

CCU 기술의 전과정평가 수행 가이드라인 비교 연구

임정애, 최지나*

한국화학연구원 CO₂에너지연구센터

A Comparison of Life Cycle Assessment Guidelines for Carbon Capture and Utilization (CCU) Technologies

Jungae Lim, Jina Choi*

CO₂ & Energy Research Center, Korea Research Institute of Chemical Technology (KRICT)

ABSTRACT

With the acceleration of global Net-zero goals, Carbon Capture and Utilization (CCU) technologies are increasingly recognized for their potential to mitigate greenhouse gas (GHG) emissions through the conversion of captured CO₂ into value-added products. Life Cycle Assessment (LCA) is widely regarded as a critical tool for evaluating the net environmental impacts of CCU technologies. However, inconsistencies in methodology across existing guidelines limit their comparability and policy relevance. This study presents a systematic comparison of five major CCU-specific LCA guidelines developed by the United States (NETL, 45Q Addendum), the European Union (LCA4CCU), the Global CO₂ Initiative (GCI), and Korea (KRICT). The analysis focuses on key methodological components, including goal and scope definition, system boundaries, functional units, data quality requirements, and impact assessment metrics. The results reveal substantial variation in how these guidelines address key issues such as multifunctionality, displacement effects, and data uncertainty, particularly in relation to low Technology Readiness Level (TRL) technologies. The study highlights the imperative for harmonized, CCU-specific LCA frameworks to ensure environmental integrity, increase transparency, and effectively inform policy mechanisms such as subsidy structures and certification schemes. Recommendations are provided to update and align Korea's existing LCA guideline with international best practices, thereby supporting robust decision-making in the deployment and regulation of emerging CCU technologies.

Key words: carbon capture and utilization (CCU), life cycle assessment (LCA), LCA guidelines, global warming potential (GWP)

요 약

세계적으로 탄소중립(Net-zero) 목표가 가속화됨에 따라, 포집된 이산화탄소(CO₂)를 경제적 가치를 지닌 제품으로 전환하는 탄소 포집 및 ·활용(carbon capture and utilization, CCU) 기술이 온실가스 감축 및 탄소 자원화의 유망한 수단으로 주목받고 있다. 최근 들어 전과정평가(life cycle assessment, LCA)는 CCU 기술의 온실가스 감축효과를 평가하는 핵심 도구로 널리 활용되고 있으나, CCU LCA 가이드라인 간의 방법론적 불일치는 결과의 비교 가능성과 정책 활용성을 제한하는 요인으로 작용하고 있다. 이에 본 연구는 미국, 유럽연합(EU), Global CO₂ Initiative(GCI), 그리고 한국에서 개발 · 공개된 총 5개의 CCU 특화 전과정평가 지침을 체계적으로 비교 · 분석하였다. 분석은 연구 목적, 시스템 경계 및 기능단위, 데이터 품질 요건, 환경영향 평가 지표 등 핵심 방법론 요소를 중심으로 수행되었다. 그 결과, 다기능성 처리, 대체효과(displacement effect) 반영 방식, 그리고

Date Received: Sep. 15, 2025, Date Revised: Nov. 24, 2025, Date Accepted: Nov. 27, 2025

* Corresponding author : Jina Choi, Tel: +82-42-860-7396 E-mail: jchoi@kRICT.re.kr

© Copyright 2025 The Korean Society for Life Cycle Assessment. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

특히 기술성숙도(TRL)가 낮은 CCU 기술에 대한 불확실성 처리 접근법에서 가이드라인 간 유의미한 차이가 존재함을 확인하였다. 이는 CCU 기술의 환경적 당위성 확보, 평가 결과의 투명성 제고, 그리고 보조금 제도나 인증 체계와 같은 정책 수단으로의 효과적인 연계를 위해서는 CCU 특화 전과정평가 프레임워크의 국제적 조화가 필요함을 시사한다. 아울러, 한국에서 향후 CCU 기술의 도입과 규제에 있어 보다 신뢰성 있는 의사결정을 지원하기 위해서는 기존에 개발된 국내 CCU 전과정평가 가이드라인을 국제적 모범사례에 부합하도록 개선할 필요가 있다.

주제어: 이산화탄소 포집 및 활용 기술, CCU, 전과정평가, 가이드라인

1. 서 론

이산화탄소 포집·저장·활용(carbon capture, utilization and storage, CCUS)기술은 기후변화 대응 및 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 핵심 기술로 부각되고 있다. CCUS 기술은 크게 산업공정이나 발전소 등에서 배출되는 이산화탄소를 포집하여 지하에 영구적으로 저장하는 이산화탄소 포집·저장(carbon capture and storage, CCS) 기술과 포집된 이산화탄소를 경제적 가치를 지닌 제품이나 제품의 원료로 활용하는 이산화탄소 포집·활용(carbon capture and utilization, CCU) 기술로 구분할 수 있다. CCS 기술은 배출된 이산화탄소의 포집 및 격리·저장함으로써 탄소의 순증가를 억제하는데 중점을 두는 반면, CCU 기술은 포집한 이산화탄소를 청정 연료, 화학제품, 건설 자재 등 경제적 가치를 지닌 제품으로 전환함으로써 탄소의 순환적 이용에 중점을 두고 있다. 이러한 CCU 기술은 공정 및 제품의 탄소발자국을 저감하거나 기존 제품을 대체하는 역할을 통해 간접적인 온실가스 감축효과를 기대할 수 있다[1-2].

특히, e-Fuel과 같이 재생 에너지 기반의 수소와 결합한 CCU 연료 시스템은 탈탄소화가 어려운 산업 부문에 대한 효과적인 보완 수단으로서의 가능성이 크게 주목받고 있다.

그러나, CCU 공정은 포집 및 전환 단계에서 상당한 에너지를 필요로 하며, 이에 따라 새로운 온실가스 배출이 발생할 수 있다는 잠재적 한계를 내포하고 있다. 따라서 CCU 기술이 실제로 탄소중립에 기여하기 위해서는, 기술 도입으로 인한 순 온실가스 저감 효과를 정량적으로 평가하는 것이 매우 중요하다[4,5]. 최근 시행된 ‘이산화탄소 포집 수송 저장 및 활용에 관한 법률’에서는 CCU 기술 및 제품에 대한 인증 제도를 통하여 CCU 기술을 통한 탄소의 순환적 활용을 제도적으로 독려하고 있으며, 인증의 기준으로 감축효과 및 상용화 가능성을 제시한 바 있다.

이러한 맥락에서 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)는 CCU 기술의 환경적 기여도를 객관적으로 검토하고, 기술 간 비교 및 정책 수립에 필요한 과학적 근거를 제공하는

주요 수단으로 활용되고 있다[6]. LCA는 원료 채굴부터 제품 사용 및 폐기 단계에 이르기까지 전과정에서의 자원 소비와 환경 영향을 정량적으로 분석하는 도구로서, 시스템 경계 및 에너지-물질 흐름이 복잡한 CCU 기술의 특성상 필수적인 평가 도구로 간주된다[7].

그러나, 현재까지 CCU 기술에 특화된, 전과정평가 방법론 또는 가이드라인 표준은 아직까지 확립되어 있지 않다. 동일한 CCU 기술을 대상으로 수행된 여러 LCA 연구들 간에도 기능 단위 설정, 시스템 경계 정의, 다중기능성(multifunctionality) 해결 방식 등에서 접근법이 달라 결과의 비교 가능성과 해석의 일관성이 저해되어 있는 실정이다. 이러한 방법론적 불일치는 CCU 기술의 환경편익을 명확히 입증하는데 어려움을 초래하며, 정책입안자 및 투자자들이 정보에 기반한 의사결정을 내리는 데 주요한 장애요인으로 작용할 수 있다.

이에 따라, 유럽연합(EU), 미국에너지부(Department of Energy, DOE) 산하 국립에너지기술연구소(National Energy Technology Laboratory, NETL), Global CO₂ Initiative(GCI) 등 국가 및 기관에서는 CCU 기술과 관련한 LCA 방법론의

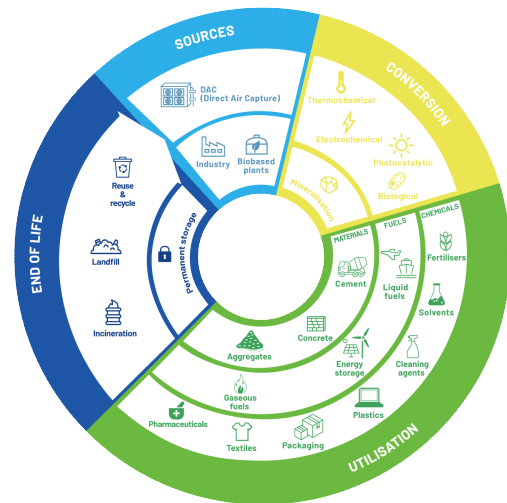


Fig. 1. Concept of carbon capture and utilization (CCU) technology [3].

표준화를 강조하며 자체적인 가이드라인을 개발하고 있다. 국내에서도 한국화학연구원을 중심으로 2019년 CCU 기술을 대상으로 한 전과정평가 가이드라인이 개발된 바 있으나, 국제 기준과의 연계성 및 보완 필요성이 제기되고 있다.

본 연구는 미국과 유럽을 중심으로 기개발된 주요 CCU 전과정 평가 가이드라인을 체계적으로 비교·분석하고자 한다. 특히 전과정평가의 핵심 단계인 목표 및 범위 설정, 기능단위, 시스템 경계, 할당 방식, 데이터 품질, 영향 범주 선정 등에 대한 각 가이드라인의 접근 방식과 주요 차이점을 도출하고, 이를 바탕으로 향후 국내에서 CCU 기술과 관련한 인증 제도 및 환경성 평가 표준 수립에 기여할 수 있는 시사점을 제공하고자 한다.

2. CCU 기술 전과정평가에서의 고려사항

전과정평가는 CCU 기술의 온실가스 감축효과를 객관적으로 정량화할 수 있는 핵심수단으로 여겨지고 있다. 그러나 CCU 기술은 본질적으로 공정 간 에너지·물질 흐름이 복잡하며, 다양한 외부 조건에 따라 환경 성과가 달라질 수 있으므로, 정확한 환경성 평가를 위해서는 기술의 고유한 특성에 대한 이해가 선행되어야 한다.

2.1 순 온실가스 감축량 평가의 복잡성

CCU 기술은 포집된 이산화탄소를 유용한 제품으로 전환함으로써 직접적인 온실가스 감축 효과를 기대할 수 있으며, 동시에 기존 화석 기반 제품을 대체함으로써 간접적인 감축효과도 발생시킬 수 있다. 그러나, 이산화탄소의 포집, 정제, 압축, 수송 및 전환 각 공정에서는 상당한 에너지와 보조물질이 소요되며, 이에 따른 새로운 온실가스 배출이 발생할 수 있다. 따라서, CCU 기술이 실질적인 감축 기술로 기능하는지 여부는 이러한 직·간접적 배출과 감축 요소를 모두 포함하는 시스템 전반의 정량적 분석을 통해 평가되어야 한다. 아울러, 비교 대상으로 설정되는 배경 시나리오의 구성에 따라 CCU 기술의 환경성 평가 결과가 크게 달라질 수 있으므로, 시나리오 설정의 타당성 확보 또한 매우 중요하다. 즉, CCU 기술의 실질적인 온실가스 감축효과는 시스템 경계 및 시나리오 설정에 따라 감축 여부 및 감축효과가 크게 달라질 수 있다.

2.2 다기능성에 따른 구조적 복잡성

대부분의 CCU 시스템은 다기능성을 내포하고 있다. 전력, 철강, 석유화학, 시멘트 산업시스템에서는 본래의 주 생산물을

생산함과 동시에 이산화탄소를 배출하고, 이렇게 배출된 이산화탄소를 원료로 활용하여 새로운 제품을 추가적으로 생산하는 구조를 가진다. 이러한 복잡한 구조는 기능단위 설정, 시스템 경계 정의, 환경 부하 할당 방식 등 LCA 핵심 절차에 있어 상당한 복잡성을 초래한다. 예를 들어 Fig. 2에서는 발전 시스템에 메탄올을 생산하는 CCU 시스템을 포함시킬 경우, 다기능 처리방식(시장가치기준 할당, 질량 기준 할당, 시스템 확장 또는 대체 접근법 등)과 이산화탄소를 어떤 가치를 가진 것으로 간주하느냐에 따라 전과정평가 결과가 달라짐을 보여주고 있다. 전기와 메탄올을 생산하는 CCU 시스템을 비-CCU 시스템과 비교하는 시스템 확장의 경우, CCU 시스템은 $759 \text{ kg CO}_2\text{-eq./FU}_{\text{system}}$ 이며, 비-CCU 시스템은 $1,835 \text{ kg CO}_2\text{-eq./FU}_{\text{system}}$ 으로, CCU 시스템이 온실가스 배출량을 59% 줄여주는 것으로 나타났다. 그러나, 동일한 시스템에 할당을 적용하는 경우, 할당 방식(exergy, 경제적가치-무로, 제품으로 취급, 폐기물로 취급 등)에 따라 각 제품(전기과 메탄올)의 지구온난화 영향(GWP)이 $66\sim 187 \text{ kg CO}_2\text{-eq./FU}_{\text{electricity}}$ 사이, $572\sim 693 \text{ kg CO}_2\text{-eq./FU}_{\text{CH}_3\text{OH}}$ 로 크게 달라지는 것을 확인할 수 있다.

ISO 14044 표준에서는 할당을 가급적 회피하고, 시스템 확장(system expansion)을 적용할 것을 권고하고 있다. 그러나, 전과정평가의 목적(기술 평가, 제도 연계, 인증 등)에 따라 다른 접근방식을 선택될 수 있으며, 이러한 경우 CCU 시스템의 다기능성으로 인해 LCA 결과가 크게 달라질 수 있음을 인지하고 분석 목적과 기술 맥락에 맞는 적절한 방법론 선택이 요구된다.

2.3 낮은 기술성숙도와 데이터 불확실성

현재 대부분의 CCU 기술은 비교적 낮은 기술성숙도(technical readiness level, TRL)에 머물러 있으며, 이는 전과정 평가 수행 시 주요 한계로 작용한다. 낮은 TRL 단계에서는 상업적 운전조건 하의 공정 데이터 확보가 어렵고, 규모가 확대될 때 발생할 수 있는 기술적 변화와 환경 영향의 불확실성이 크다. 이러한 요인들은 LCA 결과에 중대한 영향을 미칠 수 있으며, 궁극적으로 결과의 신뢰도를 저하시킬 수 있다. 따라서, 이러한 CCU 기술에 대한 전과정평가를 수행할 때에는 민감도 분석(sensitivity analysis) 및 불확도 분석(uncertainty analysis)을 통해 결과의 신뢰도를 보완하는 절차를 중요하게 고려하여야 한다.

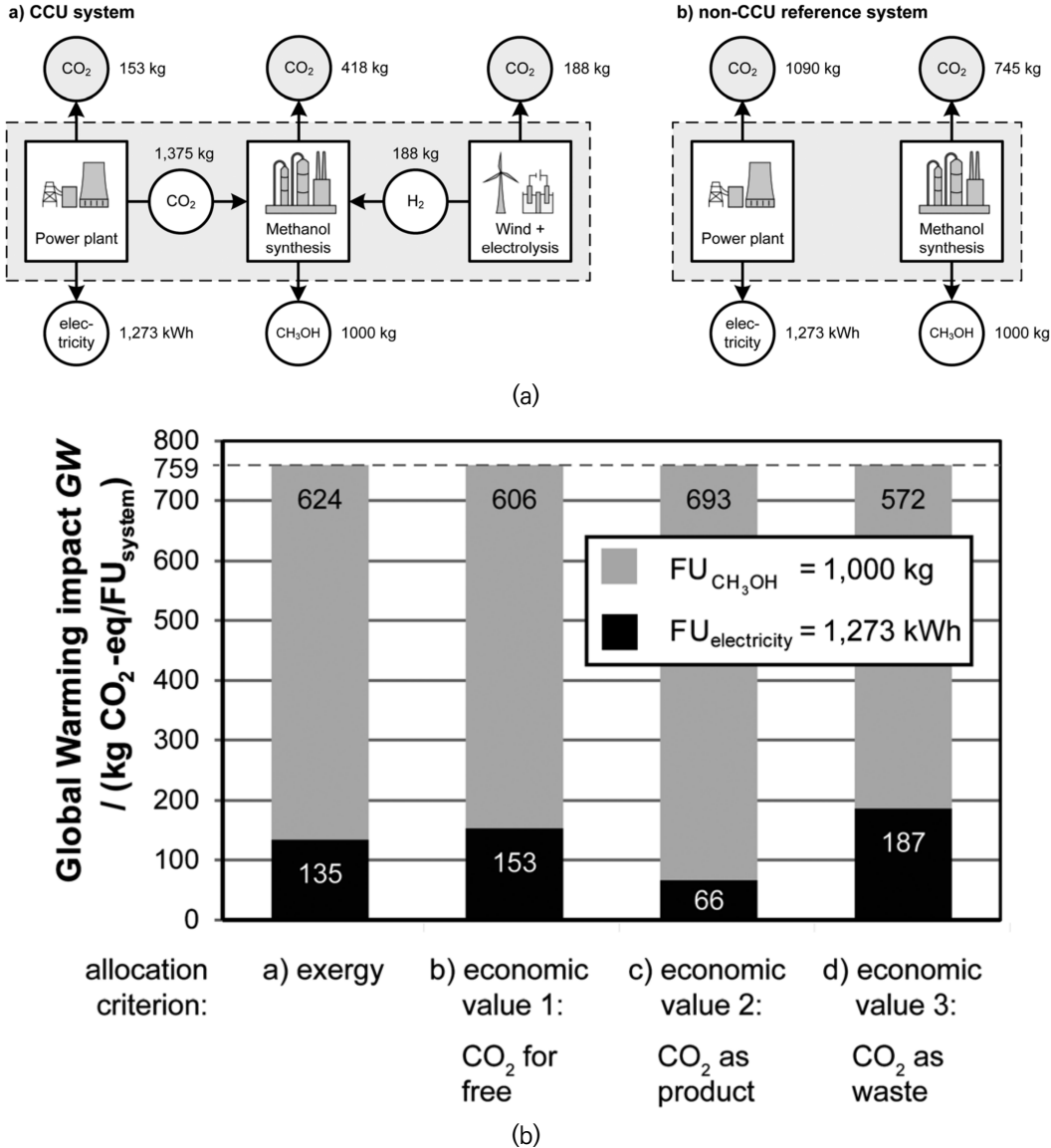


Fig. 2. (a) Flowchart and flow quantities for CCU system producing electricity and methanol from CO₂, (b) Allocated global warming impact (GW) values for electricity and for methanol as products from the CCU system [4].

2.4 이산화탄소 기원 및 에너지원의 결정적 영향

CCU 공정의 환경 성과는 이산화탄소의 공급원과 에너지원에 따라 크게 좌우된다. 이산화탄소는 산업 공정 배출가스, 바이오매스 기반 또는 직접공기포집(direct air capture, DAC) 등 다양한 경로를 통해 공급될 수 있으며, 각 배출원은 이산화탄소 농도, 순도, 포집 난이도 측면에서 차이를 보인다. 특히, 포집 단계에서 요구되는 에너지와 이에 따른 환경부하는 이산화탄소 배출원에 따라 크게 상이하며, 이는 전체 시스템의 온실가스 배출량에 영향을 미친다. 또한 CCU 공정에 투입되는

전력 및 열원의 생산 방식, 즉 재생 가능 여부에 따라 최종 감축효과의 크기가 달라지므로, 에너지원에 대한 구체적인 고려가 필수적이다.

2.5 제도적 다양성 및 지침 간 비교

최근 CCU 기술이 탄소중립 전략의 일환으로 국제적으로 주목받으면서, 다양한 제도 및 기구에서 기술의 환경 기여도를 공식으로 평가하고자 LCA 기반의 지침서를 개발하고 있다. 이들 가이드라인은 ISO 표준을 공통 기반으로 하나, 제도적

배경과 활용 목적이 달라 주요 평가 범위, 적용 방법 등에서 차이를 보이고 있으며, 이에 따라 동일한 CCU 기술에 대한 전과정평가 결과도 역시 상이하게 도출될 수 있다. 본 연구에서는 국제적으로 활용되고 있는 CCU 기술에 대한 전과정평가 가이드라인들에 대하여 Table 1에서와 같이 제도적 배경 및 목적, 시스템 경계 및 기능단위 정의, 배출저감 산정 및 대체효과 반영 방식, 영향평가 방법론, 데이터 요구수준 및 품질 관리 방법, 다중기능 이슈에 대한 처리 원칙을 중심으로 비교 분석하였다.

3. 분석 대상 CCU 전과정평가 가이드라인

본 연구에서는 Table 2에 정리되어 있는 5종의 CCU 전과정평가 가이드라인을 대상으로 분석을 수행하였다. 각 가이드라인은 각기 다른 제도적 배경과 목적을 기반으로 개발되었으며, LCA 수행 방법과 해석 관점에서 차별성을 가지고 있다.

첫 번째 대상 가이드라인은 미국 에너지부 산하 국립에너지기술연구소(NETL)에서 발행한「Carbon Dioxide Utilization (CO₂U) Life Cycle Analysis Guidance for the U.S. DOE Office of Fossil Energy and Carbon Management Version 2.0 (2022)」이다[8]. 이 지침은 미국 DOE의 CCU R&D 프로그램에 참여하는 프로젝트 수행자들이 일관된 방식으로 LCA를 수행할 수 있도록 구체적인 방법론을 제공한다. OpenLCA 기반 모델링, 시스템 경계 및 기능단위 설정, 데이터 품질 요건, 영향평가 방법 등을 포함하고 있으며, DOE 연구과제 보고 및 기술 검토에 광범위하게 활용되고 있다.

두 번째는 NETL 가이드라인의 추가적인 보완 문서로서, 미국 연방 세액공제 제도인 45Q에 따른 LCA 수행 지침인

「45Q Addendum to the NETL CO₂U LCA Guidance Document Version 2 (2024)」이다[9]. 이 문서는 45Q 세액공제 신청시 요구되는 기능단위, 비교 제품 설명, 시스템 경계 정의, 감축계수(displacement factor) 산정 등의 필수 요소를 상세하고 명확하게 규정하고 있으며, 결과의 투명성 및 신뢰도를 높이기 위한 실무지침으로 사용되고 있다.

세 번째는 유럽연합 집행위원회(European Commission) 주도로 Horizon 2020 프로그램 하에서 개발된 「LCA4CCU, Guidelines for Life Cycle Assessment of Carbon Capture and Utilization (2022)」이다[10]. 이 가이드라인은 ISO 14040/14044를 기반으로 하되, CCU 기술에 특화된 주요 쟁점을 정리하고, 실무적용을 위한 해석과 권고사항을 나열하고 있다. 특히 기능단위의 정의, 시스템 확장, 배출회피 및 할당 문제에 대해 우선순위 또는 권고사항 등을 제시한다.

네 번째는 Global CO₂ Initiative (GCI), RWTH Aachen, TU Berlin, University of Sheffield 등 주요 연구기관이 공동 개발한 「TEA and LCA Guidelines for CO₂ Utilization Version 2 (2022)」이다[11]. 이 문서는 CCU 기술의 경제성과 환경성을 동시에 평가할 수 있도록 기술 경제성 분석과 LCA의 통합적 분석 틀을 제시하고 있다. 아울러, 기술성숙도 별로 차별화된 접근 방식, social LCA, 통합지표 기반의 환경 성과 평가 방법도 포함하는 등 보다 포괄적 접근방식을 보여주고 있다.

마지막으로, 국내에서는 한국화학연구원과 환경산업기술원이 공동으로 개발한 「이산화탄소 전환 기술의 전과정평가 수행 가이드라인(2019)」이다[7]. 본 지침은 국내 연구자들이 CCU 기술의 온실가스 저감 효과 및 환경영향을 정량적으로 평가할 수 있도록 표준화된 LCA 수행 절차 및 예시를 제시하고

Table 1. An analytical framework for comparing CCU LCA guidelines

Category	Description
Background & purpose	Policy and institutional context in which each guideline was developed, including its purpose and intended scope of application.
System boundary and functional unit	Criteria for setting system boundaries and consistency of functional units (e.g., cradle-to-gate, cradle-to-grave).
Multi-functionality	Approaches for handling multi-functionality issues (e.g., system expansion, physical allocation, economic allocation).
GHG reduction accounting	Methods for calculating GHG mitigation, inclusion of avoidance credits, and approaches for defining comparative products.
Impact assessment methodology	LCIA methodology, category selection, and criteria for the use of GWP values.
Data requirement	Data sources, cut-off criteria, representativeness management, and methods for handling uncertainty

Table 2. CCU LCA guidelines used in this study

Title	Country	Objectives & Key Features
NETL CO ₂ U LCA Guidance Ver. 2	USA (DOE/NETL) 2022	Guideline to evaluate CCU projects in the US - Guidance for consistent LCA by CCU projects operator under DOE - Overview of the LCA framework and procedures for conducting and reporting
NETL 45Q Addendum	USA (DOE/NETL) 2024	Policy purpose of supporting tax credit eligibility in the US - Supplementation of CO ₂ U LCA Guideline aligned with the 45Q tax credit - Specification of LCA system, functional unit, reference product definition, and emission reduction calculation methods
LCA4CCU Guidelines	EU (EU Commission) 2022	Common evaluation framework for CCU - Covering a wide range of technological pathways and products - Systematic summary of key LCA issues and considerations based on ISO 14010/14011, with recommendations
GCI TEA/LCA Guideline Ver.2	Global (GCI, RWTH) 2022	General guideline to verify the environmental impact of CCU technologies - Integrated guideline for both techno-economic analysis (TEA) and LCA - Approaches for low-TRL applications, introduction of Social LCA, and integrated indicator-based evaluation
Guideline for CCU LCA	South Korea (KRICT) 2019	Aimed at assessing environmental impact reduction of CCU - detailed LCA procedures and guidelines for quantifying GHG emission for CCU researchers

있으며, 특히 기존 기술과의 비교평가가 가능한 비교 LCA 방법을 포함하고 있다.

이들 가이드라인은 공통적으로 ISO 14040/14044 국제 표준을 기반으로 하나, 시스템 경계와 기능단위 설정 방식, 배출 회피 또는 대체효과 산정 방식, 공동제품 할당 방법, 데이터 품질 수준 등 세부수행 지침에서는 뚜렷한 차이를 보이기도 한다.

4. CCU 기술 전과정평가 가이드라인 비교 분석

앞서 정리한 바와 같이 비교 대상으로 선정한 5종의 가이드라인은 각기 상이한 정책적 배경과 활용 목적을 바탕으로 구성되어 있으며, 각국의 제도적 필요에 따른 LCA 수행 지침으로 활용되고 있다.

4.1 시스템 경계 및 기능단위

기능단위는 LCA 연구의 목적과 범위에 따라 정의되며, 시스템의 성능을 정량화하고 비교 연구에서 공정한 평가 기준을 제공하는데 핵심적인 요소이다. 그러나 이를 CCU 기술의 적용하는 방식에서는 그 구성성에 있어 일부 차이를 보인다.

미국 NETL 「CO₂U LCA Guidance」와 「45Q Addendum」에서는 기능적 동등성이 확보된 경우, 시스템 경계를 Cradle-to-Gate로 축소하여 적용하는 접근을 허용하고 있다. 이는 비교 평가의 유연성을 높이는 동시에 현장 적용의 실효성을 고

려한 것이다. 한국의 「CCU LCA 수행 가이드라인」과 GCI의 「TEA/LCA Guideline for CO₂U」역시 전 생애주기를 Cradle-to-Grave로 보고 있으나, CCU 제품이 기존 제품과 기술적 성능 및 다운스트림 배출이 동일한 경우에는 Cradle-to-Gate 방식을 수용 가능한 범위로 명시하고 있다.

반면, EU의 「LCA4CCU」가이드라인은 Cradle-to-Grave를 원칙으로 하며, Gate-to-Gate 또는 Cradle-to-Gate 접근 방식을 지양할 것을 권고한다. 화학 구조와 조성이 동일한 제품일 경우에도 마찬가지로 설명하고 있다. 예를 들어, 개미산과 같은 이산화탄소 기반의 화합물질은 향후 수소 캐리어와 같은 기존과는 다른 용도로 사용될 가능성이 있으며, 현재와는 다른 폐기 단계 배출 특성을 가질 수 있다.

기능 단위의 원칙은 공통적으로 경제적 가치를 지닌 제품으로 제품 1kg 생산 등 단순 정량 단위로 정의하고 있으나, 가이드라인별로 구체적인 제시 수준에 차이가 있다. 국내 가이드라인에서는 이산화탄소 전환을 통해 가치 있는 제품을 생산하는 행위 자체를 기능으로 간주하며, ‘제품 1kg 생산’ 등 단순 정량 단위를 예시로 들고 있다. 반면, EU의 「LCA4CCU」에서는 Table 3에서 보는 바와 같이 다양한 CCU 제품별로 세분화된 기능 단위 권고안을 제시하고 있다.

또한 GCI 등의 「TEA/LCA Guideline for CO₂U」에서는 환경성 및 경제성 평가 간의 통일성을 위해 동일한 기능단위 적

Table 3. Recommended functional units (FUs) in LCA4CCU guideline [10]

Process	Recommended Functional Unit (FU)
Product: Energy carrier - transportation fuel	1 vehicle km (or 1 tonne km) using a specified means of transport
Product: Energy carrier - other	Define FU quantifying the energy service
Product: Chemical/material-chemically identical	1 kg of product
Product: Chemical/material-chemically different	Define FU based on equal technical performance
Energy storage system	Define FU quantifying the storage characteristics
Comparison of various CCU processes	1 kg of CO ₂ input

용이 중요함을 강조하고 있다. 특히, CCU 제품이 기존의 참조 (벤치마크) 제품과 동일한 화학적 구조 및 조성을 갖는지에 따라 대체품과 비대체품으로 구분하며, 이 구분에 따라 기능단위의 정의 또한 달라진다. 예를 들어 대체품으로 분류되는 경우는 Chemical products, Material products, Fuels, Energy storage system 등으로 세분화하고 있으며, 기능 단위는 질량 또는 에너지 기준으로 정의하도록 안내하고 있다. 반면, 비대체품의 경우 참조(벤치마크) 제품과 화학적으로는 다르지만, 동일한 용도를 수행할 수 있는 CCU 제품을 의미하며, 이 경우 기능 단위는 제품의 성능(product performance)을 기준으로 설정하도록 권고하고 있다. Table 4에 해당 가이드라인에서 제시하고 있는 CCU 대체품, 비교 기준, 기능단위 및 참조 흐름의 예시를 정리하였다.

4.2 다기능성 처리 및 배출저감 효과 산정

대부분의 지침은 ISO 14044에 기반하고 있으므로, 다기능성(multi-functionality) 처리에 있어서도 기본적으로 할당을

회피하고, 시스템 확장(System expansion)을 적용할 것을 권고한다. 할당을 피할 수 없는 경우에는 물리적 기준을 우선적으로, 경제적 기준을 차선의 방법으로 제시하고 있다. 대표적으로 GCI 가이드라인은 이산화탄소를 포집·제공하는 원래의 제품생산 시스템을 반드시 시스템 경계에 포함할 것을 제안하고 있으며, 다기능성 문제 해결을 위한 공정 세분화(sub-division)을 최우선적으로 적용할 것을 권고한다. 그러나, 이산화탄소 제공원(source)의 경우에는 주생산물과 공동으로 배출되기 때문에 공정 세분화가 원칙적으로 불가능하며, 이 경우 시스템 확장 방식을 적용할 것을 제시하고 있다. 다만, 제품 탄소발자국 등 특정 제품 단위의 전과정평가를 수행해야 하는 경우에는 Fig. 3에서 보는 것과 같이 대체를 고려한 시스템 확장(system expansion via substitution)을 우선적으로 적용하도록 제안하며, 할당 방식을 최후의 수단으로 제시하고 있다.

이와 같이 탄소 포집 및 활용(CCU, carbon captured and utilization)기술의 탄소배출 저감 측면에서의 환경적 유익성은 기존 제품을 대체함으로써 발행하는 배출 회피량을 환경적 이

Table 4. Recommended functional units (FUs) in TEA/LCA guideline for CO₂U [11]

Properties CCU class	Substitutes				Non-substitutes
	Chemical products	Material products	Fuels	Energy storage system	All
Basis for comparison	Mass	Material performance	Energy	Storage performance	Service or performance provided
Functional unit	e.g., Mass, plant output	e.g., Mass, plant output	e.g., Energy, mass, plant output	e.g., Energy, plant output	Compare performance of new versus existing solutions
Reference flow	e.g., 1 t methanol, 1.6 Mt/a plant output	e.g., 1 t concrete, 50 kt/a plant output	e.g., 1 MJ of H ₂ , 2.5 Mt/a diesel output	e.g., storing 1 MJ of electricity, 80 MWh battery	e.g., 1 t, 1 MJ, output of a plant

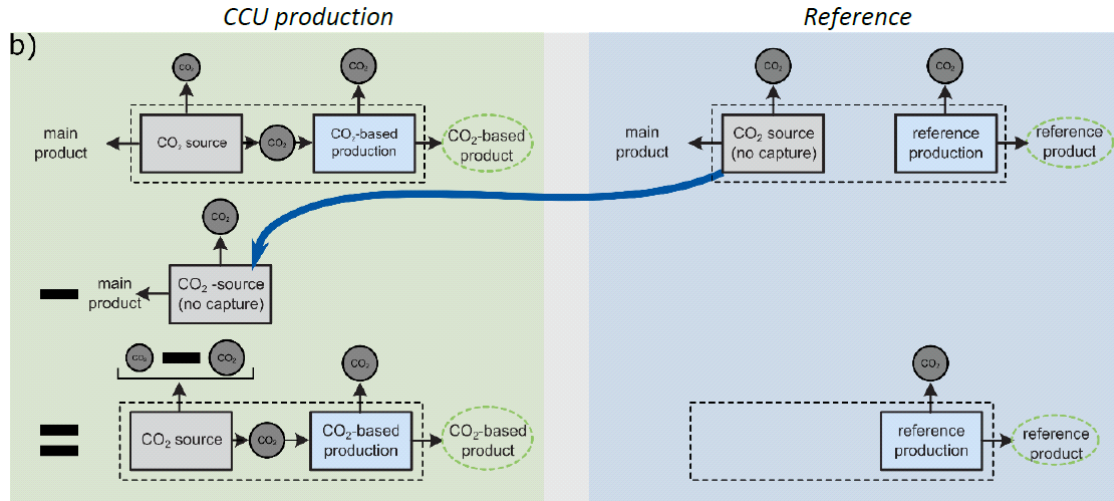


Fig. 3. System expansion via substitution: The production of the main product without carbon capture is avoided, and thus CCU system is credited for the otherwise emitted CO₂, but has to carry the burdens of purification, compression, and transportation of the CO₂ [11].

점으로 간주하는 방식이 널리 채택되고 있다. 이는 특히 CCU 기반 제품이 동일 기능의 기존 화석 기반 제품을 완전히 대체할 수 있다는 전제 하에 해당 대체로 인해 회피되는 온실가스 배출량을 정량적으로 산정하고 있다.

그러나, 이에 대한 해석 방식은 지침별로 차이를 보인다. 유럽 연합의 「LCA4CCU」 가이드라인에서는 비교 시스템 선정의 중요성을 강조하며, 단일 대체 시나리오에 의존하는 평가 방식의 한계를 지적하고 있다. 이에 따라 복수의 대체 시나리오를 탐색하고 그 결과에 기반하여 결과의 신뢰성과 견고성을 확보할 필요가 있다고 제안하고 있다. 한편, NETL 「45Q Addendum」에서는 미국 45Q 세액 공제제도가 탄소를 포집하여 저장한 경우뿐만 아니라, 활용을 통해 탄소의 대기 배출을 회피한 경우도 공제 대상으로 포함하고 있다는 점에 기반하여 DF(displacement factor)라는 지표를 도입하고 있다. 즉, 제안된 CCU 제품 시스템과 기존 비교 시스템 간의 전주기 감축 잠재력을 정량적으로 평가하는 방식을 채택하고 있으며, DF는 단위 질량 또는 단위 기능의 CCU 제품이 기존 제품을 대체할 때 회피되는 온실가스 배출량(tCO₂eq)으로 정의된다. 예를 들어, CCU 기반 메탄올 1톤이 기존 화석 기반 메탄올 1톤을 완전히 대체할 경우, 해당 대체로 인해 발생하지 않게 되는 온실가스 배출량이 DF가 된다.

45Q LCA의 핵심 지표는 LC 45Q DF(Life Cycle 45Q Displacement Factor)로, 이는 포집 이산화탄소 산화물 1톤에 대해 회피된 탄소배출량의 비율을 나타낸다. 이 지표는 다음 두가지 방식 중 하나로 산정될 수 있다. GWP 영향 결과를 포

집 이산화탄소 산화물의 1톤으로 환산한 경우, 수식 1을 사용하며, GWP 영향 결과를 기능단위로 확장하여 계산한 경우 수식 2를 사용해야 한다.

(수식 1) GWP 영향 결과를 포집 이산화탄소 산화물의 1톤으로 환산한 경우;

$$LC\ 45Q\ DF = \frac{\text{Proposed Product system GWP Impact} - \text{Comparison Product System GWP Impact}}{1\ \text{metric ton carbon oxide captured and utilized}} \times (-1)$$

(수식 2) GWP 영향 결과를 기능단위로 확장하여 계산한 경우;

$$LC\ 45Q\ DF = \frac{\text{Proposed Product system GWP Impact} - \text{Comparison Product System GWP Impact}}{\text{Amount of carbon oxide captured and utilized per functional unit}} \times (-1)$$

따라서, DF 지표는 단순한 이산화탄소의 활용 여부를 넘어서, 해당 활용 제품이 기존 제품을 얼마나 효과적으로 대체했는지를 수치적으로 입증하는 것이 필수적이다. 이는 CCU 기술이 온실가스 감축기여도를 확보하기 위해 반드시 해결해야 할 핵심 검토 항목 중 하나라고 볼 수 있다.

4.3 전과정 영향평가 방법론

전과정평가(life cycle assessment, LCA)의 LCIA(Life Cycle Impact Assessment) 단계에서 어떠한 환경영향 평가 방법론을 선택하느냐는 LCA 결과 해석에 영향을 미친다. 분

석 대상인 각 가이드라인은 공통적으로 지구 온난화 잠재력(global warming potential, GWP)을 핵심 환경 영향 범주로 설정하고 있으며, 이에 대한 정량적 산정은 필수적인 요소로 간주된다.

미국 NETL CO₂U LCA Guidance에서는 IPCC 제5차 평가보고서(AR5)를 기준으로 한 100년 기준의 지구온난화지수(GWP-100)를 필수적으로 산정해야 함을 명시하고 있으며, 추가적으로 20년 기준(GWP-20)의 분석 및 온실가스 외 환경 영향 범주에 대한 평가도 권고하고 있다. 이 경우, 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)에서 개발한 TRACI(Toxic Release Inventory-based Impact Assessment Method) mid-point 영향평가 방법론을 사용할 것을 제안하고 있다.

유럽 연합의 「LCA4CCU」가이드라인은 기후변화(GWP) 외에도 다른 환경 영향 범주를 필수적으로 고려하도록 제안하고 있다. 단일 영향 범주에만 초점을 맞출 경우, 잠재적 환경 부담의 전가(risk shifting)가 발생할 가능성이 있기 때문에 가능한 많은 환경 영향 범주를 함께 고려할 것을 권장하고 있다. 더불어, CCU 분야의 낮은 TRL 수준과 전과정평가 수행 사례가 충분히 다양하지 않다는 점을 고려하여 가능한 많은 환경 영향범주를 분석할 것을 주장하고 있다. 해당 가이드라인에서는 Acidification, Climate Change (biogenic, fossil, land), Ecotoxicity: freshwater (inorganics, metals, organics), EF-particulate Matter, Eutrophication (marine, freshwater, terrestrial), Human toxicity: cancer (inorganic, metals, organics), Human toxicity: non-cancer (inorganics, metals, organics), Ionizing radiation: human health, Land use, Ozone depletion, Photochemical ozone formation: human health, Resource use: fossil, Resource use: minerals and metal, Water use 등의 환경 영향 범주를 모두 포함하고 있으며, 국제 Environmental Produce Declaration (EPD) 시스템과의 조화를 고려하여, mid-point 기반의 CML 영향평가 방법론을 권고하고 있다. 지구온난화 영향의 경우, GWP-100과 GWP-20을 모두 고려하여 단기 및 장기적 영향을 균형 있게 반영해야 함을 명시하고 있다.

한편, 국내 이산화탄소 전환기술 전과정평가 수행 가이드라인은 국가 환경성적표지(eco labeling) 제도와와의 조화를 고려하여 환경부에서 제시하는 7가지 환경영향 범주 (지구온난화, 자원 고갈, 산성화, 부영양화, 광화학적 산화, 오존층 고갈, 생태 독성)에 대한 평가를 제시하고 있다.

4.4 데이터 요구사항

데이터 요구사항과 관련하여, 미국 NETL 가이드라인은 ISO 14044에 근거하여 기술적, 지리적, 시간적 대표성을 확보할 것을 요구하며, 데이터의 정밀성, 완전성 및 불확실성에 대한 분석을 수행해야 함을 강조하고 있다. 특히, Table 5에서 보는 바와 같이 기술성숙도(technology readiness level, TRL) 단계별 LCA 수행 수준을 나누어서 제안하고 있다.

또한 지리적 대표성과 관련하여 모든 CCU 프로젝트는 기본적으로 미국 내 생산 및 소비를 전제로 설정되며, 공급망 정보가 명확할 경우 해당 지역 데이터를 사용하고, 불명확할 경우 미국 평균 데이터를 사용하는 방식으로 분석할 것을 제시하고 있다. 시간적 대표성은 CCU 프로젝트의 운영 기간을 30년으로 간주하여 건설부터 폐기까지의 배출을 고르게 분배하여 반영하도록 하고 있으며, 탄소 저장에 100년 이상 지속되는 경우에만 영구 저장으로 인정할 수 있음을 명시하고 있다.

데이터 수집 시 컷오프 기준은 질량, 에너지, 환경적 중요성이라는 세 가지 측면을 복합적으로 고려하도록 하고 있으며, 누적 기여 기준은 99% 이상을 반영해야 함을 제시하고 있다. 이는 질량 등의 단일 기준만으로 컷오프를 할 경우, 실제 에너지 소비량 및 환경 영향이 큰 요소가 누락될 위험이 있기 때문에 이를 방지하려는 조치로 해석된다.

한편, 유럽 연합의 「LCA4CCU」에서는 핵심 데이터 품질은 결과 해석의 신뢰성과 직결되므로, CCU 기술과 같은 복잡하고 기술 특화적인 시스템에서는 핵심 데이터의 정확성, 현실성, 대표성이 필수적이라 명시하고 있다. 핵심 데이터의 품질이 낮거나 해당 기술을 정확히 반영하지 못하는 경우, 전과정평가의 여러 단계 (업스트림, 다운스트림 등에 영향을 미치며, 분석 결과의 일관성과 타당성을 저해할 수 있기 때문이다. 이때, 핵심 데이터로 간주되는 투입물, 에너지 사용, 공정 효율 등 관련 데이터는 각각 상이한 불확실성과 가정에 기반하므로, 데이터 수집 및 활용 과정에서 구체적 검증과 보완 작업이 병행되어야 한다고 강조하고 있다. 또한 핵심 데이터는 단일 공정의 정보에 국한되지 않으며, 원료 확보 경로에 대한 전과정 데이터뿐만 아니라, 사용 단계 및 제품 폐기·처리와 같은 시스템의 경계 외부 요소에 대한 데이터도 함께 고려해야 한다고 명시하고 있다. 이는 기술적 경계 조건이 불분명한 CCU 기술은 시나리오 분석 또는 민감도 분석을 통해 보완할 수 있도록 하는 조치이며, 불확실성이 높은 변수의 경우 몬테카를로 분석을 통해 정량적으로 해석하도록 권고하고 있다. Fig. 4는 CCU 기술의 전과정평가지 요구되는 데이터의 타입 및 그와 관련한 주의 사항 등을 보여주고 있다.

Table 5. LCA expectations based on TRL of the project

TRL	Key requirements and best practices
1~4 (Lab-level research)	Screening-level life cycle greenhouse gas analysis - Contribution and sensitivity analysis shall be used to assess opportunities for improvement - 1-3 shall demonstrate the potential to have lower GHG emissions than the Comparison Product System with identified research areas/actions to reduce the GHG emissions. TRL 4 LCAs must demonstrate the project has a lower life cycle GHG emission profile than the comparison product system. Comparison Product System shall be modeled based on the level of known market information.
	Industry standard or proxy data are considered acceptable for TRL 1-3.
5~6 (Scale-up demonstration)	Project-level life cycle greenhouse gas analysis At this stage in the technology development, knowledge from the scale-up demonstrations shall be used to inform the LCA modeling, site specific conditions shall be used where applicable (known), and the scale of technology market potential shall be considered (consequential effects of market scale).
7 (Commercial scale system demonstration)	Project-level life cycle greenhouse gas analysis - Same as 5-6 Scale-up Demonstration requirements. Expectation is to update the technical performance and site-specific knowledge to validate real-world performance.
8 (Commercial scale learning)	Project-level life cycle greenhouse gas analysis - Modeling assumptions shall reflect real-world conditions based on primary data collection from commercial scale system demonstration.

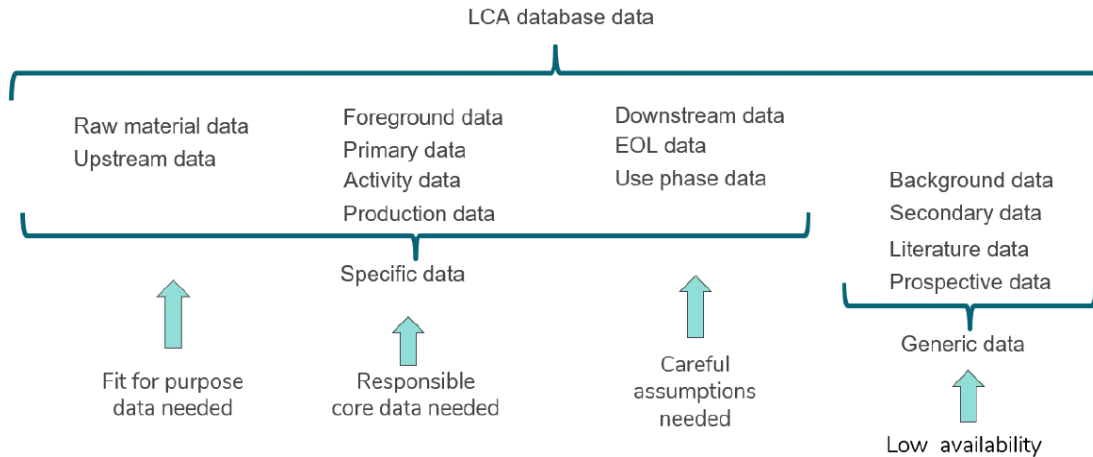


Fig. 4. Type, sources and nature of different data needed in an LCA for CCU [10].

GCI 등의 「TEA/LCA Guideline for CO₂U」역시 데이터 품질은 CCU 기술에 대한 신뢰성, 현실성 및 정책적·산업적 통찰력을 확보하는데 핵심적인 요소임을 강조하고 있다. 신뢰할 수 있는 평가 결과를 도출하기 위해서는, 대상 기술의 공정 조건과 운전 특성을 충실히 반영하는 고품질 핵심 데이터와 함께, 전 과정에 걸친 대표성을 갖춘 시스템 경계 밖에서 획득한 배경 데이터의 결합이 필수적으로 요구된다. 특히, CCU 기술은 대부분 낮은 TRL을 가지고 있기 때문에 실험적 데이터 확

보가 제한적이고, 자료의 품질 또한 불균일할 수 있으므로, 데이터 수집 단계에서부터 품질 요구사항에 대한 명확한 정의, 수집 과정의 추적성 확보, 그리고 전반적인 문서화 절차를 요구하고 있다. 또한, 모델링 및 평가 전반에 걸쳐 데이터, 시스템 경계, 할당 방식, 시나리오 가정 등에서 발생할 수 있는 불확실성 요소에 대해 투명하게 보고하고, 민감도 분석 및 불확도 분석을 수행하여 결과의 신뢰성을 검토하도록 제안하고 있다. 특히, 낮은 TRL을 갖는 기술의 경우, 그 평가 결과는 본질

적으로 높은 불확실성을 수반하기 때문에, 분석 결과는 예비적 (Preliminary) 성격을 가지며, 실제 기술 적용과의 괴리를 최소화하도록 가정 및 조건을 명확히 설정해야 함을 명시하고 있다. Table 6은 각 가이드라인별 데이터 품질기준과 관련한 항목을 정리하였다.

5. 결론 및 시사점

탄소중립 목표가 세계적으로 가속화되면서 이산화탄소 포집 및 활용 (CCU) 기술은 포집된 이산화탄소를 고부가가치 제품으로 전환함으로써, 온실가스 감축에 기여할 수 있는 핵심 기술로 주목받고 있다. 이러한 CCU 기술의 온실가스 감축효과를 포함한 환경적 기여도를 정량적으로 평가하기 위해 전과정평가가 필수적인 도구로 활용되고 있으나, 현재 국제적으로 표준화된 가이드라인이 부재한 상황에서 각국 및 기관이 독자적으로 개발한 가이드라인을 사용하고 있는 실정이다. 이에 따라 여러 가이드라인 간의 방법론적 불일치가 발생하고, 이는 CCU 기술의 환경성 평가 결과에 대한 비교 가능성과 정책적

활용성에 한계를 초래한다.

본 연구는 미국, 유럽, Global CO₂ Initiative (GCI) 및 한국에서 개발한 5종의 주요 CCU 전과정평가 가이드라인을 체계적으로 비교 분석하였다. 분석 결과, 시스템 경계 설정, 기능단위 정의, 데이터 품질 기준, 배출 저감효과 산정 방식, 영향평가 항목 등 핵심 요소 전반에서 접근 방식뿐 아니라, 권고 기준 또한 상이하였으며, 제시된 내용의 상세성 면에서도 뚜렷한 차이가 존재하는 것으로 확인되었다. 특히, CCU 기술의 온실가스 감축효과를 정량화하는 데 있어 시스템 경계 및 시나리오 설정, 데이터 품질 기준이 평가 결과에 미치는 영향이 매우 크며, 기술성숙도(TRL)가 낮은 기술일수록 데이터의 불확실성 및 민감도 분석의 중요성이 더욱 강조되는 것으로 나타났다.

국내에서는 2019년 처음으로 CCU 전과정평가 가이드라인이 개발되었으며, 이는 국제 기준에 기초한 기본적인 틀을 마련한 성과로 평가될 수 있다. 그러나, CCU 기술의 다양성, 그리고 정부 주도의 CCU 기술·제품 인증제도 추진 등의 제도화 흐름을 고려할 때, 기존 가이드라인의 내용적 보완이 필요하다고 볼 수 있다. 이에 본 연구의 분석 결과를 바탕으로, 국

Table 6. Comparative analysis of data quality

Guideline	Data Requirement				
	Data representativeness	Data completeness	Data collection (database)	Uncertainty analysis	Data quality
NETL CO ₂ U LCA Guidance	Technology, geographical, temporal	99% Cut-off criteria based on mass, energy, environmental significance	NETL CO ₂ U openLCA LCI DB	Mandatory sensitivity analysis	Qualitative
45Q Addendum	Technology, geographical, temporal	Completeness shall be demonstrated by the inclusion of at least 99% of the carbon inputs and outputs	Document data sources, representativeness, and limitations	Uncertainty analysis is not required	-
LCA4CCU Guideline	Background data quality documented (age, technology, quality, consistency)	Company/technology specific data needed (no benchmarks)	Identify CCU data gaps, Ensure soft-ware independent format	Ensure transparency, Report uncertainties using quantitative and qualitative methods	-
GCI TEA/LCA Guideline	Technology, geographical, temporal	The desired level of completeness and applied cut-off criteria shall be clearly described.	Document data sources, representativeness, and limitations	Basic approach using sensitivity analysis and scenario analysis required, intermediate approach using uncertainty analysis) recommended	TRL, Scenario-based qualitative analysis
Domestic LCA Guideline for CCU	Technology, geographical, temporal	95% Cut-off criteria	Data sources shall be categorized as measured, calculated, estimated, or guessed	Uncertainty analysis recommended	Quality grade (A~C grade)

내 가이드라인 개선을 위한 주요 시사점을 다음과 같이 도출하였다.

첫째, 시스템 경계 설정 원칙의 명확화가 요구된다. 현재는 연구 목적에 따라 Cradle-to-Gate 또는 Cradle-to-Grave 방식을 모두 허용하고 있으나, CCU 기술의 순 온실가스 감축 효과를 포괄적으로 평가하고 국제적인 신뢰성을 확보하기 위해서는 Cradle-to-Grave 방식을 원칙으로 설정하되, Cradle-to-Gate 적용 시에는 명확한 근거 자료를 요구하는 기준으로 마련되는 등 경계 설정 원칙에 대한 가이드라인을 명확하게 설명할 필요가 있다. 아울러, 다기능 이슈 처리와 관련해서도 제품 중심의 전과정평가를 수행할 경우의 원칙을 다시 한번 검토하고 정립할 필요가 있다.

둘째, 기능 단위 정의의 구체화와 다양성 반영이 필요하다. 현재 국내 가이드라인은 ‘제품 1kg 생산’과 같은 단순 정량 단위만을 제시하고 있으나, 국제 가이드라인에서는 제품 용도와 특성에 따른 세분화된 기능 단위를 권고하고 있다. 이에 따라 CCU 기술의 제품별 용도와 성능을 반영한 기능단위를 제시함으로써, 혁신적인 CCU 제품의 환경적 우수성을 정량적으로 비교하고 탄소발자국 평가의 신뢰성을 제고할 수 있다.

셋째, 기술성숙도(TRL) 수준에 따른 데이터 품질 요구사항의 차등화가 필요하다. 현행 국내 가이드라인은 기술적, 지리적, 시간적 대표성을 포함한 포괄적인 데이터 품질 기준을 제시하고 있지만, TRL이 낮은 기술에 대한 구체적인 차등 지침은 미비하다. 따라서, TRL 단계별로 평가 수준 및 데이터 품질 요건을 명확히 구분하고, 특히 초기단계 기술의 대해서는 민감도 분석 및 불확도 분석을 필수적인 평가 절차로 포함시켜, 평가 결과의 예비적 성격과 불확실성을 투명하게 보고하는 체계를 갖추어야 한다. 또한, 높은 TRL 단계의 CCU 프로젝트의 경우, 현장 기반 핵심 데이터의 정확성과 대표성을 반영할 수 있도록 평가 지침을 보완할 필요가 있다. 넷째, 다중기능성 해결 방법과 배출 저감효과 산정 방식의 일관성 확보가 요구된다. 특히, CCU 기술의 회피 배출량에 대한 평가 기준이 명확히 정립되어야 하며, 미국의 45Q 세액공제 제도에서 활용되는 Displacement Factor (DF)와 같은 정책 연계 지표 도입을 검토할 필요가 있다. 이와 함께, CCU 기술이 탄소제거(negative emission) 기술로 오인되지 않도록 용어 사용에 주의가 필요하며, CCU 기술의 감축효과를 정책적으로 활용하기 위한 명확한 정의와 해석 기준이 마련되어야 한다.

마지막으로, 환경영향 평가 항목의 확장과 방법론의 구체화가 필요하다. 현재는 국내 환경성적표지 제도와의 조화를 고려하여 6가지 영향 범주를 중심으로 평가가 이루어지고 있으나, 국제적 평가 수준과 신뢰성 확보를 위해서는 보다 다양한 환

영향 범주를 포함하고, 이에 대한 정량적 평가 기준을 명확히 해야 한다.

결론적으로, 국내 CCU 전과정평가 가이드라인은 국제 사회의 신뢰성을 확보할 수 있도록 체계적으로 보완되어야 하며, 이는 CCU 기술의 탄소발자국 인증제도, 세제 혜택, 보조금 정책 등 제도화와의 연계를 가능케 하는 필수적인 기반이 될 것이다. 이러한 고도화 작업은 궁극적으로 국내 CCU 산업의 경쟁력을 제고하고, 탄소중립 실현을 위한 과학적이고, 실효성 있는 제도적 토대를 강화하는 데 기여할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부 및 환경부의 재원으로 한국연구재단 및 한국환경산업기술원의 글로벌 탄소규제 대응 통합관리 기술개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임. (RS-2025-02308870 & RS-2025-02213131).

References

1. Son, K., Chung, H., Kim, J., Ryu, J.R., Min, Y.-j., Kim, S., Lee, H., Park, J. Research on greenhouse gas emission impact and methodology of captured CO₂ on ethylene production. *Journal of Climate Change Research* 16(3-1), pp. 477-485 (2025).
2. IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change., Cambridge University Press, pp. 1161-1244 (2023).
3. CO₂ Value Europe. What is CCU? CO₂ Value Europe. <https://co2value.eu/what-is-ccu/> (accessed 22 August 2025).
4. von der Assen, N., Jung, J., Bardow, A. Life-cycle assessment of carbon dioxide capture and utilization: avoiding the pitfalls. *Energy & Environmental Science* 6(9), pp. 2721-2734 (2013).
5. Korea Institute of Energy Research. Planning Report for the CCU Integrated Process Technology Development Project for Carbon-Cycle Refinery Product Production (Public Version). (2020). [Korean Literature]
6. Cruz, T.T.d., Perrella Balestieri, J.A., de Toledo Silva, J.M., Vilanova, M.R.N., Oliveira, O.J., Ávila, I., Life

- cycle assessment of carbon capture and storage/utilization: From current state to future research directions and opportunities. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 108, 103318 (2021).
7. Korea Research Institute of Chemical Technology, Guidelines for Conducting Life Cycle Assessment of Carbon Dioxide Conversion Technologies, (2022). [Korean Literature]
8. NETL. Carbon Dioxide Utilization Life Cycle Analysis Guidance for the U.S. DOE Office of Fossil Energy and Carbon Management. U.S. DOE National Energy Technology Laboratory: Pittsburgh, USA (2022).
9. U.S. Department of Treasury. 45Q Addendum. Washington, DC, USA (2020).
10. European Commission. LCA4CCU - Deliverable MJ032 0862ENN. Publications Office of the European Union: Luxembourg (2021).
11. Langhorst, T, McCord, S., Zimmermann, A., Muller, L., Cremonese, L., Strunge, T., Wang, Y., Zaragoza, A. V., Wunderlich, J., Marxen, A., Armstrong, K., Buchner, G., Katelhon, A., Bachmann, M., Sternberg, A., Michailos, S., Naims, H. Winter, B., Roskosch, D., Faber, G., Mangin, C., Mason, F., Stokes, G., Williams, El., Olfe-Krautlein, B., Styring, P., Schomacker, R., Bardow, A., Sick, V. Techno-Economic Assessment & Life Cycle Assessment Guidelines for CO₂ Utilization (Version 2), Global CO₂ Initiative (2022).