준편차(GSD)는 자체로 데이터의 불확도를 나타내고, 전과정평가 소프트웨어인 openLCA에 입력되어 몬테카를로(Monte Carlo) 시뮬레이션에 활용되었다[12].

$$GSD = e^{\sigma} \tag{1}$$

### 2.2 몬테카를로 시뮬레이션 설정

AWE 스택 LCI 데이터의 전체 불확도를 정량화하기 위해 openLCA v 2.4를 활용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

- 기능단위: 수소 1 kg 생산
- 반복 횟수: 10,000 회
- 분포 형태: 대수정규분포(lognormal distribution)
- 입력 불확도: 기하표준편차(GSD)
- 출력지표: 평균값(mean), 표준편차(SD), 95% 신뢰구간(CI)
- 기여도/민감도 분석: 분산 기여도 분석으로 주요 인자 확인 및 불확도 개선 조치의 민감도 확인

이 절차를 통해 AWE 스택 생산 시스템의 전체 불확도를 수치적으로 평가하고, 주요 인자(모듈 및 원자재)를 식별하였다.

3장에서 불확도 산정 방법을 제시하고, 4장에서 사례 연구로서 AWE 스택 생산 데이터의 불확도 평가 및 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 전체 LCI 데이터의 불확도를 평가하였다. 또한 불확도 저감 조치에 따른 효과를 비교·분석하였다.

## 3. 문헌 기반 데이터의 불확도 모델

수소 기술의 핵심 부품 생산과 같이 데이터 수집이 제한적인 문헌 기반 전과정목록 데이터의 불확도 모델을 아래와 같이 제안하고자 한다.

### 3.1 문헌 기반 LCI 데이터의 기본 불확도 모델

기본 불확도는 수집된 각 데이터의 변동(variation)과 확률적 오차(stochastic error)를 나타낸다[2]. 문헌 기반 제품 생산의 특정 투입 및 산출 데이터는 연구에 따라 차이가 나타난다. 예를 들어 동일한 기술을 적용한 제품 생산이라도 문헌마다 사용 원자재의 종류에 차이가 나타나기도 한다. 즉, 원자재별로 사용량 데이터 표본의 수에 차이가 존재한다. 따라서 표본 수에 따른 불확도 정보 산정 방법이 필요하다. 또한 수집 데이터를 기반으로 투입 및 산출의 불확도 산정이 가능할지라도 표본별로 데이터 값 차이가 현저하게 크게 나타나기도 한다. 예를 들어, 동일 원자재의 최대값/최소값이 4 배 이상의 차이를 보이는 사례도 보고된다. 이와 같이 이상치 데이터가 존재할 경우에 대한 불확도 산정 방안이 모색되어야 한다. 불확도 산정 결과는 로그전환 정규분포의 분산($\sigma_b^2$) 또는 표준편차($\sigma_b$)로 계산되고 식 (1)을 적용하여 기하표준편차(GSD)로 계산된다. 표본 수에 따른 불확도 산정 방법은 Table 1과 같다.

수소 기술 핵심 부품 생산에 대한 문헌은 제한적이다. 표본이 1 개인 경우에는 에코인벤트 데이터베이스 시스템에서 제시하고 있는 기본 불확도를 적용하며 로그전환 정규분포의 분산($\sigma_b^2$)으로 제시된다. 해당 불확도는 특정 값의 불확도를 가용한 정보에서 도출할 수 없는 경우, 예를 들어, 정보 출처가 하나뿐이며 그 값에 대한 불확도 정보를 제공하지 않고 단

**Table 1.** Defalt basic uncertainty (variance $\sigma_b^2$ of the log-transformed data) based on ecoinvent database system

| Situation | Calculation |
|---|---|
| n=1 | ecoinvnent default basic uncertainty ($\sigma_b^2$) |
| n=2 | $\sigma_b = \frac{\ln(x_{\max}/x_{\min})}{3}$ |
| n≥3 | $\sigma_b = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left[\ln(x_i) - \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\ln(x_j)\right]^2}$ |
| n≥3 (in the presence of outliers) | $\sigma_b = \frac{IQR(interquartile\ Range)}{1.349}$ or $\sigma_b = \frac{\ln(x_{\max}/x_{\min})}{3}$ |

일 값만 제시할 때 불확도를 정량화하기 위해 개발되었다. 에코인벤트 기본 불확도는 Table 2와 같다[2].

표본이 2 개일 경우에는 표본이 너무 적어서 직접 분산 계산이 불안정하므로 로그전환 정규분포 범위(최대값과 최소값의 차이)로부터 근사 표준편차를 계산하는 방식을 적용한다[14].

표본이 3 개 이상일 경우에는 로그변환 데이터의 표준편차($\sigma_b$)를 산정한다. 이때 이상치가 존재하는 경우에는 정규분포에서 강건한 추정치(robust estimator)로 알려진 IQR/1.349를 이용하여 로그변환 데이터의 표준편차를 계산한다[15]. 또는 식 (2)로 계산된 로그변환 중앙값으로부터의 거리가 가장 큰 값을 제거하는 1-trim 규칙을 적용한다[7,8]. 로그변환 데이터의 표준편차($\sigma_b$)는 표준의 수가 2 개일 때의 계산식을 적용한다.

$$\sigma_b = |\ln(x_i) - median(\ln x)| \quad (2)$$

데이터 이상치의 판정 기준은 기하표준편차(GSD)가 2를 초과하거나 ln ($x_{max}/x_{min}$)가 4를 초과하는 경우로 정의한다. 이러한 기준은 대수정규분포 데이터에서 과도한 분산을 보이는 이상치를 식별하기 위한 경험적 임계값으로 적용하였다[16].

**Table 2.** Default basic uncertainty (variance $\sigma_b^2$ of the log-transformed data) based on ecoinvent database system

| input / output group | variace($\sigma_b^2$) |
|---|---|
| demand of<br>thermal energy, electricity, semi-finished products, working material, waste treatment services | 0.0006 |
| transport services (tkm) | 0.12 |
| infrastructures | 0.3 |
| resources: | |
| primary energy carriers, metals, salts | 0.0006 |
| Land use, occupation | 0.04 |
| Land use, transportmation | 0.12 |
| pollutants emitted to water: | |
| BOD, COD, DOC, TOC, inorganic compounds | 0.04 |
| individual hydrocarbons, PAH | 0.3 |
| Heavy metals | 0.65 |
| pollutants emitted to soil: | |
| Oil, hydrocarbon total | 0.04 |
| Heavy metals | 0.04 |
| pollutants emitted to air: | |
| CO2 | 0.0006 |
| SO2 | 0.0006 |
| NMVOC total | 0.04 |
| NOx, N2O | 0.04 |
| CH4, NH3 | 0.04 |
| Individual hydrocarbons | 0.12 |
| PM>10 | 0.04 |
| PM10 | 0.12 |
| PM2.5 | 0.3 |
| PAH | 0.3 |
| CO, Heavy metals | 0.65 |
| inorganic emissions, others | 0.04 |
| Radionuclides | 0.3 |

## 3.2 문헌 기반 LCI 데이터의 추가 불확도 모델

추가 불확도는 품질 평가 방법인 패디그리 매트릭스 접근법 기반이고, 기본 불확도를 보완하기 위해 적용한다[2].

수소 기술 핵심 부품 생산의 투입 및 산출 데이터는 패디그리 매트릭스에 따라 품질을 평가한다. 평가 항목은 다섯 가지의 독립적 특성(품질 지표), 즉 신뢰성(reliability), 완전성(completeness), 시간적 상관성(temporal correlation), 지리적 상관성(geographic correlation), 추가 기술적 상관성(further technological cor-

**Table 3.** Pedigree matrix used to assess the data quality of data source, according to ecoinvent databse system

| Indicator score | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 (default) |
|---|---|---|---|---|---|
| Reliability | Verified5 data based on measurements6 | Verified data partly based on assumptions or non-verified data based on measure-ments | Non-verified data part-ly based on qualified estimates | Qualified estimate (e.g. by industrial ex-pert) | Non-qualified estimate |
| Completeness | Representative data from all sites relevant for the market consid-ered, over an ade-quate period to even out normal fluctuations | Representative data from >50% of the sites relevant for the market considered, over an adequate period to even out normal fluc-tuations | Representative data from only some sites (<<50%) relevant for the market considered or >50% of sites but from shorter periods | Representative data from only one site rel-evant for the market considered or some sites but from shorter periods | Representativeness unknown or data from a small number of sites and from shorter periods |
| Temporal correlation | Less than 3 years of difference to the time period of the dataset | Less than 6 years of difference to the time period of the dataset | Less than 10 years of difference to the time period of the dataset | Less than 15 years of difference to the time period of the dataset | Age of data unknown or more than 15 years of difference to the time period of the da-taset |
| Geographical correlation | Data from area under study | Average data from larger area in which the area under study is included | Data from area with similar production conditions | Data from area with slightly similar produc-tion conditions | Data from unknown or distinctly different area (North America in-stead of Middle East, OECD-Europe instead of Russia) |
| Further technological correlation | Data from enterprises, processes and mate-rials under study | Data from processes and materials under study (i.e. identical technology) but from different enterprises | Data from processes and materials under study but from differ-ent technology | Data on related pro-cesses or materials | Data on related pro-cesses on laboratory scale or from different technology |

**Table 4.** Uncertainty factors (variances of the underlying normal distributions) used to convert the data quality indicators of the pedigree matrix in Table 3 into additional uncertainty, according to ecoinvent database system

| Indicator score | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Reliability | 0.000 | 0.0006 | 0.002 | 0.008 | 0.04 |
| Completeness | 0.000 | 0.0001 | 0.0006 | 0.002 | 0.008 |
| Temporal correlation | 0.000 | 0.0002 | 0.002 | 0.008 | 0.04 |
| Geographical correlation | 0.000 | 2.5e-5 | 0.0001 | 0.0006 | 0.002 |
| Further technological correlation | 0.000 | 0.0006 | 0.008 | 0.04 | 0.12 |

relation)으로 구분된다. 데이터의 품질은 에코인벤트 데이터베이스 시스템에서 적용하는 패디그리 매트릭스를 적용하고, Table 3과 같다[2]. 각 특성은 다섯 개의 품질 수준으로 구성되며, 1에서 5까지의 점수가 매겨진다. 다섯 가지 품질 지표는 품질 수준에 따라 분산 값이 부여되어 있고 그 값은 Table 4와 같다[2].

추가 불확도는 식 (3)에 따라 분산($\sigma_a^2$)로 계산된다.

$$\sigma_a^2 = \sum_{n=1}^{5} \sigma_{an}^2 \tag{3}$$

여기서,

$\sigma_{a1}^2$: 신뢰성 불확도 인자(분산)

$\sigma_{a2}^2$: 완전성 불확도 인자(분산)

$\sigma_{a3}^2$: 시간적 상관성 불확도 인자(분산)

$\sigma_{a4}^2$: 지리적 상관성 불확도 인자(분산)

$\sigma_{a3}^2$: 추가 기술적 상관성 불확도 인자(분산)

수소 기술 핵심 부품 생산의 원자재 A 데이터에

**Table 5.** Example of Additional Uncertainty Calculation for Raw Material A (based on Tables 2–3 and Eqs. (1)–(2))

| Indicator | indicator Score | variance ($\sigma_{an}^2$) |
|---|---|---|
| Reliability | 4 | 0.008 |
| Completeness | 3 | 0.0006 |
| Temporal correlation | 1 | 0.000 |
| Geographical correlation | 3 | 0.0001 |
| Further technological correlation | 2 | 0.0006 |
| Additional uncertainty($\sigma_a^2$) | | 0.0093 |
| Additional uncertainty(GSD) | | 1.10124 |

대한 추가 불확도 산정 사례는 Table 5와 같다.

### 3.3 문헌 기반 LCI 데이터의 통합 불확도 모델

수소 기술 핵심 부품 생산의 투입 및 산출 데이터 통합 불확도는 기본 불확도와 추가 불확도의 합으로 산정된다. 식 (4)는 로그전환 데이터의 분산 그리고 식 (5)는 분산을 기하표준편차(GSD)로 변환하는데 적용된다.

$$\sigma^2 = \sigma_b^2 + \sigma_a^2 \tag{4}$$

$$GSD = e^{\sqrt{\sigma^2}} \tag{5}$$

여기서,
$\sigma^2$: 데이터의 통합 불확도(분산)
$\sigma_b^2$: 데이터의 기본 불확도(분산)
$\sigma_a^2$: 데이터의 추가 불확도(분산)

### 3.4 불확도 정보 문서화

수소 기술 핵심 부품 생산의 투입 및 산출 데이터의 불확도 정보는 기하평균(GM), 기하표준편차(GSD), 95% 신뢰구간의 최소값 및 최대값으로 문서화한다. 기하표준편차(GSD)는 후속 단계인 몬테카를로 시뮬레이션의 입력 변수로 사용되어, 전체 LCI 데이터의 불확도를 정량적으로 평가할 수 있다.

**Table 6.** Confidence interval according to log-normal distribution

| confidence Interval | lower boundary | upper boundary |
|---|---|---|
| 68.0% | $GM \div GSD$ | $GM \times GSD$ |
| 95.0% | $GM \div GSD^2$ | $GM \times GSD^2$ |
| 99.7% | $GM \div GSD^3$ | $GM \times GSD^3$ |

대수정규분포에서 신뢰구간(confidence interval)은 Table 6과 같이 기하평균(GM)과 기하표준편차(GSD)로 계산된다.

## 4. 수소기술 LCI 데이터의 불확도 사례 연구

문헌 기반 LCI 데이터의 불확도 모델을 수소 기술 수전해 기술인 Alkaline Water Electrolyzer (AWE) 스택 LCI 데이터 구축 사례에 적용하였다. 기능 단위는 수소 1 kg 생산을 위한 2.2 MW급 AWE 스택 1 unit으로 설정하였다. 시스템 경계는 원료 물질 취득 및 가공부터 AWE 스택의 생산까지(cradle to gate)로 설정하였다. AWE 스택을 Table 7과 같이 모듈(단위 공정)을 구분하였고, 각각의 수명을 데이터 계산에 고려하였다.

AWE stack 및 구성 모듈을 구성하는 원/부자재, 에너지 사용량 데이터는 문헌을 통해 수집하고 기능 단위(수소 1 kg 생산)를 기준으로 계산되었다[17-20]. 투입 및 산출물의 불확도는 “3. 문헌 기반 데이터의 불확도 모델”에서 제시한 방법으로 계산하여 전과정목록

**Table 7.** Configuration and lifetime of AWE stack modules

| Module | Lifetime (year/hour) |
|---|---|
| Anode unit | 10/60 000 |
| Cachode unit | 10/60 000 |
| Membrane unit | 10/60 000 |
| Cell frame/Bipolar plate | 20/120 000 |
| Gascket/sealing unit | 20/120 000 |
| End plate/frame unit | 20/120 000 |
| AWE stack assembly | |

**Table 8.** Unit process date of AWE stack modules including uncertainty information (per functional unit)

| module | category | flow | unit | GM | uncertainty | | 95% confidence interval | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | distribution | GSD | lower | upper |
| Anode unit | input | nickel plate | kg | 4.73E-04 | lognormal | 3.35E+00 | 4.21E-05 | 5.30E-03 |
| | output | Anode unit | unit | 1 | | | | |
| Cathode unit | input | Ni plated (156 μm) | kg | 3.28E-04 | lognormal | 3.08E+00 | 3.47E-05 | 3.11E-03 |
| | | sulfur | kg | 1.50E-06 | lognormal | 1.25E+00 | 9.60E-07 | 2.35E-06 |
| | | Aluminum | kg | 9.34E-05 | lognormal | 1.25E+00 | 5.97E-05 | 1.46E-04 |
| | | Carbon monoxide | kg | 3.11E-05 | lognormal | 1.25E+00 | 1.99E-05 | 4.87E-05 |
| | output | Cathode unit | unit | 1 | | | | |
| Membrane unit | input | Zirconium oxide | kg | 1.14E-04 | lognormal | 1.14E+00 | 8.72E-05 | 1.49E-04 |
| | | Polyphenelene sulfide | kg | 3.66E-05 | lognormal | 1.15E+00 | 2.79E-05 | 4.82E-05 |
| | | Polysulfones | kg | 2.62E-05 | lognormal | 1.15E+00 | 1.99E-05 | 3.44E-05 |
| | | N-Methyl-2-pyrrolidone | kg | 9.55E-05 | lognormal | 1.31E+00 | 5.59E-05 | 1.63E-04 |
| | | Water | kg | 8.20E-03 | lognormal | 1.31E+00 | 4.81E-03 | 1.40E-02 |
| | output | Membrane unit | unit | 1 | | | | |
| Cell frame/Bipolar plate unit | input | Stainless steel | kg | 1.24E-04 | lognormal | 1.25E+00 | 7.92E-05 | 1.94E-04 |
| | | Polyphenylene sulfide | kg | 1.04E-04 | lognormal | 1.25E+00 | 6.62E-05 | 1.62E-04 |
| | | Perforated Carbon Steel (anode) | kg | 3.16E-03 | lognormal | 1.88E+00 | 8.91E-04 | 1.12E-02 |
| | | Perforated Carbon Steel (cathode) | kg | 3.16E-03 | lognormal | 1.88E+00 | 8.91E-04 | 1.12E-02 |
| | | Nickel | kg | 5.07E-04 | lognormal | 1.70E+00 | 1.75E-04 | 1.47E-03 |
| | output | Cell frame unit | unit | 1 | | | | |
| Gasket/Sealing unit | input | Polytetrafluoroethylene | kg | 8.09E-06 | lognormal | 1.25E+00 | 5.17E-06 | 1.27E-05 |
| | | Graphite | kg | 4.46E-05 | lognormal | 1.25E+00 | 2.85E-05 | 6.98E-05 |
| | | Acrylonitrile butadiene styrene | kg | 1.66E-05 | lognormal | 1.25E+00 | 1.06E-05 | 2.60E-05 |
| | | Lubricating oil | kg | 4.98E-08 | lognormal | 1.25E+00 | 3.18E-08 | 7.79E-08 |
| | | Aniline (Aramid fibers) | kg | 5.08E-06 | lognormal | 1.25E+00 | 3.25E-06 | 7.95E-06 |
| | | Acetic anhydride (Aramid fibers) | kg | 5.60E-06 | lognormal | 1.25E+00 | 3.58E-06 | 8.76E-06 |
| | | Terephthalic acid (Aramid fibers) | kg | 9.13E-06 | lognormal | 1.25E+00 | 5.84E-06 | 1.43E-05 |
| | | Nitric acid (Aramid fibers) | kg | 3.42E-06 | lognormal | 1.25E+00 | 2.19E-06 | 5.35E-06 |
| | | Hydrochloric acid (Aramid fibers) | kg | 1.35E-05 | lognormal | 1.25E+00 | 8.63E-06 | 2.11E-05 |
| | output | Gasket/Sealing unit | unit | 1 | | | | |
| End plate/Frame unit | input | Unalloyed steel | kg | 6.49E-03 | lognormal | 1.22E+00 | 4.36E-03 | 9.67E-03 |
| | | Copper | kg | 7.35E-05 | lognormal | 1.31E+00 | 4.31E-05 | 1.26E-04 |
| | output | Current collector unit | unit | 1 | | | | |
| Manufacturing of Stack | input | Anode unit | unit | 1 | | | | |
| | | Cathode unit | unit | 1 | | | | |
| | | Membrane unit | unit | 1 | | | | |
| | | Cell frame/Bipolar plate unit | unit | 1 | | | | |
| | | Gasket/Sealing unit | unit | 1 | | | | |
| | | End plate/Frame unit | unit | 1 | | | | |
| | | Stainless Steel | kg | 1.87E-03 | lognormal | 1.25E+00 | 1.20E-03 | 2.93E-03 |
| | | Steel processing | kg | 1.87E-03 | lognormal | 1.25E+00 | 1.20E-03 | 2.93E-03 |
| | | Water tank polyethylene | kg | 5.83E-06 | lognormal | 1.25E+00 | 3.73E-06 | 9.12E-06 |
| | | Plastic processing | kg | 5.83E-06 | lognormal | 1.25E+00 | 3.73E-06 | 9.12E-06 |
| | | Electricity per manufacturing | kWh | 9.76E-04 | lognormal | 1.25E+00 | 6.24E-04 | 1.53E-03 |
| | | Heat (to manufacture of the system) | MJ | 1.09E-02 | lognormal | 1.25E+00 | 6.99E-03 | 1.71E-02 |
| | | Steam (to manufacture of the system) | MJ | 8.71E-05 | lognormal | 1.25E+00 | 5.57E-05 | 1.36E-04 |
| | output | AWE stack | unit | 1 | | | | |

**Table 9.** Summary of uncertainty levels for each module in the AWE stack

| Module | Major input | Range of unit | Uncertainty (GSD) range |
|---|---|---|---|
| Anode unit | nickel plate | 3.35 | very high |
| Cathode unit | Ni-plated sheet, Aluminum | 1.25～3.08 | medium-hign |
| Membrane unit | Polyphenylene sulfide (PPS), Polysulfone (PSF), N-methyl-2-pyrrolidone (NMP) | 1.15～1.31 | low |
| Cell frame/Bipolar plate | Stainless steel, Carbon steel | 1.25～1.88 | medium |
| Gasket/Sealing unit | Polytetrafluoroethylene (PTFE), Graphite | 1.25 | low |
| End plate / Frame unit | Unalloyed steel, Copper | 1.22～1.31 | low |
| Manufacturing of Stack | Electricity, Heat, steam | 1.25 | low |

데이터에 문서화하였다.

AWE stack 1 unit 생산의 LCI 데이터는 Table 8에 나타내었다. 모듈별 입력 데이터의 불확도를 요약하면 Table 9와 같다. 모듈별 기하표준편차(GSD)는 1.11～3.35 범위로 나타났으며, Ni plate와 같은 금속계 투입물에서 가장 높은 불확도가 관찰되었다. 이러한 불확도는 문헌 간 기술 조건, 단위 환산 과정에서 발생한 변동 및 표본 수의 불확도 반영에 기인한 것으로 판단된다. 예를 들어 Anode unit 원자재 Nickel plate에 대한 문헌 A 데이터는 평균의 약 26% 수준으로, 다른 문헌 대비 낮은 극단값을 보이며, 높은 기하표준편차(GSD)의 원인으로 판단된다. 이러한 극단값의 영향을 완화하기 위한 일관된 통계적 접근이 필요해 보인다.

AWE 스택 LCI 데이터 전체의 불확도를 평가하기 위해 Table 8에 제시된 기하표준편차(GSD)를 openLCA 소프트웨어에 입력하여 몬테카를로 시뮬레이션(10,000회 반복)을 수행하였다(Fig. 1).

시뮬레이션 결과 기후변화 환경영향(GWP) 평균

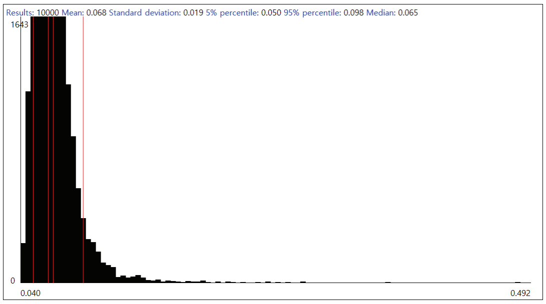


**Fig. 1.** Monte Carlo simulation results (10,000 iterations) for the climate change impact (GWP) of AWE stack production for the functional unit of 1 kg hydrogen

은 0.068 kg$CO_2$eq/FU, 표준편차는 0.019, 95% 범위는 0.050～0.098 kg$CO_2$eq/FU로 나타났다. 모듈별 분산 기여도는 anode unit이 46.8%, cathode unit이 21.0%를 차지하였으며, 원자재 기준으로는 nickel이 전체 분산의 70.9%를 차지하였다.

LCI 데이터 전체의 상대표준편차(relative standard deviation)는 27.9%로 ILCD의 데이터 품질 지침에서 규정한 매우 낮은 품질(very poor) 수준으로 평가되었다. ILCD 데이터 품질 지침은 상대표준편차가 25%를 초과하면 매우 낮은 품질(very poor)로 규정하고 있다[3]. 이러한 결과는 AWE 스택 데이터의 전체 불확도가 anode 및 cathode unit의 원자재인 nickel 데이터 품질에 크게 의존함을 의미한다.

Table 8에서 nickel의 기하표준편차(GSD)가 3.0 이상으로 높게 나타났으며, 이는 문헌 데이터의 편차가 크기 때문으로 분석되었다. 그러나 추가적인 실험 또는 문헌 데이터 수집의 한계로 인해, 본 연구에서는 로그공간에서 중앙값으로부터 가장 먼 값을 제외하는 "1-trim 규칙"을 적용하였다. 이 절차에 따라 기하평균(GM)과 기하표준편차(GSD)를 재산정하고, 이를 이용해 AWE 스택 데이터의 불확도를 다시 평가하였다(Fig. 2).

그 결과, GWP 평균값은 0.068 → 0.073 kg$CO_2$eq/FU로 약 7.3% 증가하였으나, 표준편차는 0.019 → 0.0088로 감소하였다. 상대표준편차는 27.9%에서 12.1%로 크게 개선되어, ILCD 기준에서 보통(fair) 수준으로 평가되었다.

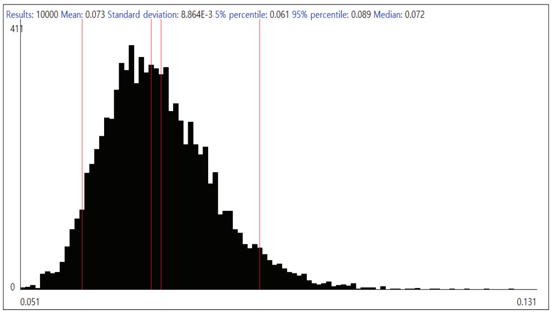


**Fig. 2.** Monte Carlo simulation results (10,000 iterations) by adjusted GSD of nickel input for the climate change impact (GWP) of AWE stack production for the functional unit of 1 kg hydrogen

따라서, 본 연구에서 제시한 1-trim 기반 불확도 보정 절차는 소표본 문헌 데이터의 불확도를 정량적으로 개선할 수 있는 실용적인 접근임을 확인하였다. 이러한 절차를 통해 구축된 AWE 스택의 LCI 데이터는 향후 수소기술 전반의 환경성 평가 및 데이터베이스 품질 향상에 기여할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 문헌 기반 데이터를 활용한 수전해 기술용 AWE 스택의 LCI 데이터을 구축하고, 각 데이터의 불확도를 정량적으로 평가하였다. 패디그리 매트릭스를 이용하여 계산된 기하표준편차(GSD)를 openLCA에 입력하여 몬테카를로 시뮬레이션(10,000회 반복)을 수행한 결과, 전체 LCI 데이터의 기후변화 영향(GWP) 평균값은 0.068 kgCO₂eq/FU, 상대표준편차(RSD)는 27.9%로 나타나 매우 높은 불확도를 보였다. 분산 기여도 분석 결과, anode unit과 cathode unit이 전체 분산의 약 68%를 차지하였으며, 특히 원자재 중 nickel이 70.9%로 주요 불확도 원인으로 확인되었다.

이러한 결과는 문헌 기반 데이터에서 표본 수가 적고 자료의 이질성이 높은 경우, 개별 데이터의 신뢰성 부족이 전체 시스템 불확도에 크게 영향을 미친다는 점을 시사한다. 이에 따라 본 연구는 로그공간에서 중앙값으로부터 가장 멀리 떨어진 값을 제거하는 1-trim 규칙을 적용하여 극단값의 영향을 완화하였다. 이 방법을 적용한 재분석 결과, GWP 평균은 0.073 kgCO₂eq/FU로 7.3% 증가하였으나, 표준편차는 0.019에서 0.0088로 감소하였고, 상대표준편차는 12.1%로 개선되어 ILCD 지침에서 보통(fair) 수준으로 평가되었다.

따라서, 본 연구에서 제안한 1-trim 기반 불확도 보정 절차는 문헌 기반 소표본 LCI 데이터의 불확도를 합리적으로 저감할 수 있는 실용적 방법으로 확인되었다. 다만, 1-trim 규칙은 모든 소표본 데이터에 적용될 수 있는 것은 아니며, 이상치가 명확히 식별되는 경우에 데이터 특성을 충분히 고려하여 적용해야 한다. 향후에는 동일한 접근을 수전해 외의 수소 생산 및 연료전지 시스템 등 다른 수소 기술에도 확대 적용하여, 데이터 품질의 일관성을 확보하고 국가 차원의 수소 LCI 데이터베이스 구축에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

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

## References

1. B. P. Weidema and M. S. Wesnæs, “Data quality management for life cycle inventories—An example of using data quality indicators”, Journal of Cleaner Production, Vol. 4, No. 3-4, 1996, pp. 167-174, doi: https://doi.org/10.1016/S0959-6526(96)00043-1.
2. B. P. Weidema, C. Bauer, R. Hischier, C. Mutel, T. Nemecek, J. Reinhard, C. O. Vadenbo, and G. Wernet, “Overview and Methodology—Data Quality Guideline for the ecoinvent Database Version 3”, Ecoinvent Report No.1(V3), Ecoinvent Centre, St. Gallen, Switzerland, 2013, Retrieved from https://support.ecoinvent.org/hubfs/Knowledge%20Base/Database/Fundamentals/dataqualityguideline_ecoinvent_3_20130506.pdf.
3. European Commission, “ILCD Handbook: General Guide for Life Cycle Data”, Joint Research Centre, Ispra, Italy, 2010, Retrieved from https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ilcd.htm.
4. A. Ciroth, G. Fleischer, and J. Steinbach, “Uncertainty calculation in life cycle assessments”, International Journal of Life

Cycle Assessment, Vol. 9, No. 4, 2004, pp. 216-226, doi: https://doi.org/10.1007/BF02978597.
5. S. M. Lloyd and R. Ries, "Characterizing, propagating, and analyzing uncertainty in life-cycle assessment: a survey of quantitative approaches", Journal of Industrial Ecology, Vol. 11, No. 1, 2007, pp. 161-179, doi: https://doi.org/10.1162/jiec.2007.1136.
6. C. L. Mutel and B. P. Weidema, "Documentation of Changes Implemented in Ecoinvent Uncertainty Data", Ecoinvent Report Series, Ecoinvent Centre, Zurich, Switzerland, 2019, Retrieved from https://support.ecoinvent.org/.
7. F. R. Hampel, E. M. Ronchetti, P. J. Rousseeuw, and W. A. Stahel, "Robust Statistics: The Approach Based On Influence Functions", Wiley, New York, USA, 2005, doi: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118186435.
8. V. Barnett and T. Lewis, "Outliers in Statistical Data (3rd ed.)", Wiley, New York, USA, 1994, Retrieved from https://www.wiley.com/en-us/.
9. R. Bhandari, C. A. Trudewind, and P. Zapp, "Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis – a review", Journal of Cleaner Production, Vol. 85, 2014, pp. 151-163, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.048.
10. K. Bareiß, C. de la Rua, M. Möckl, and T. Hamacher, "Life cycle assessment of hydrogen from proton exchange membrane water electrolysis in future energy systems", Applied Energy, Vol. 237, 2019, pp. 862-872, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.001.
11. S. Y. Pan, P. C. Chiang, and J. Ren, "Uncertainty in inventories for life cycle assessment: state-of-the-art", Environmental Progress & Sustainable Energy, Vol. 44, No. 4, 2025, pp. e14644, doi: https://doi.org/10.1002/ep.14644.
12. X. Wei, S. Sharma, A. Waeber, D. Wen, S. N. Sampathkumar, M. Margni, F. Marechal, and J. Vanherle, "Comparative life cycle analysis of electrolyzer technologies for green hydroge n production: Manufacturing and operation", Joule, Vol. 8, No. 0, 2024, pp. 3347-3372, doi: https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.09.007.
13. ISO, "ISO 14044: Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines", International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2006, Retrieved from https://www.iso.org/standard/38498.html.
14. ASTM International, "ASTM E691-19: Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method", ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2019, doi: https://doi.org/10.1520/E0691-19.
15. J. W. Tukey, "Exploratory Data Analysis", Addison-Wesley, Reading, MA, USA, 1977, Retrieved from https://www.consoleflare.com/blog/wp-content/uploads/2022/09/Exploratory-Data-Analysis-1977-John-Tukey.pdf.
16. E. Limpert, W. A. Stahel, and M. Abbt, "Log-normal distributions across the sciences: Keys and clues", BioScience, Vol. 51, No. 5, 2001, pp. 341-352, doi: https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0341:LNDATS]2.0.CO;2.
17. S. Krishnan, B. Corona, G. J. Kramer, M. Junginger, and V. Koning, "Prospective LCA of alkaline and PEM electrolyser systems", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 55, 2024, pp. 26-41, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.192.
18. Clean Hydrogen Partnership, "TEA and LCA of the New AEMWE Technology: Next Generation Alkaline Membrane Water Electrolysers with Improved Components and Materials", Clean Hydrogen Partnership, Brussels, Belgium, 2023, Retrieved from https://zenodo.org/records/8289584.
19. G. Zhao, M. R. Kristensen, H. L. Frandsen, A. C. Wandahl, S. H. Jensen, M. Chen, and C. R. Graves, "Life cycle assessment of $H_2O$ electrolysis technologies", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 45, No. 3, 2020, pp. 23765-23781, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.282.
20. J. Kim, H. Jeong, J. W. Lee, T. Kim, D. Kim, and C. H. Yu, "Impact of risk factors inherent in alkaline water electrolysis on accidents", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 5, pp. 554-562, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.5.554.