

직접대기탄소포집 및 활용(DACCU) 기술 기반 탄소크레딧 사업화 방법론 도출을 위한 정책적 연구

오상진*[†] · 오채운**[†] · 이민아*** · 이상영****

*국가녹색기술연구소 전략기획센터 선임연구원, **국가녹색기술연구소 정책연구본부 데이터정보센터 책임연구원,
한국표준협회 기후환경센터 전문위원, *전북대학교 경영학과 조교수

Policy research to formulate project methodologies for carbon credits with direct air carbon capture & utilization (DACCU) technologies

Oh, Sangjin*[†] · Oh, Chaewoon**[†] · Lee, Mina*** and Lee, Sangyung****

*Senior Researcher, Center for Strategic Planning, National Institute of Green Technology, Seoul Korea

**Principal Researcher, Center for Data Information, Division of Policy Research,
National Institute of Green Technology, Seoul, Korea

***GHG Verifier, Climate & Environment Center, Korean Standards Association, Seoul, Korea

****Assistant Professor, Department of Business Administration, Jeonbuk National University, Jeonju, Korea

ABSTRACT

Direct air carbon capture and utilization (DACCU) technologies have been in spotlight as one of key carbon dioxide removal (CDR) approaches to achieve carbon neutrality. In Korea, public R&D on DACCU technologies started from 2023, and private firms with their own original DACCU technologies have emerged with laboratory- and small-scale demonstration experiences. For DACCU technology to be demonstrated and deployed in a large and commercial scale, the development and application of project methodologies are essential to calculate mitigation outcomes in carbon market. However, the actual practices of developing project methodologies for DACCU technologies remain limited in Korea with only two cases, one successful and the other unsuccessful in the methodology approval. Thus, this paper compares these two cases to identify points to be considered in the development of project methodologies for DACCU technologies. For an analytical approach, this paper sets six core elements of measurement-reporting-verification (MRV): (i) system boundary, (ii) baseline scenario, (iii) data quality, (iv) additionality (other than environmental additionality), (v) permanence and reversal risk, and (vi) alignment with international standards. Two rounds of in-depth written surveys were undertaken with two Korean firms. As analytical results, points of consideration include defining a comprehensive system boundary definition (including upstream emissions), setting a zero baseline for removal activities, obtaining a long-term and continuous measurement data, and ensuring compatibility with international standards. Firms' strategic methodology development and the government's targeted policy support for the methodology development are essential.

Key words : Direct Air Carbon Capture and Utilization (DACCU), Carbon Dioxide Removal (CDR), Measurement-Reporting-Verification (MRV), Project Methodology, Carbon Market

†Corresponding author : rurouni628@gmail.com, chaewoon.oh@gmail.com
(National Institute of Green Technology, 14th floor, Yeouido Post Tower,
60, Yeouinaru-ro, Yeongdeungpo-gu, Seoul 07328, Korea. Tel.
+82-2-3393-3987)

ORCID 오상진 0000-0003-4782-7016
오채운 0000-0003-1357-5519

이민아 0000-0001-5476-5234
이상영 0000-0003-4489-4133

Co-lead author: Oh, Sangjin and Oh, Chaewoon

Received: March 5, 2026 / Revised: March 31, 2026 / Accepted: April 20, 2026

1. 서론

최근 대기 중 이산화탄소를 직접 포집한 후 매체(자연 또는 상품)에 내구성 있게(durably) 저장하여 이산화탄소를 제거(CDR, carbon dioxide removal)하는 접근법이 감축 활동으로 부상하고 있다(IPCC, 2022, p. 1796). CDR 접근법에는 다양한 옵션들이 존재하는데 그중에서도 화학적 접근법의 일환으로 직접대기탄소포집 및 활용(DACCU, Direct Air Carbon Capture and Utilization) 기술이 있다(IPCC, 2022, p. 1796; Oh et al., 2024). 동 기술은 대기 중에 있는 400ppm의 저농도 이산화탄소를 직접 포집하여 지중·해양과 같은 자연매체가 아닌 상품 매체에 저장하는 기술로 정의할 수 있다(Oh et al., 2024). DACCU 기술과 관련하여, 북미와 유럽을 중심으로 다수의 민간 기업과 스타트업이 기술 개발과 사업화에 참여하고 있다(Trendafilova, 2025). 이러한 흐름 속에서 DACCU 기술은 연구·개발 단계와 소규모 실증 단계를 넘어, 대규모 실증 및 상업화 사업 단계로 진입하고 있다(Song and Oh, 2023). 이에 따라 DACCU 기술을 적용하여 ‘제거’의 효과성을 객관적으로 입증하는 측정(measurement)·보고(reporting)·검증(verification)이라는 MRV 체계의 중요성이 최근 들어 크게 강조되고 있다.

MRV는 사업 활동으로 인해 발생하는 온실가스 배출량 및 제거량을 체계적으로 측정하고 관련 데이터를 수집·보고하며, 독립적인 제3자에 의해 검증하는 일련의 절차를 의미한다(UNFCCC, 2024). 특히 DACCU와 같이 기술 집약적이고 공정 복잡성이 높은 제거 기술의 경우, MRV는 감축 성과의 신뢰성과 제도적 수용성을 좌우하는 핵심 요소로 작용한다. DACCU 기술을 확보하는 것과 더불어, 해당 기술이 실제로 온실가스 감축에 기여하는지를 객관적으로 검증할 수 있는 감축사업 방법론을 개발하고 입증하는 과정은 매우 중요하다. 감축사업 방법론이란, 온실가스 감축량 또는 흡수량(또는 제거량)의 계산 및 모니터링을 하기 위하여 적용하는 기준, 가정, 계산방법 및 절차 등을 의미한다(KLIC, 2024).

DACCU 기술 사업의 MRV에 대한 기존 연구는 단독으로 이루어지기보다는 대부분 CDR 접근법을 포괄하여 이루어지고 있다. 기존 연구는 크게 네 가지로 구분될 수 있다. 첫째는 MRV의 역할과 중요성을 강조하는 연구이다. 둘째는 다양한 CDR 접근법 별로 적용되어야 할

MRV 체계의 특성에 대한 연구로, DAC 관련 기술에 특화된 MRV 연구도 최근 진행되고 있다. 셋째, CDR 접근법의 MRV 체계를 도출할 때 고려해야 할 다양한 항목들을 정의 및 구체화하고, 동 항목들을 CDR 접근법에 전반적으로 적용해 보는 연구이다. 넷째, CDR 접근법에 대한 MRV 방법론을 개발 및 적용할 때 소요되는 비용에 대한 연구이다.

우리나라에서도 DACCU 기술에 대한 연구가 시작되었다. 공공 R&D의 경우, 아직 원천기술 개발 단계이고 이제 막 소규모 실증을 시작하는 단계인 바, 사업화 방법 도출은 아직 시기상조일 수 있다. 한편, 민간 R&D의 경우, DACCU에 대한 자체 기술을 개발하고, 이를 토대로 탄소시장의 감축 크레딧을 확보하기 위해 사업 방법론을 개발하고 이를 탄소시장에 실제로 제출하고 있다. 대표적이면서도 유일한 사례로 로우카본社와 카본에너지社가 있다. 로우카본社는 우리나라 의무적 탄소시장인 ‘한국에너지공단 배출권거래제 외부사업’에 지난 2022년 자체 방법론을 제출하였고, 방법론이 승인되지는 못했다. 카본에너지社는 우리나라의 자발적 탄소시장인 ‘대한상공회의소 탄소감축인증표준(KCS, KCCI Carbon Standard)’에 방법론을 제출하였고,¹⁾ 그 결과 방법론이 승인 및 등록되었다. 최근, DACCU 기술에 대한 관심이 증폭되면서 DACCU 기술에 기반한 스타트업들이 등장하고 있고, 일반 기업들은 탄소중립을 달성하기 위해 제거 결과물에 관심을 갖고 있다. 따라서, DACCU 기술에 기반한 사업화의 수요가 증대하고 있으나, 문제는 사업화의 가장 핵심 요건인 사업 방법론을 개발하고 이를 승인받는 것이 쉽지 않다는 것이다. 특히, 국내보다 해외에서의 DACCU 기술 사업 수요가 크다는 점을 감안한다면, 국제적으로 공인된 사업 방법론을 승인받는 것이 필요하다. 국제적인 상황을 살펴보면, DACCU 기술 기반의 제거(removal) 사업 방법론은 의무 탄소시장에서는 아직 승인된 사례가 없다. 대신, 미국의 베라(Verra)와 스위스의 골드스탠다드(Gold Standard)와 같은 자발적 탄소시장의 경우,²⁾ DACCU 기술에 대한 사업방법론이 승인 또는 검토중에 있다. 그러나, 우리나라 DACCU 기업 중에서 국제 탄소시장에 방법론을 제출한 사례는 아직 없다. 이러한 상황에서, 국내에서 DACCU 기술 사업화를 위한 MRV 체계 및 관련 사업 방법론 개발에 대한 정책 연구는 아직 진행되고 있지 않다.

1) 대한상공회의소를 중심으로 ‘탄소감축인증센터(KCCI, Carbon Reduction Certification Center)’가 설립되어 기업의 자발적 감축활동에 대한 방법론 인증과 크레딧 발행을 위한 플랫폼이 운영되고 있다(KCS, 2025).

2) 이들 기관은 독립적인 인증 주체로서 자발적 온실가스 감축 프로젝트의 등록·검증·인증 서비스를 제공하고 있다.

이에, 동 연구에서는 향후 DACCU 기술 사업화를 위한 방법론 개발 시 어떠한 사항들이 고려되어야 하는 지에 대해서 모색해 보고자 한다. 이에, 제2장에서 CDR 접근법 및 DACCU 기술의 MRV 체계에 대한 기존 연구들을 살펴보고, 이 중에서 MRV 체계의 구성 항목들을 토대로 여섯 가지 항목을 도출하고자 한다. 제3장은 제2장에서 도출한 6개 항목을 분석틀로 설정하고, DACCU 기술에 대한 사업화 방법론 개발 및 제출 경험을 보유한 기업인 로우카본社와 카본에너지社를 분석 대상으로 설정하였다. 또한, 이 두 기업에 대한 심층 설문조사가 2회 실시되었으며 이에 대한 조사 및 분석과정이 정리되었다. 그리고 제4장에서는 DACCU 기술에 대한 MRV 체계의 6개 항목을 토대로, 로우카본社와 카본에너지社의 사업 방법론을 비교·분석하고, 그 결과 DACCU 방법론 개발 시 고려 사항들을 도출하고자 한다. 그리고 제5장에서는 동 연구의 내용을 정리하고, 정책적 지원 방향을 도출하고자 한다.

2. 기존 문헌연구

2.1. 이산화탄소제거(CDR) 접근법과 MRV 체계

기후변화 대응을 위한 감축사업을 진행하기 위해서는 MRV 방법론이 필요하다. 기존의 대부분의 감축 사업은 특정 배출원에서 ‘양(+)'의 온실가스 배출량에 대해 배출저감(emission reduction) 기술을 적용하여 저감된 배출량을 계산하는 방법론이 적용된다. 그런데, DACCU 기술과 같은 이산화탄소제거(CDR) 접근법은 대기중에 이미 배출된 이산화탄소를 제거(removal)한다는 점에서 MRV 방법론을 개발할 때 사뭇 다른 접근법이 필요할 수 있다.

CDR 접근법에 대한 MRV 연구는 다양하게 그리고 복합적으로 진행되는데, 이러한 연구들로부터 크게 네 가지 측면들이 추출될 수 있다. 첫째는 CDR 접근법에서 MRV

의 역할과 중요성이 강조되며, 이를 위한 일반적인 정책적 방향이 제시된다는 점이다(Lebling et al., 2024; Mercer and Burke, 2023).³⁾ 즉, MRV는 CDR 접근법의 해당 기술을 활용한 사업에서 이산화탄소 제거량을 정량적으로 보여주기 위한 신뢰성, 투명성, 책임성 차원에서 필요하며, 또한 개발된 MRV의 기준 및 프로토콜은 일관되게 적용 및 유지되어야 한다고 언급된다(Lebling et al., 2024).

둘째, CDR 접근법에 다양한 옵션들이 있는 바, 각 옵션에 적용되는 각각의 MRV의 특성에 대한 연구가 이루어지고 있다. 토지 기반 CDR 접근법의 MRV 상에서 생애주기(lifecycle) 평가,⁴⁾ 해양 기반 CDR 접근법의 MRV 접근법,⁵⁾ DAC 기술에 대한 MRV 접근법 등에 대한 연구이다(Doney et al., 2025; Halloran et al., 2025; van der Spek et al., 2025; Yao and Zhang, 2025). 이러한 연구들은 각 옵션별로 MRV를 도출하는 데에 고려해야 할 핵심 요소들을 다룬다.

셋째, CDR 접근법의 MRV를 도출할 때 고려할 구성 요소들이다. Yao and Zhang (2025)의 경우, 시스템 경계, 기후변화 영향 지표, 베이스라인, 추가성, 영구성, 제거 사업 기간, 다중 기능(multi-functionality), 제거량, 직접·간접 토지 이용 변화, 불확실성 원인 및 방법 등이 제시된다.⁶⁾ Mercer and Burke (2023)의 경우, 저장 기간,⁷⁾ 누출 리스크,⁸⁾ 제거량, CDR 옵션 및 수요, MRV를 채택·변경하기 위한 정책의 존재 여부, MRV 개발 비용 등을 제시한다. 고품질의 CDR 접근법의 제거량을 도출하기 위해서는 베이스라인 기반의 추가성과 영구성이 담보되어야 한다는 점이 강조된다. 더 나아가, 개별 CDR 접근법 옵션이 아니라, CDR 접근법을 전체적으로 적용하는 관점에서 볼 때 고려할 원칙으로, 추가성, 다양한 옵션들의 상대적인 예측가능성, 그리고 다양한 옵션들에 대한 통제·관리 가능성이 제시되었다(Bach et al., 2024).⁹⁾ MRV 차원의 핵심 요소로 영구성과 추가성 외에도 충분성도 제시되었다

3) 정책 방향으로 i) 개발이 부족한 CDR 접근법에 대한 지원 필요, ii) MRV 비용 저감이 필요한 부분을 파악하기 위해 R&D 및 실증 사업 지원 필요, iii) 비지하 저장소 CDR 접근법(godid 비옥화, 조림, 강화된 풍화)의 제거 결과물에 대해 판매자 책임 제도 발전 지원 (예: 탄소 재보험 제도 등), 그리고 iv) 제거 결과물 판매 플랫폼 별로, MRV 최소 기준 개발 필요 등이 제시되었다(Mercer and Burke, 2023).

4) 조림 및 재조림, 바이오차, BECCS, 강화된 풍화 작용이 토지 기반 CDR로 언급된다.

5) 해양 알칼리도 증진, 대기 직접 태양 탄소 포집, 블루카본 생태계 회복, 해양비료화(식물성 플랑크톤 성장), 거대조류 성장, 인공 다운웰링이 포함된다(Doney et al., 2025).

6) 이는 Yao and Zhang (2025)의 p. 11952의 Table 1과 p. 11953의 Table 2를 토대로 추출하였다.

7) 저장 기간은 저장의 영구성(permanence)을 보기 위함이다.

8) 누출(leakage)은 제거(removal) 사업으로 인해 사업 진행 지역 외의 다른 지역 등에서 탄소 누출이 이루어지는 것을 의미한다. 예를 들어 조림·재조림 사업이 이루어지는데, 거주민들이 이동하여 다른 지역의 산림을 벌채하는 경우 누출이 이루어진다고 볼 수 있다.

9) 여기서 추가성은 순 기후이익(net climatic benefits)을 의미하고, 예측가능성은 보다 넓은 지역과 광대한 시간 규모에 걸친 불확실성을 의미한다. 통제·관리 가능성의 영어 원문은 governability로, 우리나라 용어로 바로 치환되지 않아 의역하였다. 통제·관리 가능성은 두

(Grubert and Talai, 2024).¹⁰⁾

넷째는 MRV 방법론을 개발하고 이를 적용하는 데에 소요되는 비용이다. 동 항목이 연구되는 이유는 만약 MRV 방법론 개발과 적용 자체에 상당한 비용이 소요된다면, CDR 접근법의 사업화 자체가 어려워질 수 있기 때문이다(Mercer et al., 2024). 물론 CDR 접근법들이 워낙 다양하기 때문에, 각 접근법의 MRV에 소요되는 절대 비용 및 상대적 비용이 모두 다를 수 있다(Kung et al., 2023, p. 4281).¹¹⁾ MRV 비용을 줄이는 데에 있어 가장 큰 장애요소의 순서로는 규제 불확실성, 모델링 복잡성, 지역 간 표준화의 부족 등으로 나타났다. 따라서, MRV 비용을 줄이기 위한 정책적 방향으로, MRV 지원을 위한 메커니즘의 개발이 정부 차원에서 필요하다는 정책제언이 이루어지고 있다.¹²⁾

따라서, CDR 접근법에 기반하여 사업화를 진행하고자 한다면, MRV 체계를 고려한 방법론을 수립하는 것은 매우 중요하다. 이에 각각의 접근법마다 MRV 수립을 위한 방안과 정책제언들이 이루어지고 있다. 다양한 CDR 접근법의 MRV 체계 수립에 있어 고려되는 요소들 역시 매우 다양하나, 이 중에서 공통적으로 적용되는 원칙적 요소들을 크게 세 가지로 정리해 보고자 한다.

첫 번째는 추가성(additionality)이다. 보다 엄밀히 말하면 환경적 추가성(environmental additionality)이다. 일반적으로, 환경적 추가성은 “어떠한 감축 행동도 그러한 행동이 부재했을 때 발생했을 베이스라인(baseline)과 정량적으로 구별되는 결과로 이어져야 함을 요구”한다(Bach et al., 2024, p. 4). 유엔기후변화협약(UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change) 하에서의 추가성은 등록된 사업 활동으로 인해 발생하는 온실가스 배출 저감 또는 제거의 증가가 사업이 등록되지 않았더라면 발생하지 않았을 것이라는 증명이다(UNFCCC, 2025a). 이는 사업이 일반적인 경영 여건에서 실시할 수

있는 활동 이상의 추가적인 노력임을 증명하는 것을 의미한다(KECO, 2021; Lee, 2025). 우리나라 배출권거래제(K-ETS), 베라, 골드스탠다드, UNFCCC 모두 이 환경적 추가성을 방법론의 필수 요건으로 요구하고 있다(KECO, 2021; Gold Standard, 2025; UNFCCC, 2025b). CDR 접근법 차원에서의 환경적 추가성은 “CO₂ 제거의 순증가량”을 의미한다(Bach et al., 2024, p. 1).¹³⁾ 그런데, 추가성의 핵심은 시장 메커니즘에서 허구적 감축 결과물(크레딧)이 생산되지 않도록 하는 것으로, 즉, 생산되는 감축결과물이 실제 감축 노력을 반영 또는 대표해야 한다는 것이다(Oh et al., 2022, p. 759).

환경적 추가성을 증명하기 위해서는 다양한 세부요소가 필요하다. 우선 명확한 ‘베이스라인 시나리오(baseline scenario)’ 및 ‘프로젝트 시나리오’를 설정하는 것이 필요하다. 베이스라인이란 온실가스 감축사업이 부재할 경우의 배출량에 대한 기준 시나리오이고(Oh et al., 2022, p. 764), 프로젝트 시나리오란 온실가스 감축사업을 실행할 경우의 배출량 시나리오이다. 따라서, 이러한 시나리오를 도출하기 위해서 사전적으로 필요한 것은 감축사업에서 배출량 설정의 대상을 어디까지 보고 포함할 것이냐를 결정하는 ‘시스템 경계(system boundary)’ 설정이다. 시스템 경계는 사업 활동에 의해 영향을 받는 모든 배출원(sources), 흡수원(sinks) 및 저장소(reservoirs)를 포함하여 온실가스 배출 및 제거량을 계산하는 범위를 정의하는 것이다(UNFCCC, 2025b). 이 경계는 무엇을 측정하고 제외할지를 결정하며, 경계 설정이 모호하거나 비일관적일 경우, 감축량의 과대산정 또는 누출의 과소평가로 이어진다(UNFCCC, 2025b). 시스템 경계의 정의는 탄소시장마다 미묘한 차이가 있다.¹⁴⁾ CDR 접근법에서 순 제거량(net removal) 대한 회계처리(accounting) 차원에서 시스템 경계는 매우 중요하며, 이를 위해서는 사업 부지 내의 직접 배출뿐만 아니라 에너지 투입과 자재 소비 등 공급망 전

가지 측면으로 하나는 국경을 넘어 발생하는 부정적 영향의 위험성이고, 다른 하나는 탄소회계의 국제적인 표준화의 어려움을 의미한다(Bach et al., 2024, p.4).

10) 충분성(sufficiency)은 ‘탄소 제거량이 배출량을 진정으로 상쇄하기에 충분한가?’를 의미한다.

11) DAC 기반 기술의 경우, 다른 CDR 접근법에 비해서는 MRV가 상대적으로 좀 쉬울 수 있다. 예를 들어, DACCS 기술에 대한 MRV 절대 비용은 톤당 63 파운드(톤당 12만3천 원)로, 총 비용 대비 MRV 비용은 13%로 나타났다(Mercer et al., 2024, p. 8). 이는 2026년 1월 7일, 영국 1 파운드에 대해 1,952.72원 환율 기준으로 계산되었다(Daum, 2026).

12) 고성능 센서, 원거리 감지 장치, AI 기반 데이터 검증 프로세스 등에 소요되는 비용에 대해 집중적인 자본비(CAPEX) 지원이 필요할 수 있다. 또한, 노동이 많이 소요되는 CDR 접근법의 경우, 인건비에 대해서는 보조금이나 세제 혜택과 같은 운영비(OPEX) 지원이 필요할 수 있다. 자본비 및 운영비에 대한 지원 모두 사업 개발 초기 단계에 이루어질 필요가 있다(Mercer et al., 2024, p. 40).

13) 정의에 대한 영어 원문을 보면, “the net increase of CO₂ sequestration”이다.

14) 파리협정 제6.4조 메커니즘의 경우, 사업자가 ‘통제’하는 요소뿐만 아니라 물질 및 에너지 흐름으로 ‘관련’된 요소까지 의무적으로 포함하도록 규정한다(UNFCCC, 2025c). 이에 반해 우리나라 배출권거래제(K-ETS) 외부사업의 경우, 시스템 경계를 감축사업의 물리적, 지리적 범위 및 사업자의 ‘통제’ 하에 있는 배출원 또는 흡수원으로 정의한다(KECO, 2021). 골드스탠다드는 6.4조 메커니즘의 원칙을

체에서 발생하는 배출량을 차감한 순 제거량을 입증하는 것이다. 이에, 전과정평가(Life Cycle Assessment) 기반의 시스템 경계 설정이 필수적이다(Yao and Zhang, 2025, p. 11951). 동시에, ‘베이스라인 시나리오 방법론’을 설정하고 적용하는 것이 중요하다. 어떠한 베이스라인 방법론을 적용하는가는 향후 베이스라인 설정에 소요되는 비용 그리고 향후 발행되는 배출권 양을 결정하기 때문이다(Oh et al., 2022, p. 764). 마지막으로, 베이스라인 방법론에 기반하여 베이스라인 배출량 및 프로젝트 배출량을 산정하는 과정에서, ‘명확한 데이터’가 필요한 바, 데이터 품질을 독립적인 감사기관을 통해 평가하는 것이 필요할 수도 있다(Hayashi and Michaelowa, 2013).

두 번째 원칙적 요소는 영구성(permanence)이다. 영구성은 제거 활동으로 인해 제거된 온실가스가 대기로 재방출되지 않고 장기간 안전하게 저장되는 특성을 의미한다(UNFCCC, 2024). 이는 제거된 탄소가 얼마나 오랫동안 대기와 격리되는지는 CDR 활동의 환경적 무결성을 결정하는 핵심 전제이다. 탄소 저장소는 지질학적 저장과 같이 수 천 년 이상 유지되는 영구성이 높은 저장소와 산림이나 토양처럼 상대적으로 짧거나 불안정한 일시적 저장소로 나뉜다(IEAGHG, 2024). 이는 ‘새는 양동이(leaky bucket)’ 모델로 비유되기도 한다(Mac Dowell et al., 2022, p. 2234).¹⁵⁾ 따라서, MRV 체계는 해당 기술이 탄소를 얼마나 오래 가둘 수 있는지를 명확히 평가해야 하며, 일반적으로 100년 또는 1,000년 이상의 격리 기간을 기준으로 영구성을 정의하고 있다. 이는 일시적인 저장이 영구적인 기후 해결책으로 둔갑하는 것을 방지하기 위함이다(IEAGHG, 2024; Lebling et al., 2024). 또한, 영구성을 확보하기 위해 ‘역전(reversal)’에 대한 위험관리가 필요함을 의미한다. 역전은 CDR 접근법에 기반한 제거 활동에 의해 대기에서 제거되었던 온실가스가 의도적 또는 비의도적으로 대기로 다시 배출되는 것을 의미한다(UNFCCC, 2024). 저장된 탄소가 대기중으로 방출되는 원인으로는 산불, 병충해, 지질학적 누출, 관리 실패 등 다양하게 존재한다. 이러한 역전 위험

을 감지하고 대응하는 체계가 필수적이다(IEAGHG, 2024). 따라서 MRV는 영구성 관련 장기 모니터링 계획을 포함해야 하며, 만약 역전이 발생할 경우 이를 보상하기 위해 사전에 크레딧의 일부를 적립해두는 버퍼 풀(buffer pool)이나 보험과 같은 재무적 안전장치를 마련하는 것이 필요하다(IEAGHG, 2024; Lebling et al., 2024).

세 번째는 CDR 접근법에 적용할 MRV 체계의 보수성과 수용가능성이다. 먼저, CDR 접근법에 MRV 체계를 수립하고 적용할 때 보수적인 접근이 필요하다. 그 이유는 해양 알칼리화(ocean alkalinity enhancement)나 강화된 암석 풍화(enhanced rock weathering)와 같은 개방형 시스템(open-system) CDR은 광범위한 자연환경에서 탄소 제거가 일어나므로, 직접적인 측정과 검증이 매우 어렵고 불확실성이 높기 때문이다(Halloran et al., 2025; Lebling et al., 2024). 이러한 불확실성을 관리하기 위해 제거량은 불확실한 범위를 고려하여 보수적으로 낮게 산정하고, 배출량은 높게 산정하여 감축 효과가 과장되지 않도록 해야 한다(CDR Mission, 2024; IEAGHG, 2024). 한편, CDR 접근법의 MRV는 동시에 수용가능성을 담보해야 한다. 완벽한 과학적 검증은 이상적이지만 기술적 한계와 막대한 비용으로 인해 현실적으로 불가능할 수 있다. 지나치게 엄격한 MRV 기준은 비용을 급증시켜 CDR 기술의 확장을 저해할 수 있다(Mercer et al., 2024). 따라서 규제 기관, 투자자, 대중 등 이해관계자가 신뢰할 수 있는 수준의 정확성을 담보하면서도 경제적으로 실행 가능한 수용 가능한 MRV 원칙을 수립하는 것이 중요하다. 이는 완벽함을 추구하기보다, 명확한 불확실성 정량화와 투명한 공개를 통해 신뢰를 구축하는 방향으로 나아가야 함을 의미한다(Halloran et al., 2025).

정리하면, CDR 접근법 하에서 수립·적용되는 MRV 체계는 해당 CDR 접근법이 실제 온실가스 감축에 기여하고 있음을 입증하기 위한 핵심 기반이다. 이에 따라 CDR 접근법에서 MRV에 대한 연구는 MRV의 중요성, CDR 접근법에 속하는 다양한 기술별 MRV 특성, CDR 접근법에

준수하여 ‘관련성’과 ‘완전성’ 원칙에 따라 모든 관련 배출 및 제거를 경계에 포함할 것을 요구하며(Gold Standard, 2025), 특히 경계 설정이 누출(leakage)을 방지하기 위한 핵심 절차를 강조한다(Gold Standard, 2025). 베라는 이와 달리 경계 내 배출을 사업 배출원으로, 경계 밖에서 사업으로 인해 발생하는 배출을 누출로 엄격하게 구분하여 산정하는 접근 방식을 취한다.

15) ‘새는 양동이(leaky bucket)’ 모델은 탄소를 저장하는 방식(저장소)에 따라 그 효과가 얼마나 오래 지속되는 지가 다르다는 점을 설명하기 위한 비유로 설명할 수 있다. 먼저, 첫 번째 양동이는 물을 담아도 전혀 새지 않는 튼튼한 양동이다. 즉 DACCS, BECCS 등과 같이 지질학적 저장과 같은 것으로 한 번만 채우면 다시 신경 쓸 필요가 없는 모델을 의미한다. 다음으로, 두 번째 양동이는 물을 담을 수는 있지만 미세한 구멍으로 인해서 물이 똑똑 떨어진다. 바이오차와 같이 토양에 탄소를 저장하지만 시간이 지나면서 서서히 분해되어 탄소가 다시 대기로 나오는 모델을 의미한다. 마지막으로, 세 번째 양동이는 언제 엮어질지 모르는 양동이다. 즉, 숲이나 토양 탄소 격리처럼 산불이 나거나 병충해와 같은 사고가 나면 저장했던 탄소를 한순간에 다 뱉어내는 모델이다(MacDowell et al., 2022, p. 2234).

공통적으로 적용되는 MRV 구성요소, 그리고 MRV 방법론 개발·적용에 소요되는 비용 등 다양하게 이루어졌다. 이 중에서 CDR 접근법에 적용되는 ‘MRV 구성요소’의 핵심인 세 가지 원칙적 요소에 대해서 살펴보았다. CDR 접근법에 기반해 관련 세부사업을 추진하고자 하는 사업 개발자는 이러한 MRV 체계 상의 요소들을 고려하여 방법론을 개발해야 하는 바, MRV 구성요소는 핵심적인 연구대상이라고 볼 수 있다.

2.2 DACCU 기술 기반 감축사업의 MRV 체계 및 핵심 구성요소

CDR 접근법 중에서도 동 논문에서 중점을 두는 ‘DACCU 기술’ 자체에 대한 MRV 특성 연구는 많지 않다. 그 이유는 CDR 접근법에서 가장 관심을 받는 기술은 조림·재조림, 바이오차, 바이오에너지 탄소포집·저장(BECCS), 강화된 암석 풍화작용(enhanced rock weathering), 그리고 대기 직접탄소포집·저장(DACCS, direct air carbon capture and storage)이기 때문이다. DACCU 기술에 대한 대부분의 연구는 대부분 기술적 준비도 또는 기술의 감축량(감축 잠재량)을 중심으로 한다(Ahmad et al., 2026). 그런데, DACCU 기술 기반 사업화를 위한 실행 기반 등은 마련되고 있다. 먼저, 국가 및 국제적 레벨에서 관련 프로토콜이 준비되고 있다. 국가 레벨에서 유럽, 미국, 캐나다를 중심으로 방법론 개발을 위한 준비가 이루어지고 있는데, 대표적으로 EU는 탄소 제거인증프레임워크(CRCF, Carbon Removal Certification Framework)를 설립하였는데, 여기에 탄소상품저장(carbon storage in products)이 포함되었다(EU, 2024).¹⁶⁾ 국제적 레벨로, 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)의 IPCC 방법론 지침에 DAC 기술이 아직 포함되어 있지 않으나, 2027년에 CDR/CCUS 방법론 보고서 개요에 6권 3챕터에 DAC가 포함되어 있다.¹⁷⁾ 또한, 국가 온실가스 인벤토리 관련 지침에는 CO₂ 저장에 대한 사항이 포함되어 있는 상태다(van der Spek et al., 2025).

DACCU 기술에 대한 MRV와 관련하여, 기존 연구 및 실행기반이 되는 탄소시장 체계의 방법론 현황 등을 토대로 DACCU 기술에 특화된 MRV 요소가 여섯가지로 정리

될 수 있다. 여기서는 환경적 추가성 차원에서 세부적으로 고려되는 시스템 경계 설정, 베이스라인 시나리오와 프로젝트 시나리오 설정 방법론, 데이터 품질을 별도로 구분하고자 한다. 첫째, ‘시스템 경계의 설정’이다. DACCU 기술에서 포집 단계인 대기직접포집(DAC, direct air capture) 기술을 살펴보면, 이 기술 시스템은 고에너지 집약적이며, 전력·열·냉각 등에 사용되는 에너지원의 탄소집약도가 순 감축량을 결정한다. 예컨대 DAC 장치가 1톤의 CO₂를 제거했다라도, 그 과정에서 0.4톤의 CO₂가 간접 배출된다면 순제거량은 0.6톤에 불과하다. 따라서 MRV 체계는 이러한 배출요인을 전력믹스, 연료사용, 그리고 공급망까지 포함해 투명하게 산정해야 하며, 이에 전과정평가 기반의 시스템 경계 설정이 필수적이다(Yao and Zhang, 2025). 즉, 이산화탄소 포집 설비 자체와 운영은 핵심 사업 배출원으로 포함되며, DAC 설비 가동에 필요한 막대한 전력 및 열에너지 생산으로 인한 배출은 모든 표준에서 사업 배출량 또는 누출량으로 경계 내에 반드시 포함되어야 한다(Gold Standard, 2025; Lee, 2025; Verra, 2024). 베라의 DAC 방법론 사례를 보면, DAC 설비(팬, 압축기, 재생, 압축 등)와 투입된 전기/열을 사업 배출원으로 경계에 포함한다(Verra, 2024). 그리고 연료의 업스트림(채굴/운송), 포집 원료(흡착제)의 업스트림(생산/폐기) 배출은 탈루로 구분하여 별도 산정하도록 요구한다(Verra, 2024).¹⁸⁾ 포집 후, 활용 단계의 기술을 살펴보면, 포집한 이산화탄소를 압축 및 운송하고 이후 콘크리트나 E-fuel 등으로 ‘활용’하는 공정과 이 해당 공정에 투입되는 추가 에너지 역시 사업 경계에 포함되어야 한다.

두 번째로 고려할 MRV 핵심 요소는 ‘베이스라인 시나리오’ 설정 방법론이다. 앞서 설명한 바와 같이 베이스라인 시나리오는 등록된 사업 활동이 없었을 경우 발생했을 것으로 예상되는 배출원 및/또는 흡수원의 온실가스 배출량 또는 제거량이다(UNFCCC, 2025c). 이는 사업을 통해 달성된 순수한 감축량을 산정하기 위한 기준선 역할을 한다. 파리협정 제6.4조 메커니즘 그리고 자발적 탄소시장인 골드스탠다드는 베이스라인 설정 방법론으로 최적가용기술, 벤치마크, 또는 역사적 배출량 중 하나의 방법론 접근법을 적용해야 하며, 설정된 베이스라인은 보수적으로 결

16) 탄소상품저장은 대기중 또는 생물학적 탄소를 포집하여 오래 지속되는 제품에 최소 35년간 저장하고 이에 대한 현장 모니터링 및 인증이 가능한 활동을 의미한다(EU, 2024, Chapter 1, Article 2(i)).

17) 2025년 10월에 개최된 IPCC 제63차 총회에서 CDR/CCUS 방법론 보고서 작성 방향에 대해 논의가 있었고 이에 따라 DAC 기술이 방법론 보고서 개요에 포함되었다(IPCC, 2025, p. 6). 다만 DACCS인지 아니면 DACCU인지는 구체화되지 않았고 포괄적이라고 예상되고 있다.

18) 여기서 말하는 탈루(leakage)는 온실가스 배출 점원 외의 ‘공급망’에서 나오는 간접배출을 의미한다.

정된 기준전망치(BAU, Business-as-usual) 수준보다 낮아야 한다고 요구한다(Gold Standard, 2025; UNFCCC, 2025c).¹⁹⁾ 우리나라에서 DACCU 기술 사업은 신규 사업에 해당하고, 아직 국제적으로 인정받는 방법론이 부재한다는 점에서 어려움을 겪고 있다. 우리나라 배출권거래제(K-ETS) 공통지침에 따르면, 베이스라인 시나리오가 감축 조치 이전에 실재하는 온실가스 배출시설의 과거 배출 데이터에 근거해야 하며, 신규사업은 베이스라인 시나리오 선정 시 제외함을 원칙으로 한다고 설정되어 있다(KECO, 2021; Lee, 2025).²⁰⁾ 더 나아가, K-ETS 공통지침에는 DACCU 사업을 감축활동의 일환인 ‘제거’로 구분할 수 있는 지침이 없다. 한편, 국제탄소시장 체제인 파리협정 제6.4조 메커니즘, 골드스탠다드, 베라는 DACCU를 ‘제거’ 활동으로 명확히 인지한다(UNFCCC, 2024; Verra, 2024).²¹⁾ 제거 활동의 베이스라인, 다시 말하자면 사업이 없었다면 대기에서 제거되었을 양은 ‘0’이다. 따라서 감축량은 “(베이스라인 ‘0’ + 사업 제거량) - (사업 배출량) = 순수 제거량(net removal)”으로 산정된다(UNFCCC, 2024). 베이스라인 시나리오 방법론이 감축량을 계산하기 위한 기준선이라면, 프로젝트 시나리오 방법론은 실제 사업을 했을 때 예상되는 배출량/제거량을 계산하기 위함이다.

세 번째 핵심 요소는 감축량 산정 및 배출계수에 대한 데이터로, 이 ‘데이터 품질’이 중요한 요소이다. 베이스라인 배출량, 사업 배출량, 누출 계산에 사용되는 데이터는 투명하게 제시되어야 하며 모니터링되고 검증받아야 한다(Song and Heo, 2007, p. 110). 파리협정 제6.4조 메커니즘과 골드스탠다드는 감축량 계산에 필요한 모든 가정, 매개변수, 데이터 출처를 명시하고, 데이터의 불확실성을 회계 처리하며, 적절한 품질보증 및 품질관리(QA/QC, quality assurance & quality control) 절차를 포함할 것을 요구한다(Gold Standard, 2025; UNFCCC, 2024). K-ETS 외부사업은 데이터의 전수 측정을 원칙으로 하며, 샘플링 방식의 적용을 엄격히 제한한다(KECO, 2021). 또한, 방법론은 고정 인자·데이터와 모니터링 인자·데이터를 명확히 구분하여 제시해야 한다(KECO, 2021). 베라는 모니터링 할 모든 매개변수를 상세한 표로 제공하며, 각 인자별로 데이터 단위, 출처, 측정 방법, 모니터링 주기, QA/QC 절차를 구체적으로 지정한다(Verra, 2024). DACCU 사업의

MRV는 CO₂ 포집량과 에너지 투입량을 정확히 측정하는데 중점을 두는 바. 이에 대한 ‘직접’ 측정이 요구된다(Gold Standard, 2025; Lee, 2025; Verra, 2024). 베라는 원료 소비량까지 구체적으로 모니터링하도록 요구한다(Verra, 2024, p. 25). 또한, 사용되는 유량계, 전력량계 등 모든 계측기는 K-ETS 및 베라, 골드스탠다드의 요구사항에 따라 정기적인 검·교정을 받아야 한다(KECO, 2021; Verra, 2024).

네 번째 핵심 요소는 ‘영구성 및 역전 리스크’이다. 배출저감(emission reduction) 사업을 주로 다루는 K-ETS 공통 지침 및 관련 자료는 제거 사업에 특화된 영구성 및 역전 리스크 관리 규정이 명시되어 있지 않다(KECO, 2021; Lee, 2025). 반면, 제거 활동을 다루는 모든 국제 표준 방법론은 반드시 역전 리스크를 다루어야 하며, 역전 리스크 완충 풀 또는 이와 유사한 보험 메커니즘을 의무화한다(Gold Standard, 2025; UNFCCC, 2024; Verra, 2024). 파리협정 제6.4조 메커니즘과 골드스탠다드는 회피 가능한 역전과 회피 불가능한 역전을 구분하며(Gold Standard, 2025; UNFCCC, 2024), 회피 가능한 역전에 대해서는 사업자가 보상 책임을 질 수 있다(UNFCCC, 2024). DACCU 사업 방법론의 핵심은 활용(utilization) 방식의 영구성이다. 포집된 CO₂를 콘크리트 등에 광물화하여 저장하는 것은 영구적 저장(durable storage)으로 간주될 수 있으며, 이 경우 UNFCCC, 골드스탠다드, 베라 표준에 따라 역전 리스크 평가 및 버퍼 풀 적립 대상이 된다(ICVCM, 2024). 하지만 포집된 CO₂를 E-fuel, 플라스틱, 탄산음료 등 단기간 내에 대기로 다시 방출되는 단기 저장 제품에 활용하는 것은 영구적 저장이 아니다. 따라서 이러한 단기 저장 활용처는 제거 크레딧의 핵심 요건인 영구성을 충족하지 못하므로, UNFCCC, 골드스탠다드, 베라 하에서 제거 크레딧으로 인정받을 수 없다(Gold Standard, 2025; UNFCCC, 2024).

다섯 번째 핵심 요소는 환경적 추가성을 제외한 ‘추가성’이다. 이는 법적·제도적 추가성, 경제적 추가성, 보편성 분석이라는 다단계 평가를 공통적으로 사용한다(Gold Standard, 2025; KECO, 2021; UNFCCC, 2025a). 또한 골드스탠다드와 UNFCCC는 해당 활동이 장기적으로 탄소 집약적 기술을 고착화(lock-in)하지 않아야 함을 요구한다

19) 우리나라 배출권거래제(K-ETS) 외부사업의 경우, 실행될 소지가 가장 큰 대안을 베이스라인 시나리오로 제시해야 하며, 만약 실행될 소지가 가장 큰 대안이 둘 이상일 경우, 배출량이 가장 작게 산출될 수 있는 대안을 선택해야 한다(KECO, 2021).

20) 신규사업의 경우 베이스라인 시나리오 계산을 하지 않는다는 의미이다.

21) 베라의 VMD0056 역시 신규 DAC 시설을 명시적으로 허용하며, 이 경우 베이스라인은 ‘0’이 된다.

(Gold Standard, 2025; UNFCCC, 2025a). DACCU 사업은 모든 표준에서 강력한 추가성을 가질 수 있다. 법적 추가성 측면에서, 현재 어떤 국가에서도 DACCU를 의무화하는 법규는 존재하지 않는다. 경제적 추가성 측면에서, DACCU는 tCO₂당 수백 달러에 달하는 막대한 초기 투자비와 에너지 운영비가 소요되므로, 크레딧 수익 없이는 재정적 타당성이 전혀 없음을 명확히 증명할 수 있다(Lee, 2025). 보편성 분석 측면에서, DACCU는 전 세계적으로 초기 단계 기술이며 한국 내에서 보편적 관행이 전혀 아니다(Gold Standard, 2025).

마지막 여섯 번째 요소는 ‘국제표준 정합성’이다. 감축 사업 방법론을 승인하는 절차는 개발된 방법론이 등록하고자 하는 시장의 규칙과 절차에 부합하는지를 평가하고 승인받는 과정으로, 크레딧의 신뢰성과 시장의 투명성을 확보하는 데 필수적이다(Lee, 2025). 파리협정 제6.4조 메커니즘의 경우, 방법론 승인 절차(methodology approval process)를 자체적으로 정의하는데, 이는 사용되는 방법론이 제6.4조 메커니즘의 요구사항을 충족하는지를 기술 자문 위원회(Technical Advisory Body)의 전문가 검토와 감독기구(Supervisory Body)의 승인을 통해 확인하는 체계적인 과정이다(UNFCCC, 2024). K-ETS 외부사업은 정부 또는 관장기관이 직접 개발하거나, 사업자가 특정 사업계획서와 함께 신규 방법론을 제안하는 두 가지 경로가 있다(Lee, 2025). 골드스탠다드 역시 사무국 주도 또는 개발자 주도 두 가지 트랙이 있다(Gold Standard, 2023).²²⁾ 베라는 이해관계자가 방법론 아이디어 노트를 제출하여 개발을 시작하고 자금 또한 지원할 수 있으나, 베라가 독립 전문가 검토 및 공공 협의를 포함한 전체 개발 과정을 주도하고 관리한다(Verra, 2025). DACCU 사업의 방법론 개발 전략은 제도마다 완전히 다르다. 베라는 개발된 방법론을 이미 보유하고 있는데, VM0049라는 CCS 포괄 방법론 아래, VMD0056 (DAC 포집) 모듈, VMD0058(지중 저장) 모듈, 그리고 개발중인 광물화 모듈(VMD00XX)을 승인하여 제공한다(Verra, 2024).²³⁾ 사업자는 이 승인된 모듈들을 조합하여 즉시 사업을 등록할 수 있다. 제6.4조 메커니즘과 골드스탠다드는 아직 승인된 DACCU 전용 방법론이 부재한 바, 신규 방법론 개발 절차를 거쳐야 한다.

종합하면, CDR 접근법의 사업화를 위해 필요한 MRV 항목과 적용 방향에 관한 일반적인 연구는 축적되어 있

며, 일부 세부 기술을 중심으로 한 MRV 연구도 진행되어 왔다. 그러나 실제 기술 개발자의 관점에서 MRV 요소를 사업화 방법론에 실질적으로 적용하는 방안에 대한 연구는 아직 부족한 상태다. 특히, DACCU 기술의 경우, MRV에 대한 연구가 제한적으로 이루어져 왔다. 자발적 탄소시장 내에서 DACCU 기반 MRV 방법론이 일부 개발·적용되고 있으나, DACCU는 세부 기술별로 특성이 상이하여 기존 방법론을 그대로 또는 범용적으로 적용하기에는 한계가 존재한다. 따라서, DACCU 기술 개발자의 입장에서 사업화 방법론을 설계할 때 MRV 요건을 어떻게 구체적으로 적용할 것인지, 그리고 그 과정에서 어떠한 도전과제가 발생하는지에 대한 보다 실질적이고 심층적인 연구가 필요하다고 볼 수 있다.

3. 분석틀

본 연구는 DACCU 기술에 기반하여 탄소 크레딧을 확보하기 위한 사업화에 반드시 필요한 ‘사업 방법론’ 도출에 초점을 둔다. 앞서, CDR 접근법 연구에서 사업 방법론 도출과 관련해, MRV의 중요성, 특정 CDR 접근법 별로 고려되어야 할 MRV 요건, 그리고 MRV 비용을 낮추기 위해 필요한 정책적 지원사항이 다루어졌다. 특히, DACCU 기술 관련해서, 고려되어야 할 MRV 요건들이 다수 다루어졌으며, 본 연구에서는 크게 여섯 가지로 정리하였다. 그런데, 기존의 연구는 DACCU 기술 사업화에 필요한 MRV 요건이 무엇인지에 대해서 다루고 있지만, 실제 기업들이 이러한 요건들을 토대로 사업 방법론 개발에 있어서 어떻게 적용해야 하는 지 그리고 장애요소가 무엇인지에 대해서는 다루고 있지 않다.

실제로, 우리나라에서 DACCU 기술 관련 정부 R&D가 진행되고 있으며, 향후 실증사업을 도모하고 있다. 또 자체적으로 DACCU 기술을 개발한 민간 기업들은 소규모 실증사업을 진행하면서 탄소시장 진입을 목표로 자체적인 사업 방법론을 개발하고 있다. 그러나, 앞선 섹션에서 언급된 바와 같이, 이들 기업이 개발한 사업 방법론이 국제적으로 요구되는 MRV 요건과 부합하는지 여부, 사업 방법론 개발 과정에서 맞닥뜨리는 장애요소, 탄소시장에서 방법론 승인 여부, 방법론 승인의 성공 및 실패 요인, 향후 정책적 지원 방안에 대해서는 연구된 바가 없다. 이

22) 골드스탠다드의 경우, 개발자 주도 방식은 컨셉 노트 제출, 방법론 초안 작성, 사무국/작업반 검토, 이해관계자 의견수렴, 최종권고, 기술자문위원회 승인 순서를 따른다(Gold Standard, 2023).

23) VMD00XX의 경우 아직 등록번호가 부여되지 않은 “현재 개발중”인 방법론이다(Verra, 2024).

에, 동 연구에서는 우리나라 DACCU 기술 기반 기업들이 사업 방법론을 자체적으로 개발할 때 맞닥뜨리는 문제점을 파악하고 향후 어떠한 정부 정책이 필요한지 살펴보고자 한다. 이를 위해, DACCU 기술 사업화에 필요한 MRV 체계의 여섯 가지 요인으로 i) 시스템 경계 설정, ii) 베이스라인 시나리오, iii) 데이터 품질, iv) (환경적 추가성을 제외한) 추가성, v) 영구성 및 역전 리스크, 그리고 vi) 국제 표준 적합성을 중심으로 사업방법론 개발 시 고려항목을 Table 1과 같이 설정하고자 한다. 동 항목들은 개별적으로 존재하나 동시에, 서로 긴밀히 맞물려 DACCU 사업의 감축 실재성(reality)을 구조적으로 떠받힌다.

동 연구는 연구 대상으로서 로우카본사와 카본에너지사를 설정하였다. 그 이유는 우리나라 DACCU 기업이 극소수이며, 그 중에서도 자체적으로 사업 방법론 개발을 완료하고 탄소시장에 개발한 방법론을 제출하여 승인을 시도한 기업사례는 이 두 개 기업에 불과하기 때문이다.²⁴⁾ 이 두 개 기업은 국내 DACCU 산업 생태계 조성 및 기술사업화를 통한 탄소시장 진입을 선도하고 있다. 로우카본사의 경우, 국내 중소기업으로, 알칼리 습식 무기 흡수제(KLC)를 기반으로 15톤/월(500 kg/일 또는 180톤/연) CO₂ 포집이 가능한 DACCU 기술을 국내에서 최초로 실증한 이력을 가지고 있다. 동 기술에 대해 로우카본사는

국내 의무 탄소시장인 한국에너지공단 배출권거래제 외부사업에 사업 방법론 등록을 2022년 시도하였으나, 방법론 승인으로 이어지지는 못했다. 한편, 카본에너지사는 금속-공기 연료전지 기반 DACCU 기술을 바탕으로 랩스케일 상의 100 kg/연 CO₂ 포집 경험을 토대로 대한상공회의소 자발적 탄소시장(KCS)에 사업 방법론을 제출하였다. 그 결과 2024년 10월 사업 방법론 인증 및 등록이 이루어졌다. 동 기업들은 Table 2와 같이 정리될 수 있다. 이 두 기업은 동일한 DACCU라는 기술군에 속하지만 세부 기술, 기술실증 규모, 사업 방법론 제출처(의무적 탄소시장과 자발적 탄소시장) 등에서 차이가 있는 바, 이 두 개 기업의 방법론을 절대적으로 비교하고 우위를 논하는 것은 적절치 않다. 다만, MRV 체계상 요구되는 여섯 가지 항목에 대해서 두 개 기업이 어떻게 접근했는지를 파악하고 비교함으로써, 국내 DACCU 기술 사업화에 필요한 탄소크레딧 방법론 개발의 가능성과 제약이 드러날 수 있다고 보았다.

동 연구는 상기 2개 기업을 대상으로, DACCU 기술 사업 방법론 개발 시 고려할 6개 항목을 중심으로 2차례에 걸친 심층 설문조사를 서면으로 실시하고, 이에 기반한 연역적 질적 분석을 하였다. 이를 토대로, 2025년 8월에 실시된 1차 설문은 먼저 기업의 기본 정보, 기술 개요, 방법

Table 1. Considerations for developing DACCU technology business methodologies

Elements for MRV		What needs to be considered
Environmental Additionality	System boundary	Has the scope for calculating greenhouse gas emissions and removals been clearly defined, including all sources, sinks, and reservoirs (SSR) affected by the business activities?
	Baseline scenario	Did you provide a scientific and logical justification for the greenhouse gas emissions or removals from sources and/or sinks that would have occurred in the absence of the registered business activity?
	Data quality	Have all assumptions, parameters, and data sources required for the mitigation calculation been specified, has data uncertainty been accounted for, and have appropriate quality assurance and quality control procedures been included?
Permanence & Reversal risk management		Has the characteristic that CO ₂ removed through removal activities is not re-released into the atmosphere but is safely stored for the long term been scientifically proven, and has the reliability of that data been secured?
Additionality (other than environmental additionality)		Does the project demonstrate that it was undertaken as part of additional efforts beyond what would be undertaken under normal business conditions?
Alignment with international standards		Does the domestically developed project methodology align with the existing rules and procedures of the international carbon market it intends to register with in the future?

Source: Formulated by the authors based on the section 2.2

24) 대기 중 CO₂ 포집이 아닌 산업배출원에서 포집하여 저장 또는 활용하는 일반적인 CCUS 기업은 사례 분석 대상으로 고려하지 않았다.

Table 2. DACCU technology commercialization methodology development company

Firms	Low Carbon	Carbon Energy
Firm scale	Domestic small and medium-sized enterprise (Established in 2016)	Domestic startup (Established in 2022)
Technology type	Wet-based CO ₂ capture - Capture with wet alkaline capture absorbent (KLC) - Utilization through permanent sequestration using concrete	Electrochemical (fuel cell) based CO ₂ - Simultaneous electrochemical-based process of capturing CO ₂ and generating power with metal-air battery - Utilization by ① afore-mentioned power generation and ② through solid carbonate acquisition
Generated products	Mineral carbonation and its application to concrete (pavement blocks) · Mixing CO ₂ into concrete/blocks → Strength enhancement → Permanent CO ₂ sequestration	① Metal carbonate · Solidification upon capture → Long-term fixation as carbonate ② Electricity produced by fuel cells
Demonstration scale	- Capture scale: 500 kg/day (180 ton/year) - Type: Zero C 15 T (Modular System) - Site: Gangjin Bay Ecological Park Paving Block Installation	- Capture scale: 100 kg/year · Commercialization target: 1,000 ton/year in 2029 - Type: Pilot demonstration - Site: Lab
Distinction from existing DAC technologies	Development of CO ₂ capture agent (KLC Scrubber) - 10 times higher performance of amine-based systems	Electrochemical-based approach - 3 in 1 process: · Capture, power generation, and solid resource generation
Project methodology submission	Mandatory Carbon Market - Korea Energy Agency's Emissions Trading Scheme External Projects	Voluntary Carbon Market - Korea Chamber of Commerce and Industry (KCCI)'s Carbon Standard ²⁵⁾
Approval of methodologies	No approval (Withdrawal)	Approval & Registration

Source: Formulated by the authors based on preliminary research on and prior interviews with two firms

론 개발 방식에 대한 기반 조사로 진행되었다. 특히 MRV 체계의 6개 고려항목을 중심으로, 기업들이 각각을 어떻게 고려하고 대응했는 지에 대해 서술형으로 작성하는 방식으로 진행되었다. 회신된 응답을 토대로, 각 기업이 6개 항목 각각에 대해 방법론 개발 시 인지했는지 여부, 각 항목에 대응되는 방법론 개발 활동을 수행했는지 여부, 또한 각 항목에 해당하는 결과물이 사업 방법론에 반영되었는지 여부를 체크하였다. 이 과정에서 불분명한 사항들에 대해서는 추가 질의를 통해 내용을 파악하였다. 또한 이를 6개 항목별로 정리하여 2개 기업을 비교하였다. 이 결과값을 토대로, 공통점과 차별적 측면을 파악하였고, 이를 토대로 6개 항목을 각기 더 세분화한 세부항목들을 도출하였고, 이를 토대로 심층적인 질문이 재설계되었다. 이후, 2025년 10월에 2차 설문조사가 서면으로 실시되었다. 이를 토대로, 6개 항목별 및 세부항목별로 2개 기업의 방법

론 개발 과정 및 결과를 비교·분석하였다. 이 비교·분석 결과에서도 추가 확인이 필요하거나 정보가 부족한 부분에 대해서는 응답자를 대상으로 추가 질의를 통해서 내용을 파악하였다. 동 과정에서 기업의 비교분석을 위해 설정된 세부 분석틀은 Table 3과 같다. 동 연구는 상당한 수준의 정보와 자료를 확보하였으나, 동 서면조사에 참여한 기업들의 기업 내부정보 대외 공개가 제한적인 바, 그 제한성을 고려하여 분석 결과를 작성하였다.

4. 분석

4.1. 시스템 경계

시스템 경계 설정은 감축사업 시 감축량 산정을 위한 방법론 설정의 첫 번째 단계이다. 동 항목과 관련하여, 세

25) 약자로 KCS라고 부른다.

Table 3. Specific elements and checkpoints for six MRV elements

Elements for MRV		Specific elements
Environmental Additionality	System boundary	<ul style="list-style-type: none"> - Scope-setting <ul style="list-style-type: none"> · ① Physical boundary: What elements are considered? · ② Greenhouse gas emission sources within the boundary: What elements are considered? (ex: baseline emissions, project emissions, reversal emissions items, comprehensive consideration of fugitive emissions) - Presentation of scope-relevant conditions <ul style="list-style-type: none"> · Whether applicable or inapplicable conditions are defined and clearly presented or not.
	Baseline scenario	<ul style="list-style-type: none"> - Concept <ul style="list-style-type: none"> · Whether the concepts of removal and emission avoidance are recognized and included or not. - Baseline scenario <ul style="list-style-type: none"> · Whether the firm explicitly presents specific assumptions or not. · Whether baseline calculation formulas are presented or not. · Whether fixed factors and corresponding data are defined or not.
	Data quality	<ul style="list-style-type: none"> - Data source <ul style="list-style-type: none"> · What are the size and specifications of the facility where the data is collected? - Data Measurement Targets <ul style="list-style-type: none"> · Whether the measurement targets, measurement methods, data units, recording cycles, QA/QC procedures, and data sources are clearly defined or not - Data source <ul style="list-style-type: none"> · Whether the variables relevant to the reduction calculations are clearly presented or not. - Data Longevity, Continuity, and Actual Measurement <ul style="list-style-type: none"> · Whether the firm obtain continuous measurement data covering a period of at least 12 months, as required by the certification body - External Consulting Equivalent to Third-Party Verification <ul style="list-style-type: none"> · Whether verification by a third-party or not
Permanence & Reversal risk management		<ul style="list-style-type: none"> - Permanence & Reversal Risk Rules <ul style="list-style-type: none"> · Whether the firm recognizes the significance of permanence and reversal risk or not · Whether the firm understands the current status of relevant domestic/international systems or not - Addressing Permanence Items in Methodology <ul style="list-style-type: none"> · Whether the final outputs from carbon removal activities are permanent in terms of technical characteristics or not · What is the basis for its permanence? · Whether the firm recognize the significance of permanence and reversal risk or not - International Carbon Market Entry Consideration <ul style="list-style-type: none"> · Whether the company is prepared to address permanence and reversal risk management in anticipation of its future entry into the international carbon market or not
Additionality (other than environmental additionality)		<ul style="list-style-type: none"> - Requirement from the carbon market where project methodology was submitted <ul style="list-style-type: none"> · Is legal and institutional additionality required? · Is there any other additionality requirements? - Verification of required additionalities <ul style="list-style-type: none"> · Whether the firm analyzes legal and institutional additionality or not · Whether the firm analyzes other additionalities (economic, universal etc.) or not

Alignment with international standards	<ul style="list-style-type: none"> - Compliance with international project methodologies. <ul style="list-style-type: none"> · Whether the methodology is developed based on ISO 14040/14044 Life Cycle Assessment (LCA) or not · Whether the firm refers to approved methodologies in the voluntary carbon market or not · What other references are applied? - The difficulty of achieving full alignment with the methodology <ul style="list-style-type: none"> · whether firm's technology used differs from those employed in international methodologies.
--	--

Source: Formulated by the authors

부 고려사항은 사업 경계, 설비 수명, 그리고 이에 기반한 감축량 산정이다. 방법론 개발자는 시스템 경계 설정과 관련하여, 그 근거, 적용조건, 불가 조건을 명확하게 제시해야 한다. 두 기업이 설정한 시스템 경계는 그 범위, 논리 구조, 지향점에서 뚜렷한 차이를 보인다.

먼저, 로우카본社は 의무적 탄소시장인 ‘K-ETS 외부사업’을 타겟으로 방법론을 개발한 바, 시스템 경계를 감축사업의 물리적·지리적 범위와 사업자의 통제 하에 있는 배출원 및 흡수원으로 정의하는 규칙을 고려하였다 (KECO, 2021, p. 10). 그러나, 실제 시스템 경계를 설정하는 과정에서, CO₂ 포집 및 활용 공정을 시스템 경계에 포함하는 핵심 대상으로 설정하였고, 감축 산정의 범위를 비교적 제한적으로 구성했다. 이에, ‘물리적 경계’로는 CO₂ 포집 설비 운영 단계, 최종사용자(End-user)의 포집 결과물인 광물탄산화 및 콘크리트의 활용 단계, 그리고 국가 전력 배출계수 도입으로 국내·외 지리적 경계를 간접적으로 명시하는 것을 설정하였다. 그리고 이 ‘경계 내의 온실가스 배출원’으로 i) 베이스라인 배출량, ii) 프로젝트 배출량, iii) 역전(reversal) 배출, 그리고 iv) 탈루성 배출(fugitive emissions)을 포함하였다. 개별적으로 좀 더 구체적으로 살펴보면, 첫째, 베이스라인 배출량의 경우 별도 배출원을 명시하지 않고, 대신 국가 온실가스 통계를 활용하였다. 이는 베이스라인 시나리오 섹션에서 보다 구체적으로 다룰 예정이다. 둘째, 프로젝트 배출의 경우, DAC 설비 운전에 따른 대기 중 CO₂ 직접 포집에 들어가는 화석연료·전력 사용에 따른 온실가스 배출량을 의미한다. 셋째, 역전 리스크에 대한 사항이 일반적으로 CDR 접근법에 포함되는 것을 인지하고, 시스템 경계 항목으로 고려하였다. 넷째, 탈루성 배출의 경우,²⁶⁾ 부분적인 고려가 이루어졌다. 이에 대해, 포집 설비 운영을 시스템 경계 내에 포함시켰지만, 해당 설비의 제작·설치 단계에서의 자재 투입과 같은 전과정평가(LCA) 요소, 장기적 내구연한

에 따른 감가상각과 논리와 배출 분산 개념 등은 구조화하지 않았다. 다음으로, 이송 라인 관련 장치에서 탈루성 배출량, 주입과정 중 탈루성 배출량을 고려하였지만, 업스트림 단계의 배출계수를 적용하지는 않았다. 이로 인해 로우카본社は 인증기관 심사 과정에서 설비 수명, 사업 경계, 방법론 특성에 따른 적용 조건 및 불가 조건의 정의 및 설정이 미흡하다는 평가의견을 받았다. 또한 적용 및 불가 조건에 대한 필요성과 출처 기재가 누락되어 이에 대한 수정 및 보완 요구를 받은 것으로 드러났다.

한편, 카본에너지社の 시스템 경계 설정은 다음과 같이 이루어졌다. 먼저, ‘물리적 경계’ 설계 시, 동 기술의 개발 및 실증 시 탄소크레딧 발행과 탄소시장 진입을 전제로 전과정평가(LCA)에 기반을 두었다. 카본에너지社は DACCU 설비 가동 과정에서의 CO₂ 포집뿐 아니라, 설비 설치 단계에서 발생하는 자재·에너지 투입, 운영 단계의 전력 및 연료 사용, 그리고 포집 결과물인 금속탄산염과 전력 생산의 활용 단계에서 최종사용자가 이를 활용할 때의 대체 효과까지를 하나의 통합된 시스템 경계로 설정하였다. 특히 설비 수명 개념을 명시적으로 도입하여, 설치 단계에서 발생하는 배출을 단년도에 집중 반영하지 않고 내구연한에 따라 분산 반영하는 구조를 채택함으로써, 전과정평가에 부합하는 경계 논리를 구축하였다. 다음으로, ‘경계 내의 온실가스 배출원’으로, i) 베이스라인 배출량, ii) 프로젝트 배출량, iii) 대체효과에 따른 배출 저감량, iv) 역전 리스크에 따른 배출량, v) 탈루성 배출량을 포함하였다. 다만, 카본에너지社は 상기 항목들을 통합적으로 활용하였다. 구체적으로 살펴보면, 첫째, 베이스라인 배출량을 설정했다. 이는 베이스라인 시나리오 섹션에서 보다 구체적으로 다룰 예정이다. 둘째, 프로젝트 배출량은 화석연료·열·전력 사용에 따른 온실가스 배출을 의미한다. 셋째, 대체효과에 따른 배출저감량은 DACCU 공정에서 생산되는 전력의 계통 대체효과와 금속탄산염 등 탄소포집

26) 시스템 경계 내의 시설 또는 장비에서 의도치 않게 배출되는 것을 의미한다.

Table 4. System boundary

Low Carbon	Carbon Energy
<p>- (Scope-setting)</p> <p>① Physical Boundary</p> <ul style="list-style-type: none"> · <u>CO₂ capture facility operation phase</u> · <u>End-user utilization phase of capture products (mineral carbonation and concrete)</u> · <u>Geographic aspect (indirect specification of domestic / international geographic boundaries via national power emission factor adoption)</u> <p>② Greenhouse gas emission sources within the boundary</p> <ul style="list-style-type: none"> · <u>Baseline emissions</u> (No separate emission sources specified; national GHG statistics used) · <u>Project emissions</u> (GHG emissions from fossil fuel/electricity use) · <u>Reversal emissions items</u> · <u>Partially considers fugitive emissions</u> <ul style="list-style-type: none"> : Does not consider upstream emissions during the installation phase of capture equipment : Considers fugitive emissions from transfer line-related equipment and during the injection process. However, emission factors for the upstream phase were not applied <p>- (The way scope-relevant conditions are presented)</p> <ul style="list-style-type: none"> · Insufficient definition and setting of applicable and inapplicable conditions based on equipment life-span, project boundaries, and methodological characteristics · Omission of justification and source documentation for all conditions, leading to request for revision and supplementation by the certification body 	<p>- (Scope-setting) System boundary based on life cycle assessment (LCA)</p> <p>① Physical Boundary</p> <ul style="list-style-type: none"> · CO₂ capture facility installation phase (Construction materials and energy use, waste discharge) · <u>CO₂ capture facility operation phase</u> · <u>End-user utilization phase of capture products (metal carbonate + electricity)</u> · <u>Geographic Aspect (Indirect specification of domestic / international geographic boundaries via adoption of 'k-country' power emission factors)²⁷⁾</u> <p>② Greenhouse gas emission sources within the boundary</p> <ul style="list-style-type: none"> · <u>Baseline Emissions</u> (CO₂ treated via DACCU capture process, greenhouse gas emissions from power generation, greenhouse gas emissions from fossil fuel use) · <u>Project emissions</u> (greenhouse gas emissions from fossil fuel/heat/electricity use) · Emission reductions from substitution effects (substitution effects based on the use of project deliverables, e.g., replacing existing industrial raw materials) · <u>Reversal emissions items</u> · <u>Comprehensive consideration of fugitive emissions</u> <ul style="list-style-type: none"> : Application of upstream emission factors related to construction materials, energy use, waste generation, land-use changes, and relocation of existing facilities during the facility construction phase <p>- (The way scope-relevant conditions are presented)</p> <ul style="list-style-type: none"> · Clear presentation of five applicable conditions and three inapplicable conditions based on facility life-span, project boundaries, and methodology characteristics · Reasonable presentation of the necessity for boundary condition setting and relevant sources · Conformance with the methodology application conditions of the 'KCS Reduction Performance Methodology Evaluation/Checklist' · Presentation of representative greenhouse gases per emission source (CO₂, CH₄, N₂O)

Source: Author's summary based on the main text

Note: Common points between the two firms are underlined.

생성물이 기존 산업 원료를 대체 효과에 따른 배출 저감량이다. 이를 바탕으로, 시스템 경계에 배출, 제거, 대체 및 전환 등 총체적 감축량 계산을 고려하여 접근하였다. 넷째, 역전 리스크에 대한 사항이 일반적으로 CDR 접근법에 포함되는 것을 인지하고, 시스템 경계 항목으로 고려하였다. 다섯째, 탈루성 배출과 관련해서, 카본에너지社

는 설비 구축, 에너지 공급, 자재 투입, 폐기물 처리 등 사업 수행 전반에서 발생 가능한 탈루성 배출을 시스템 경계에 포함시키고, 산정 항목으로 구조화하였다. 특히, 설비 구축단계에서의 건축자재, 에너지 사용, 폐기물 배출, 토지이용 변화, 기존 설비의 이동 등과 관련한 업스트림 배출계수를 적용하였다. 이는 시스템 경계를 통해 감축의

‘순효과(net effect)’를 명확히 규정하려는 의도가 반영된 결과라 할 수 있다.

시스템 경계를 설정은 DACCU 기술을 적용하는 과정에서 이산화탄소 배출 및 제거에 대한 정량적 계산에 포함될 모든 대상 범위에 대한 것이다. 이에 대해, 두 개 기업을 비교 한 바, 시스템 경계 설정 시, ‘물리적 경계’ 차원에서 큰 차이는 없으나, 카본에너지社は CO₂ 포집 설비 설치 단계까지 고려하였다는 점을 주목할 필요가 있다. 그리고 ‘경계 내 온실가스 배출원’에 포함하는 항목에서, 두 개 기업 모두 포집된 CO₂를 광물화 제품에 활용한 점은 공통되나, 카본에너지社만 CO₂가 기존 산업원료를 대체한 배출저감 효과를 포함하는 점이 크게 구분된다. 또한, 탈루성 배출 항목에 대해서는 두 개 기업 모두 포함하였으나, 카본에너지社は 전반적으로 고려하였고, 로우카본社は 부분적으로 고려하였다는 점도 주목할만 하다. 중요한 점은 시스템 경계 설정 시, 사업의 전체 범주를 명확히 하고, 포함될 설비와 과정들을 명시해야 하며, 이에 대한 충분한 논리 구조 역시 필요하다는 점을 알 수 있다. 두 개 기업에 대한 비교는 Table 4와 같이 정리될 수 있다.

4.2. 베이스라인 시나리오 방법론

베이스라인 시나리오는 감축사업 활동이 없었을 경우 발생했을 것으로 예상되는 배출원 및/또는 흡수원의 온실가스 배출량 또는 제거량이다. 정확한 베이스라인 시나리오 배출량 수치가 도출되어야 하고, 또한 명확한 감축량 계산 방법론이 도출되어야 하며, 감축사업을 통해 달성된 순수한 감축량을 산정할 수 있다. 따라서, 베이스라인 시나리오 방법론은 명시적인 계산식(formula), 고정 인자 및 데이터(fixed parameter/data), 그리고 각 인자 및 데이터의 출처와 적용 근거가 제시되어야 한다. 여기서 ‘고정 인자 및 데이터’란 온실가스 감축량 산정(예: 베이스라인 배출량, 사업 배출량, 누출량)에 사용되는 모든 인자·데이터와 계수 중 사업 승인 전 고정되어 사업 유효기간 동안 변동이 없는 데이터를 의미한다(KEA, 2026). 해당 모니터링 인자를 결정하기 위해 공식 통계, 전문가 판단, 특히 데이터, 기후변화에 관한 정부간 패널(IPCC), 과학서적 등의 문헌을 활용하는 편이며, 고정 인자·데이터 대표적인 예로 표준 배출계수(전력/열/원료), 기기 효율, 발열량 등이 있다.

로우카본社は 순 제거량을 도출하기 위한 배출량 계산

식을 방법론에 제시한 것으로 조사되었다. 먼저, 베이스라인 시나리오와 관련하여, 베이스라인 배출량을 계산하는 별도의 산식을 마련하지 않았다. 즉, 세부 배출인자 별 값을 도출하지 않고 국가온실가스통계의 분야별 배출량 추이표를 참조하여 제조업 및 건설업 분야의 통계 수치를 배출량을 제시하는 데에 단순 적용했다. 이는 일반적인 사업의 베이스라인 설정과는 사뭇 다르다. 그 이유는 보통 탄소시장에서 감축 결과물을 크레딧으로 받기 위한 사업에서 베이스라인 시나리오 설정 시 ‘개별 사업’별로 접근할 때에는 해당 사업장의 과거배출량을 토대로 계산하거나, ‘산업 부문’에 기반해 접근할 때에는 최적가용기술(best available technology)을 적용했을 때의 배출량으로 계산하거나 또는 해당 산업부문의 온실가스 배출저감 노력을 한 기업들 상위 X%의 배출량에 기반한 벤치마크 접근법을 활용해야 하기 때문이다(UNFCCC, 2021, Annex para 36). 로우카본社は 개별 기업이 아닌 기업이 속한 산업부문에 접근했는데, 다만 제조업 및 건설업 분야의 배출량 통계수치 아닌 보다 더 세분화된 부문으로 한정해야 했고, 그 해당 부문의 감축노력 상위 X%에 해당하는 기업들의 배출평균치에 해당하는 수치를 사용했어야 했다. 앞서 언급된 엄격한 베이스라인 시나리오 설정 방법론을 활용해야 하는 이유는 환경적 추가성이라는 원칙에 근거하여 베이스라인을 높게 설정하여 크레딧이 과다 발생하는 것을 방지하기 위함이다. 다음으로, 프로젝트 시나리오의 경우, 포집량 산정과 배출량 산정으로 구성된다. 포집량은 말 그대로 대기 중으로부터 CO₂ 포집량을 산정하는 것이다. 배출량 산정에는 i) 포집제를 자체적으로 제조 하는 공정에 따른 배출량, ii) 대기 중으로부터 CO₂ 포집 공정 시 화석연료/전기 사용에 따른 배출량, iii) 포집된 CO₂를 전환하기 위한 장소로 이동하는 과정에서의 운송 차량 화석연료 사용에 따른 배출량, 마지막으로 iv) 포집·이송된 CO₂를 콘크리트 광물화(향후 보도블럭으로 활용)로 전환하는 공정에서 발생하는 배출량이 포함된다. 여기서 알 수 있는 점은 포집한 CO₂를 광물화에 활용 시, 광물화에 기존에 사용된 산업원료를 대체함으로써 발생하는 배출저감 효과에 대한 산정이 이루어지지 않았다는 것이다. 정리하면, 베이스라인 배출량에 대해서, 로우카본社は DACCU 사업이 수행되지 않았을 경우를 가정하여 ‘사업이 없었을 경우 어떤 에너지원이 사용되었는가?’와 ‘어떤 기존 공정이 유지되었는가?’와 관련된 설명이 누락된 상

27) ‘k국가’는 특정 국가가 아닌 모 국가를 의미한다.

태로 베이스라인을 정성적으로 설정한 것으로 파악되었다. 이로 인해 베이스라인 시나리오와 프로젝트 시나리오 간의 차이가 정량적으로 명확히 대비되지 못했으며, 이로 인해 인증기관으로부터 베이스라인 시나리오 선정에 대한 작성이 미흡하여 전반적으로 산정식에 대한 수정·보완을 요구받았던 것으로 나타났다.²⁸⁾

한편, 카본에너지社の 베이스라인 시나리오는 로우카본社와 마찬가지로 감축량을 단순한 ‘포집량’이 아니라, 대체로 인해 ‘회피된 배출량(avoided emissions)’의 개념을 포함한다. 카본에너지社は ‘DACCU 사업이 수행되지 않았을 경우’ 즉 베이스라인 시나리오를 단순히 ‘아무 일도 일어나지 않는 상태’로 가정하지 않는다. 대신, 해당 사업이 제공하는 기능 즉, CO₂ 제거, 전력 생산, 탄소포집 생

성물 생산에 대해 ‘굳이 DACCU 사업을 수행하지 않았을 때 기존의 어떤 산업 활동에 의해 수행되었을지’를 베이스라인 시나리오로 구체화하여 설정했다. 예를 들어, DACCU 사업 결과로 연료전지로부터 생산된 전력은 베이스라인에서 기존 발전계통의 전력으로 공급되었을 것이며, 금속탄산염 등 탄소포집 생성물은 기존 화학 원료 또는 재활용 원료 생산 공정에 의해 공급되었을 것이라는 베이스라인 시나리오를 제시한다. 즉, 베이스라인 시나리오 배출량은 대기 중 CO₂의 잔존분 아니라, 기존 발전 및 원료 생산 과정에서 발생했을 배출을 포함하는 다층적 구조를 갖는다. 다음으로, 프로젝트 시나리오에는 전력 대체 효과, 탄소포집 생성물의 대체효과, 그리고 이와 연계된 업스트림 배출까지를 베이스라인에 포함함으로써, 프로젝트

Table 5. Baseline scenario

Low Carbon	Carbon Energy
<p>- (Concept)</p> <ul style="list-style-type: none"> · <u>The concepts of removal and emission avoidance are recognized and included in the baseline and project scenarios.</u> · The concepts of removal and emission avoidance are not specified in the baseline calculation formula. <p>- (Baseline Scenario)</p> <ul style="list-style-type: none"> · There was no explicit presentation of a specific assumption (baseline scenario) regarding the emissions that would have occurred if the DACCU project had not been implemented · The baseline calculation formula is also absent. <ul style="list-style-type: none"> → The firm received a request from the certification body to review the baseline scenario. The certification body recommended to present the procedure for selecting the baseline scenario according to “CDM TOOL02: Combined tool to identify the baseline scenario and demonstrate additionality”. · Fixed factors and corresponding data applied using single emission statistics data <ul style="list-style-type: none"> → Instead of presenting a baseline emissions calculation formula, statistical figures from the manufacturing and construction sectors were cited by referring to the sector-specific emissions trend tables in the National Greenhouse Gas Statistics → The firm was requested by the certification body to present monitoring methods for each factor and data 	<p>- (Concept)</p> <ul style="list-style-type: none"> · <u>The concepts of removal and emission avoidance are recognized and included in the baseline and project scenarios.</u> · The concepts of removal and emission avoidance are specified in the baseline calculation formula. <p>- (Baseline Scenario)</p> <ul style="list-style-type: none"> · The firm explicitly presents examples of the situation that would have occurred (baseline scenario) if the DACCU project had not been implemented · Various calculation formulas are presented for each item based on the baseline scenario · Fixed factors and relevant data are defined, and their sources are cited. · Consistency with system boundaries is ensured. · Prior to the submission of project methodology to the certification body, prior confirmation of the baseline scenario's logical validity was confirmed through verification by a third-party institution²⁹⁾.

Source: Author's summary based on the main text

Note: Common points between the two firms are underlined.

28) 베이스라인 시나리오 선정 절차를 “CDM TOOL02 : Combined tool to identify the baseline scenario and demonstrate additionality”에 따라 제시하도록 권고

29) 카본에너지社は 제3자 검증기관으로 (주)디엔브이비즈니스어슈어런스코리아를 활용하였다.

트 수행 여부에 따른 ‘순감축 효과(net removal/reduction)’를 구조적으로 도출했다. 이를 위해 카본에너지는 베이스라인 산정식,³⁰⁾ 고정 배출계수, 데이터 출처를 명확히 정의하고, 프로젝트 시나리오와 일대일로 대응되는 형태로 정량화 논리를 구성했다.

정리하면, 로우카본社は 베이스라인 및 프로젝트 시나리오 산정 시, 배출회피 개념을 적용하지 않았다. 이에, 베이스라인 시나리오에서 해당 콘크리트 사업에서의 배출량을 구체적으로 산정하는 식을 도출하지 않았고, 프로젝트 시나리오에서는 배출회피에 따른 배출저감량이 산정식에 포함되지 않았다. 한편, 카본에너지社의 경우 DACCU 기술을 기존 에너지·소재 시스템을 대체하는 하나의 산업 활동으로 위치시키고, 그 대체 효과를 중심으로 베이스라인을 구성하였음을 보여준다. 또한 DACCU를 통한 이산화탄소 제거, 전력 대체 효과, 탄소포집 생성물의 대체 효과를 모두 정량적으로 구현하기 위한 계산식, 배출계수, 고정 데이터, 각 인자값을 세부적으로 접근하여, 베이스라인 시나리오의 완결성을 높였다. 두 개 기업에 대한 비교는 Table 5와 같이 정리될 수 있다.

4.3. 데이터 품질

DACCU와 같이 기술 집약적이고 공정 복잡성이 높은 감축 사업에서는, 데이터가 측정 가능한지, 실제로 측정되었는지, 측정된 데이터 값이 반복 가능한지, 제3자가 검증할 수 있는 형태로 데이터가 측정되었는지 여부가 방법론 개발의 최종 목적인 방법론 승인 및 등록 여부를 결정한다. 따라서, 다양한 기술적·운영상 변동성을 고려하여, 사업 방법론에 해당되는 모든 인자를 장기간 그리고 연속적으로 측정·기록하는 방식이 필요하다. 특히, 최소 1년간의 연속적인 데이터가 요구된다. 다만, 여기서의 ‘데이터’는 실제 사업에 대한 데이터가 아니라, 실제 사업 전의 ‘실증 사업’을 기반으로 도출된 데이터에 기반한다는 점이다.

로우카본社の 경우, 데이터를 측정하는 데에 있어서, ‘실제 소규모 실증(일 500 kg CO₂ 포집성능)’을 기반으로 접근하였고, 이를 바탕으로 가능한 범위 내에서 핵심 변수 중심으로 데이터 확보에 주력했다. 하지만, 한국에너지공단 배출권거래제 외부사업에서 요구하는 ‘연 단위 또는 최소 12개월 이상의 연속 실측 데이터’를 확보하는 데 어

려움을 겪었다. 그 이유는 여러 가지가 있는데 첫째, DACCU 기술 설비를 운영했으나 1년 이상의 장기적이고 안정적이며 연속적인 운전이 이루어지지 못했다. 둘째, 로우카본社は CO₂를 포집하는 습식 흡수제(KCL)를 자체 생산하여 사용하는데, 사용 목적에 따라 흡수제 생산이 간헐적으로 진행되어, 흡수제 제조 공정에서 발생하는 배출량에 대해 연속적인 데이터를 확보하지 못했고, 이에 따라 비연속적이나 실제 측정된 정량 데이터를 토대로 1년치 배출량을 추정하고 이 추정치를 활용했다. 셋째, CO₂ 포집 후 콘크리트 등 고체 매질에 주입·저장하는 과정에서 실제 주입량 및 반응 효율에 대한 실측 데이터가 충분히 축적되지 않아, 저감량 산정 시 불확실성이 존재했다. 넷째는 계절에 따라 DACCU 실증 설비의 운전 조건이 변화한 바, 데이터값이 연속적이거나 일정하지 않았다. 즉, 데이터 값에 대해 계절·부하 변화가 충분히 반영되었는지에 대한 설명이 상대적으로 부족했다. 결과적으로, 가장 핵심적인 데이터인 포집량, 전력 사용량, 그리고 배출량에 대한 비연속적인 측정값이 제공되었다. 이는 데이터값이 최소 3개월 이상의 ‘연속성’을 가지 못하고, 또한 연단위의 ‘실제 측정’이 이루어지지 못했으며, 측정값이 전 기간에 걸쳐 ‘동일한’ 측정 프로토콜로 수집되었는지에 대한 명확성이 부족하다는 것을 의미한다. 로우카본社は 주요 배출 및 제거 관련 인자에 대해 측정 대상은 식별하고 있었으나, 모든 인자에 대해 측정 방법, 데이터 단위, 기록 주기, QA/QC 절차 및 데이터 출처를 체계적으로 정의하지는 못하였다. 한편, 로우카본社は 의무적 탄소시장에 방법론 제출 전에 제3자 검증에 준하는 외부 컨설팅 과정을 거치지 않았다.

한편, 카본에너지社は 데이터 측정에 있어서, 랩 스케일(연 100 kg CO₂ 포집성능)의 설비에 기반한 실증을 토대로 데이터를 준비하였다. 먼저, 카본에너지社は 사업 관련 인자들에 대해 측정 대상, 측정 방법, 데이터 단위, 기록 주기, 품질보증·품질관리 절차, 데이터 출처를 체계적으로 정의하였다. 또한 업스트림 배출계수 등 모니터링에 필요한 인자·데이터에 대해서는, 제3자 검증기관으로부터 검토 의견을 토대로, 신뢰할 수 있는 LCA 데이터베이스나 공인 및 검증된 자료를 이용하여 수정·보완함으로써 확보된 데이터의 품질 관리 및 신뢰성을 담보하고 있다. 카본에너지社は 현재 확보한 데이터가 랩 스케일의 시범사업

30) 카본에너지社の 베이스라인 배출량 계산식은 i) 사업 후 DACCU 설비의 해당 년도 포집·처리한 이산화탄소량, ii) 전력 생산 시 온실가스 배출량, iii) 탄소포집 생성물 생산 시 온실가스 배출량이 포함된다. 이 때, 사업 규모에 따라 적정 계량 단위 및 단위 환산계수를 적용하되, 최종 배출량은 이산화탄소상당량톤(tCO₂-eq)으로 산정한다고 설정된다.

Table 6. Data quality

Low Carbon	Carbon Energy
<p>- (Data Source) <u>Approach based on actual small-scale demonstration</u> (daily CO₂ capture capacity of 500kg)</p> <p>- (Data Measurement Targets) Lack of systematic definition for measurement targets, methods, units, recording cycles, QA/QC procedures, and data sources</p> <p>- (Emission factors) Variables* related to reduction calculation are presented only within the project scenario * Examples: Power consumption emission factor, fossil fuel usage emission factor</p> <p>- (Data Longevity, Continuity, and Actual Measurement) · Difficulty in securing ‘continuous annual data* based on one year of facility operation’ as required by the mandatory carbon market * Examples: Annual capture volume, annual electricity usage, annual emissions, etc. · Some data prepared based on estimates</p> <p>- (External Consulting Equivalent to Third-Party Verification) · No external consulting was made.</p>	<p>- (Data Source) Approach based on lab-scale <u>demonstration</u> (annual CO₂ capture performance of 100kg)</p> <p>- (Data Measurement Targets) Specific definition of measurement targets, methods, units, recording cycles, QA/QC procedures, and data sources for data measurement parameters</p> <p>- (Emission Factors) Clear presentation of all variables* related to reduction calculation without omission * Examples: Emission factor for production electricity, emission factor for carbon capture by-products, etc.</p> <p>- (Data Longevity, Continuity, and Actual Measurement) · Obtain annual data by estimating monthly lab-scale actual measurement data through quantitative evaluation of scale-up scenarios</p> <p>- (External Consulting Equivalent to Third-Party Verification) · Auditing was completed.</p>

Source: Author’s summary based on the main text

Note: Common points between the two firms are underlined.

에서 유래된 점을 명확히 전제하였는데, 1개월 기간의 연속적인 데이터를 스케일업 시나리오에 적용하여 1년 단위의 ‘추정치’를 산정하는 방식의 정량평가를 수행했다고 밝히고 있다.

정리하자면 로우카본社は 실제 ‘소규모’ 실증사업을 기반으로 데이터를 확보하고자 하면서 의무탄소시장 체계에서 요구하는 1년간의 장기적·연속적·실측 데이터 확보가 어려웠다. 반면, 카본에너지社は ‘랩 스케일(lab-scale) 및 파일럿 스케일(pilot scale)’의 실증 데이터를 토대로 스케일업 시나리오 정량평가 결과를 확보하였고, 또한 자발적 탄소시장 체계에서 추정 데이터 활용이 허용된 바 데이터의 장기성·연속성·실측성에 있어서 상대적 수월성이 있었던 것으로 보인다. 또한, 카본에너지社は 방법론을 자발적 탄소시장에 제출하기 전 외부 컨설팅과 제3자 검증 절차를 거쳐 방법론의 타당성을 확인받았다. 이는 실측

데이터가 검증 가능한 형식으로 정리되어 있는지가 얼마나 중요한지를 보여주는 사례라 할 수 있다. 두 개 기관을 비교한 결과는 Table 6과 같이 정리될 수 있다.

4.4. 영구성 및 역전 리스크

영구성(permanence)은 제거 활동으로 인해 제거된 온실가스가 대기로 재방출되지 않고 장기간 안전하게 저장되는 특성을 의미하며, 역전(reversal)은 제거 활동에 의해 대기에서 제거되었던 온실가스가 의도적 또는 비의도적으로 대기로 다시 배출되는 것을 의미한다. 즉, 영구성이 높으면 역전 리스크가 줄어드는 것이다.

로우카본社は 영구성 확보 및 역전 리스크 방지에 대한 사항을 인식하고 있었다. 다만, 현행 국내 제도에서 요구되지 않는 수준의 리스크 관리는 과도하다고 판단했다. 이에, 로우카본社は 기존의 ‘해외 방법론³¹⁾’ 및 ‘연구문

31) Verra VCS의 「Methodology for CO₂ Utilization in Concrete Production」, Gold Standard의 「Carbon Sequestration through Accelerated Carbonation of Concrete Aggregate」, Puro.earth의 「Carbonated Building Materials」 방법론을 참고하였으며, 탄산염 형태로 저장된 CO₂의 경우 장기적으로 안정적인 저장으로 간주하고 있다는 내용을 인용함.

Table 7. Permanence and reversal risk

Low Carbon	Carbon Energy
<p>- (Permanence & Reversal Risk Rules)</p> <ul style="list-style-type: none"> · <u>Recognition of significance</u> · <u>Understanding the status of domestic/international systems</u> <p>- (Addressing Permanence Items in Methodology)</p> <ul style="list-style-type: none"> · <u>(Technical Characteristics) Based on the assumption that solid carbonates possess relatively high permanence</u> · (Basis) <u>Simple statement of no leakage based on references such as international methodologies and research papers</u> · <u>No additional data collection for long-term safety verification</u> <p>- (International Carbon Market Entry Consideration) Project methodology was developed primarily for registration under the domestic emissions trading scheme’s external projects, thus the firm does not consider the permanence risk management systems required by international carbon markets.</p>	<p>- (Permanence & Reversal Risk Rules)</p> <ul style="list-style-type: none"> · <u>Recognition of significance</u> · <u>Understanding the status of domestic/international systems</u> <p>- (Addressing Permanence Items in Methodology)</p> <ul style="list-style-type: none"> · <u>(Technical Characteristics) Based on the assumption that solid carbonates possess relatively high permanence</u> · (Basis) <u>Simple statement on the assumption no risk, given the absence of separate guidelines on carbonate reversal risk within domestic regulatory conditions</u> · <u>No additional data collection for long-term safety verification</u> <p>- (International Carbon Market Entry Consideration) The firm recognizes that securing additional long-term stability verification data for solid carbonates is a task required for future international carbon market certification.</p>

Source: Author’s summary based on the main text
 Note: Common points between the two firms are underlined.

현’을 토대로 DACCU 사업을 통해 생산되는 고체탄산염이 다시 대기 중 CO₂로 환원될 가능성은 매우 낮다고 전제하며, 이를 방법론에서 설명한다. 즉, 고체탄산염 자체가 영구성이 높다는 점을 강조한 것이다. 한편, 향후 국제탄소시장 진출을 고려하여 영구성 및 역전 리스크 이슈 대응의 필요성과 향후 국제탄소시장의 영구성 관련 규칙과의 정합성이 중요함을 인식하고 있었다.

한편, 카본에너지社は DACCU 사업을 통해 생산될 탄산염이 국내 환경 규제상 역전 리스크에 대한 별도 지침이 없다는 점을 토대로,³²⁾ 방법론에는 역전 리스크가 없다는 가정을 설정하였다. 또한, 카본에너지社가 방법론을 제출한 대한상공회의소 탄소감축인증표준(KCS)의 경우에도, 감축활동에서 배출저감(emission reduction)과 제거(removal) 개념을 명확히 구분하지 않고, 영구성 및 역전 리스크에 대한 별도 지침 자체가 없었다. 다만 향후 국제탄소시장의 방법론 등록 및 인증을 위해서는 고체 탄산염의 장기 안정성 추가 입증을 명확하게 제시할 필요가 있다는 점에 대해서는 인식하고 있음을 파악할 수 있었다.

정리하자면, 두 국내 기업 모두 영구성 접근에 대해서는 전반적으로 고체탄산염의 영구성이 상대적으로 높다

는 기술적 특성에 기반해, 역전 리스크가 낮다는 가정을 단순하게 방법론에 반영하고 있다. 두 개 기관을 비교한 결과는 Table 7과 같이 정리될 수 있다.

4.5. 추가성

추가성은 등록된 사업 활동으로 인해 발생하는 온실가스 배출 감축 및/또는 제거의 증가가 사업이 등록되지 않았더라면 발생하지 않았을 것이라는 증명이다. 이는 환경적 추가성으로, 이는 앞서 시스템 경계, 베이스라인 시나리오, 그리고 데이터 품질을 통해서 확보된다. 한편, 추가성은 이 외에도 경제적 추가성, 법적·제도적 추가성, 기술적 추가성, 보편적 추가성 등이 있다. 경제적 추가성 측면에서, DACCU 기술은 tCO₂당 수백 달러에 달하는 막대한 초기 투자비와 에너지 운영비가 소요되므로, 크레딧 수익 없이는 재정적 타당성이 전혀 없음을 명확히 증명할 수 있다(Lee, 2025, p. 14). 법적·제도적 추가성의 경우 DACCU 사업 활동을 가능하게 하는 다른 신규의 법적·제도적 규제가 있는 지의 여부를 보는 것이다. 기술적 추가성의 경우, 골드스탠다드와 UNFCCC는 해당 활동이 장기적으로 탄소 집약적 기술을 고착화(Lock-in)하지 않아야

32) 환경부 「온실가스 배출권거래제 외부사업 방법론 지침」에서는 광물탄산화(mineral carbonation) 고체 탄산염 형태 저장 에 대해서는 역전 리스크 평가, 버퍼, 할인계수, 사후 모니터링 요구가 명시되어 있지 않음.

Table 8. Additionality (other than environmental additionality)

Low Carbon	Carbon Energy
<p>- Requirement from the carbon market where project methodology was submitted:</p> <ul style="list-style-type: none"> · <u>Legal and institutional additionality</u> · Economic additionality <p>- Verification of required additionalities above</p> <ul style="list-style-type: none"> · No analysis of legal and institutional additionality · No analysis of economic additionality 	<p>- Requirement from the carbon market where project methodology was submitted:</p> <ul style="list-style-type: none"> · <u>Legal and institutional additionality</u> · Universal additionality <p>- Verification of required additionalities above</p> <ul style="list-style-type: none"> · Legal and institutional additionality was verified. <ul style="list-style-type: none"> → However, the firm's analysis was for the approval of methodology, not for the project approval, the certification body will recheck based on the legal & institutional standards applicable at the time of actual project implementation when the corresponding mitigation credits are generated. · No analysis of universal additionality <ul style="list-style-type: none"> → As the third-party verifier evaluates the methodology, not the project, the absence of analyses on legal & institutional additionality and universal additionality is acceptable at this stage. However, it is recommended to present the relevant criteria and results of additionality analysis when submitting future project plans.

Source: Author's summary based on the main text

Note: Common points between the two firms are underlined.

함을 요구한다(Gold Standard, 2025, p. 8; UNFCCC, 2025a, p. 12).

여타 추가성의 경우, 특정 국가의 사업으로 진행될 때 분석하는 것이므로, 방법론 개발 차원에서는 이를 상세히 보지 않는다. 먼저 로우카본사의 경우, 방법론을 제출한 한국에너지공단 배출권거래제 외부사업에서 법적·제도적 추가성 항목을 중심으로 검토받은 것으로 나타났다. 다만, 방법론 제출 이후 인증기관의 검토의견서에서는 법적·제도적 추가성, 보편적 추가성, 경제적 추가성에 대한 정량적 분석을 명시적으로 요구하지는 않았던 것으로 나타났다.

한편, 카본에너지사의 경우, 방법론을 제출한 대한상공회의소 탄소감축인증표준에서 온실가스를 줄이기 위한 추가적인 노력이 있었는지를 보기 위해 두 가지 측면을 요구하는데, 하나는 법적·제도적 규제 이상의 감축이고, 다른 하나는 보편적 수준 이상의 감축이다. 카본에너지사는 경제성 분석 등 동 사항에 대해 방법론 단계에서 정량적 자료를 제시하지 않은 것으로 나타났다. 카본에너지사가 방법론 제출 전 받은 제3자 기관 검토 보고서에서도 향후 대한상공회의소 탄소감축인증표준에서 요구하는 추가성 입

증에 필요한 대응이 필요하다고 기술되어 있다. 두 개 기관을 비교한 결과는 Table 8과 같이 정리될 수 있다.

4.6. 국제 표준 정합성

DACCU 감축 사업에서 국제표준 정합성은 해당 방법론이 특정 국가의 제도적 맥락에 한정된 감축 수단에 머무를 것인지, 아니면 국제 자발적 탄소시장과 향후 CDR 중심의 글로벌 크레딧 체계로 확장될 수 있는지를 판단하는 핵심 기준이다.

로우카본사의 경우, 방법론 개발 시 ISO 14040/14044에서 제시하는 전과정평가의 기본 원칙과 프레임워크를 준용하여 시스템 경계를 설정하고, 주요 배출원을 식별하며, 산정 구조의 논리적 일관성을 확보하고자 하였다. 여기서 ISO 14040/14044는 원자재, 부자재, 에너지, 건설·설치, 운영, 유지보수, 그리고 말단처리까지 과정을 포함하며, 원료 채취부터 폐기 및 처분까지 요람에서 무덤까지(Cradle-to-Grave) 경계 설정을 활용하도록 안내하고 있다. 또한 국제 자발적 탄소시장 방법론 및 가이드라인으로서 골드스탠다드, 베라, 퓨어어스(Puro.earth) 등에서 제시하

Table 9. International standard alignment

Low Carbon	Carbon Energy
<ul style="list-style-type: none"> - The firm pursued compliance with international project methodologies. · <u>Methodology was developed based on ISO 14040/14044 Life Cycle Assessment (LCA) international standard guidelines.</u> · VERRA methodologies were referred to. <ul style="list-style-type: none"> → Primary reference was CarbonCure Inc.’s methodology (VM0043). · Methodologies of Gold Standard and PuroEarth were considered 	<ul style="list-style-type: none"> - The firm pursued compliance with international project methodologies. · <u>Methodology was developed based on ISO 14040/14044 Life Cycle Assessment (LCA) international standard guidelines</u> · Conservative assumptions and the principle of avoiding double counting were reflected. · <u>VERRA methodologies were referred to.</u> <ul style="list-style-type: none"> → Verra’s DAC-related module (VMD0056) · The high-quality CDR standards of Microsoft / Carbon Direct was considered in the methodology structuring.
<ul style="list-style-type: none"> - Complete alignment with international project methodologies · Difficulty exists as the firm’s technology used differs from those employed in international methodologies 	<ul style="list-style-type: none"> - Complete alignment with international project methodologies · Difficulty exists as the firm’s technology used differs from those employed in international methodologies

Source: Author’s summary based on the main text

Note: Common points between the two firms are underlined.

는 DAC 기술 및 CO₂ 활용·광물화 관련 방법론을 검토하여, 감축량 산정 항목의 구성, 프로젝트 배출 범위 설정, 영구성에 대한 기본 논리를 참고하였다.³³⁾ 그러나, 로우카본사의 기술이 국제방법론에서 활용된 기술과 동일 기술이 아닌 바, 방법론 개발에 어려움이 있었다.

한편, 카본에너지사는 방법론 설계 단계에서 국제표준을 적극적으로 반영하고자 하였는데, 크게 세 가지 측면에서 접근하였다. 먼저, 국제표준화기구 ISO 14040/14044를 참고하였다.³⁴⁾ 다음으로, 자발적 탄소시장인 베라의 DAC 관련 모듈(VMD0056)을 활용하였다.³⁵⁾ 그 이유는 대기 중 CO₂를 직접 포집하여, 포집·고정·활용(또는 격리) 단계별로 감축량을 산정한다는 점에서 동일한 기본 골격을 가지기 때문이다. 세 번째는 마이크로소프트(Microsoft)와 카본다이렉트(Carbon Direct)가 공동으로 개발 및 제시하는 자체 평가 기준을 참고하였다. 해당 기준은 CDR 접근법과 관련하여 요람에서 문까지(Cradle-to-Gate) 전과정 평가 기반으로 직·간접적인 토지이용변화와 전체 프로젝트 기간 동안의 모든 배출원을 고려하며, 탈루성 배출에 대해 연료의 업스트림을 고려하도록 제시하고 있다. 국내 자발적 탄소시장에 방법론을 제출하기 전, 이러한 국제 방법론들을 참고하여 방법론 개발에 적극 활용함으로써, 향후 국제 탄

소시장에의 방법론 승인·인증을 도모하고자 하였다. 다만, 카본에너지사의 방법론은 국제 기준과 유사하면서도 ‘탄소 제거 + 에너지 생산’이라는 다중 산출 구조(Multi-Output DAC)를 가진다. 이는 국제 탄소시장에서 인증하고 있는 DAC 기술과는 상이하며, 향후 국제방법론 인증 과정에서 기술적 유사성이 다른 이슈(다중 산출물 배분/경계 명확화)에 대응해야 할 것으로 보인다. 두 개 기관을 비교한 결과는 Table 9와 같이 정리될 수 있다.

4.7. 소결: DACCU 방법론 개발 시 고려할 사항

로우카본사는 의무적 탄소시장인 국내 배출권거래제 외 부사업에 사업 방법론을 제출하였고, 카본에너지사는 자발적 탄소시장인 대한상공회의소의 KCS에 사업 방법론을 제출하였다. 두 개의 기업이 제출한 탄소시장이 다른 바, 두 개 기업이 개발한 방법론의 승인 성패 및 방법론의 내용을 절대적으로 비교하는 것은 적절치 않다. 또한, 두 기업의 기술 성숙도나 규모화된 실증화 수준·속도 역시 다르다. 따라서, 방법론 승인 성패에는 MRV 체계의 구성요소들을 얼마나 잘 이해하고 구조화하여 방법론을 준비했는가 상당한 역할을 한 것으로 보인다. 다만, 두 개 기업의

33) Verra VCS의 「Methodology for CO₂ Utilization in Concrete Production」, Gold Standard의 「Carbon Sequestration through Accelerated Carbonation of Concrete Aggregate」, Puro.earth의 「Carbonated Building Materials」 방법론을 참고.

34) ISO 14040 및 ISO 14044는 제품 및 서비스의 전과정평가(LCA)를 위한 국제표준이다. ISO 14040은 LCA를 수행하는 과정에 대한 원칙과 프레임워크를 제공하며, ISO14044는 LCA 실행에 대한 지침을 제공한다(LRQA, 2026).

35) VMD0056 CO₂ Capture from Air (Direct Air Capture) 모듈 1개이다. 이는 카본큐어사가 Verra를 통해 승인 및 등록한 방법론과는 다르다.

방법론을 MRV 체계의 6개 요소 측면에서 구체적으로 살펴본 결과, DACCU 기술에 기반한 사업 방법론 구성 시 무엇을 고려해야 하는 지가 도출될 수 있다고 본다. 이를 6개 요소 측면에서 하나씩 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 시스템 경계 설정 측면에서, 먼저 시스템 경계의 ‘범주’ 차원에서 사업자의 통제 범위 내의 물리적·지리적 경계를 명확히 정의내리고, 시스템 경계 내의 온실가스 배출원 요소들을 명확히 정의내려야 한다. 이 때, 전과정 평가(LCA) 기반의 접근을 고려할 필요가 있다. LCA 접근법에 따라서, 설비 설치·운영·사용 전 단계뿐 아니라 업스트림 배출, 설비 수명 개념, 대체효과까지를 경계에 포함함으로써 순 제거량을 구조적으로 산정할 수 있도록 설계하는 것이 필요하다. 다음으로, 시스템 경계에 대한 사항을 방법론 상에서 작성할 때, 설비 수명, 사업 경계 및 방법론 특성에 따른 조건들을 명확히 하고, 조건 설정의 필요성 및 관련 출처도 타당하게 제시해야 한다. 또한, 방법론을 제출하는 해당 탄소시장에서 규정한 온실가스 별로 작성이 필요하다.

둘째, 베이스라인 시나리오 설정 측면에서, 베이스라인 설정 시 DACCU 사업의 특성에 따라, ‘제거’와 ‘배출회피’ 개념에 따라 해당 사항을 포함할 필요가 있다. 베이스라인 시나리오는 DACCU 사업이 수행되지 않았을 상황을 가정하여 이의 산정식을 구체적으로 제시해야 한다. 이때 베이스라인 시나리오에 들어가는 배출 인자-데이터를 정의하고 출처를 제시해야 한다. 특히, 기업은 통계값이나 단일 평균치에 의존하는 것은 적절치 않을 수 있다. 또한, 베이스라인 시나리오와 프로젝트 시나리오 각각의 계산식에서 배출 인자-데이터 측면이 대응되어 일관되게 제시될 필요가 있다. 그리고, 탄소시장에 방법론을 제출하기 전에 제3자 기관 검증을 통해 베이스라인 시나리오에 대한 논리적 타당성이 확보되었음을 확인받는 프로세스도 추천된다.

셋째, 데이터 품질 측면에서, 먼저, 실제 ‘실증’사업에 기반한 ‘데이터 출처’를 확보하는 것이 필요하다. 다음으로, 데이터 측정의 대상인 ‘배출 인자’를 대상으로, 측정 인자, 측정 방법, 데이터 단위, 기록 주기, 품질보증·품질관리 절차를 정의하는 것이 필요하다. 감축량 산정에 필요한 관련 변수가 명확히 제시될 필요가 있다. 이러한 데이터를 확보하고 품질을 관리하는 것보다 더 중요한 것은 데이터의 ‘장기성·연속성·실측성’이다. 의무적 탄소시장일수록 그리고 국제적 탄소시장일수록, 데이터가 해당 설비를 장기(1년)적으로 운영하고 연속적인 연단위 데이터를

요구하는 경향이 있기 때문이다. 마지막으로, 이러한 데이터에 대해서 ‘제3자 검증’에 준하는 외부컨설팅을 받는 것도 의미가 있을 수 있다.

넷째, 영구성 및 역전 리스크 측면에서, 먼저 DACCU 기술의 경우 ‘영구성’과 ‘역전 리스크’ 규칙에 대한 중요성을 인식할 필요가 있고, 관련 국내·외 제도가 이 규칙을 어떻게 다루고 있는 지 파악하는 것이 필요하다. DAC 기술의 경우, 포집된 CO₂가 지중 저장(storage)될 경우 가장 높은 영구성을 갖지만, 만약 활용(utilization)된다면 도출되는 제품에 따라 영구성이 천차만별이다. 예를 들어, 탄산음료에 활용되면 영구성이 거의 존재하지 않고, 광물화로 활용되면, 상대적으로 높은 영구성을 갖는다. 또한, CO₂가 광물화로 활용된다면, 그 광물이 지중저장되는 지 아니면 건축물 자재로 활용되는 지 아니면 또 다른 어떤 목적으로 활용되는 지에 따라 영구성이 달라진다. 따라서, DACCU 기술을 통해 CO₂가 활용되어 도출되는 생산물이 무엇인가에 따라서 전주기평가 관점에서 접근이 필요하다. 특히, 현재 국내 제도에서 광물탄산화에 대해 별도 관리가 요구되지 않는 경향이 있으나, 국제 탄소시장 진출 또는 고품질 제거(removal) 기준과의 연계를 목표로 한다면, 기업은 장기 안정성에 대한 최소한의 과학적 근거를 사전에 준비할 필요가 있다. 이를 위해서 관련 탄소시장 제도의 방법론 현황과 연구문헌 등을 참조하는 것이 필요하다. 아직 국내 제도에서는 ‘제거’와 관련하여, 일련의 규칙이 고려되고 있지 않으나, 국제 탄소시장의 경우, 버퍼풀이나 보험 메커니즘 등의 접근법들이 중요하게 다루어지고 있다는 점을 고려할 필요가 있다.

다섯째, 추가성 측면에서, 대부분의 MRV 체계는 환경적 추가성을 중심으로 진행된다. 그러나, 방법론을 제출하는 탄소시장의 특성에 따라 범·제도적 의무를 초과하는지(범·제도 추가성), 해당 활동이 보편적 관행인지(보편적 추가성), 크레딧 수익 없이는 실행되지 않는지(경제적 추가성) 등을 사전에 점검하고, 그 입증 자료(규제 검토표, 산업 관행 조사, 투자 의사결정 자료 등)를 준비해야 한다. 이러한 부분들을 고려하여 정성 및 정량적 접근이 역시 필요하다. 물론 실제 ‘사업’ 단계로 들어가지 않고, 방법론 단계에서는 이러한 추가성들을 엄격하게 요구하지는 않는 편이다.

여섯째, 국제 표준 정합성 측면에서, 국내 탄소시장 진입만을 목표로 한다면 국내 지침에 최적화된 구조가 효율적일 수 있으나, 향후 국제탄소시장의 활용을 고려한다면, 다양한 국제적 표준을 고려할 필요가 있다. 이러한 국제

표준에 ISO 14040/14044 기반의 LCA 국제표준 지침, 보수적 가정 및 이중계산 방지 원칙, 자발적 탄소시장인 베라의 DAC 관련 모듈, 마이크로소프트/카본다이렉트 고품질 CDR 기준 등, 파리협정 제6.4조 메커니즘의 CDR 규칙 등이 있다. 물론 가장 중요한 것은 해당하는 DACCU 기술과 동일하거나 유사한 기술로 이미 인증받은 방법론을 활용하는 것이 중요하나, 대부분 자발적 탄소시장인 바, 의무적 탄소시장에서 인증받기 위해서는 다른 엄격한 원칙 및 기준에 대한 고려가 필요하다.

5. 결론

본 연구는 국내에서 DACCU 기술을 보유하고 탄소크레딧 확보를 목적으로 사업 방법론을 개발·제출한 두 개의 민간 기업인 로우카본社와 카본에너지社의 사례를 대상으로, MRV 체계의 여섯 가지 핵심 요소인 i) 시스템 경계, ii) 베이스라인 시나리오, iii) MRV 데이터 품질 확보, iv) 영구성 및 역전 리스크, v) 여타 추가성, vi) 국제 표준 적합성을 중심으로 비교·분석하였다. 이는, DACCU 기술에 기반해 방법론을 개발하고자 할 때 어떠한 사항들을 고려해야 하는지에 대해, 여섯 가지 요소 별로 핵심 사항들을 도출하는 것이 목적이었다. 정리하면, 본 연구가 분석한 DACCU 감축사업 방법론 사례는, DACCU 기술 자체의 우수성보다 MRV 체계를 어떻게 설계하고 통합했는지가 탄소크레딧 확보와 시장 진출의 성패를 좌우한다는 점을 분명히 보여준다. 향후 DACCU 분야에 진입하려는 국내 기업의 입장에서 가장 중요한 요소는, 단일 기술이나 단일 기준의 충족이 아니라, MRV 체계에 필요한 여섯 가지 요소에 대해 하나의 일관된 논리 구조로 방법론을 설계하는 능력이라 할 수 있다. 이는 곧 DACCU 감축사업이 기술 개발·실증의 연장선일 뿐만 아니라, 시장 검증을 전제로 한 제도적 설계 과정임을 의미하며, 향후 국내 DACCU 산업이 탄소시장과 실질적으로 연결되기 위해 반드시 고려해야 할 사항이다.

기업이 방법론을 개발하기 위해 고려해야 할 사항들 외에도, 정부 차원에서의 지원 방향이 크게 세 가지 측면에서 다음과 같이 도출될 수 있다. 첫째, DACCU 기술에 대한 ‘정의’와 ‘지침’을 명확히 내릴 필요가 있다. 감축(mitigation) 활동은 크게 배출저감(emission reduction) 활동과 제거(removal) 활동으로 구분된다. DACCU 기술에 기반한 사업은 감축 활동에 속하지만, 보다 명확히는 ‘제거’ 활동이다. 그런데, 우리나라 탄소시장은 ‘제거’ 활동을

명확히 규정하고 있지 않은 바, DACCU 사업에 대한 방법론 개발 시에도 명확한 지침을 제공하지 못하는 것으로 보인다. 특히, 제거 사업의 경우, 전주기 평가(LCA) 항목과 영구성 및 역전 리스크 항목이 중요한 데, 우리나라의 무적·자발적 탄소시장에서는 이러한 항목에 대해 별도의 상세 규칙을 제시하고 있지 않다. 따라서, DACCU 기술을 포함한 제거 활동에 대한 정의와 방법론 개발 지침을 마련하는 것이 필요하다.

둘째, 우리나라 DAC 기술 기반 기업들이 초점을 두고 있는 DACCU 기술 사업화를 위한 방법론 개발과 관련하여 ‘비용 지원’이 필요할 수 있다. 최근 Mercer et al. (2024)의 연구와 같이, CDR 접근법에 대한 MRV 방법론 개발과 이의 적용에 상당한 비용이 소요되는 바, 이에 대한 정부 차원의 지원의 필요성이 언급되고 있다. 또한, 방법론 개발 이후, 방법론을 탄소시장에 제출하기 전 제3자 검증이 필요한 데, 여기에도 비용이 소요되는 바, 이를 위한 재정 지원이 필요할 수 있다.

셋째, 보다 근본적으로 DACCU 기술 기반 ‘실증 사업화’에 대한 정부 차원의 지원이 필요할 수 있다. 앞서 언급된 바와 같이, 의무적 탄소시장 그리고 국제 탄소시장의 경우, DACCU 기술 기반 사업화 방법론 개발에 랩 스케일이 아닌 실제 소규모 실증 사업 기반의 장기적·연속적·실측 데이터가 필요하다. 이를 위해서는 소규모·중규모 실증 레벨에서, 실증 설비를 장기적 그리고 연속적으로 운용할 수 있어야 하는데, 사업 리스크가 크고 비용이 상당한 바 실측 데이터 확보가 쉽지 않다. 따라서, 근본적으로, 실증 사업화에 필요한 자원 마련이 시급하고, 이를 위해 정부, 투자 기관, 민간 벤처캐피탈, 민간기업의 자원이 결합된 혼합 자원 포트폴리오 접근법이 필요할 수 있다.

다음으로 동 연구의 의미를 살펴보면, 기존 연구가 CDR 접근법에 적용되는 MRV 요건을 전반적으로 다루거나 CDR 세부기술에 MRV 적용시 기술별 MRV 특성과 공백이 무엇인가에 대해서 일반적으로 접근하는 데에 초점을 두었다면, 동 연구는 DACCU라는 세부 기술 기반으로 사업화 방법론 개발이라는 현장적인 측면에 초점을 두었다. 즉, 동 연구는 DACCU 기술 보유자가 실제 사업화까지 가기 위해 자체적으로 사업방법론 개발 시 고려할 MRV 요건들을 세분화하고 사업방법론 인증에 필요한 사항들을 도출함으로써 MRV 연구를 보다 심화시켰다는 연구적 의의가 있다. 또한, 이러한 연구 결과는 향후 DACCU 기술을 개발하여 방법론을 개발하고자 하는 국내 연구자 및 기업에 방법론 준비 방향을 제시하고 이들

을 지원할 정부 지원 방안을 도출했다는 점에서 정책적 의의 역시 있다. 향후 연구 방향으로는 CDR 접근법에 대한 MRV 연구는 세부기술별로 MRV 상에서 고려할 세부 사항들을 도출하는 데에 초점을 맞출 필요가 있다. 이러한 세부사항들이 도출되면, 향후 세부기술 별로 MRV 상 고려해야 할 세부적인 공통 요건을 도출하는 데에도 기여할 수 있을 것으로 보인다.

마지막으로, 동 연구에서 조심스럽게 언급하고자 하는 것은 로우카본社가 방법론을 제출했지만, 승인되지 못한 것이 기술 자체의 문제를 의미하는 것은 아니라는 점이다. 로우카본社의 경우, 우리나라에서 최초로 DACCU 기술 기반 사업화 방법론을 도출하였다. 또한 로우카본社는 상당히 엄격한 사업 방법론을 요구하는 국내 의무적 탄소 시장의 승인을 위해 방법론을 제출했다는 점을 감안할 필요가 있다. 다만, DACCU 기술 기반 방법론을 도출하는 과정에서 로우카본社는 당시 제거 사업에 대한 MRV 체계와 구성요소에 대한 이해가 낮았던 바, MRV 체계 요소 및 세부 항목들을 고려하여 방법론을 구축하거나 관련해서 자료를 작성하는 것이 미비했던 것으로 보인다. 또한, 앞서 언급된 바와 같이 의무적 탄소시장에서 요구하는 사업 방법론의 엄격성이 높은 것도 원인으로 보인다. 이에, 로우카본社는 2026년 현재 신규 기술(건식 흡수제 기반 DACCU)을 토대로 실증사업을 진행중이고, 이를 토대로 자체적인 방법론을 개발중에 있다. 특히, 2022년의 방법론 검토 과정에서 알게 되었던 MRV 체계, 구성요소, 그리고 세부 항목에 대한 이해를 토대로 신규 방법론을 준비하고 있다. 로우카본社의 최초의 사전적 경험이 다른 DACCU 기술 기업들의 차후 사업화 방법론 준비 과정에 큰 의미를 줄 수 있다고 본다. 물론, 분석대상이 된 카본에너지社의 방법론 승인 역시, 국내 자발적 탄소시장 체계에 방법론을 제출하여 탄소시장을 통한 DACCU 사업화 가능성을 열었다는 점에서 매우 고무적이며, 이때 접근한 MRV 체계 구성요소별 접근법 역시 차후 다른 기업들에게 큰 사전 경험과 시사점을 제공한다고 볼 수 있다.

사사

본 연구는 국가녹색기술연구소에서 한국연구재단 연구 과제 「DACU 원천기술개발(R&D)(RS-2023-00259920)」(2023-2025)의 지원에 기반해, 세부과제 「DACU 기술실증과 활용 활성화를 위한 정책 연구」를 2024년과 2025년 수행한 결과입니다. 이는 한국기후변화학회 2025 하반기

학술대회 기후변화 정책 II 세션에서 「국내 DACCU 탄소 시장 활성화를 위한 탄소크레딧 방법론 개발 및 등록 사례분석」 제목으로 학술 발표에 일부 발표되었습니다. 동 연구 과정에서 많은 도움을 주신 로우카본社 및 카본에너지社 관계자분들께 감사의 인사를 드리며, 기후변화 분야 감축을 위한 신기술인 DACCU 기술 개발 및 실증 차원에서 민간 섹터에서 도전하시는 과정에 많은 감화를 받았음을 이 자리를 통해 밝힙니다.

Reference

- Ahmad F, Laraib N, Fatima M, Noor S, Zain NS, Khan MI, Shanableh A, Luque R. 2026. Capturing carbon, creating value: Unlocking carbon capture and storage and carbon capture and utilization for a net-zero future. *Biofuels Bioprod Biorefin.* doi: 10.1002/bbb.70120
- Bach LT, Vaughan NE, Law. CS, Williamson P. 2024. Implementation of marine CO₂ removal for climate mitigation: The challenges of additionality, predictability, and governability. *Elem Sci Anth* 12(1): 00034. doi: 10.1525/elementa.2023.00034
- CDR Mission. 2024. Measurement, reporting and verification (MRV) for carbon dioxide removal (CDR). *Mission Innovation*; [accessed 2025 Sep 26]. https://mission-innovation.net/wp-content/uploads/2024/12/2024-12_CDR-Mission-MRV-Report.pdf
- Daum. 2026. Exchange rate; [accessed 2026 Jan 7]. <https://finance.daum.net/exchanges>.
- Doney S, Lebling K, Ashford OS, Pearce CR, Burns W, Nawaz S, Satterfield T, Findlay HS, Gallo ND, Gattuso JP. 2025. Principles for responsible and effective marine carbon dioxide removal development and governance. *World Resources Institute.* hal-05121256; [accessed 2025 Aug 27]. <https://hal.science/hal-05121256/document>
- EU. 2024. Regulation (EU) 2024/3012 of the European Parliament and of the council of 27 November 2024, establishing a Union certification framework for permanent carbon removals, carbon farming and carbon storage in products; [accessed 2025 Oct 16]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L>

- _202403012
- Gold Standard. 2023. Procedure for development, revision, and clarification of methodologies and methodological tools (Version 2.0). The Gold Standard Foundation; [accessed 2025 Oct 14]. https://globalgoals.goldstandard.org/standards/401_V2.0_SDGIQ_Methodology-approval-procedure.pdf
- Gold Standard. 2025. Methodology standard: Requirements for methodology development (version 1.0). The Gold Standard Foundation; [accessed 2025 Dec 10]. https://globalgoals.goldstandard.org/standards/446_V1.0_Requirements-for-methodology-development.pdf
- Grubert E, Talai S. 2024. The distortionary effects of unconstrained for profit carbon dioxide removal and the need for early governance intervention. *Carbon Manage* 15(1): 2292111. doi: 10.1080/17583004.2023.2292111
- Halloran PR, Bell TG, Burt WJ, Chu SN, Gill S, Henderson C, Ho DT, Kitidis V, La Plante E, Larrazabal M, Loucaides S, Pearce CR, Redding T, Renforth P, Taylor F, Toome K, Torres R, Watson A. 2025. Seawater carbonate chemistry based carbon dioxide removal: Towards commonly agreed principles for carbon monitoring, reporting, and verification. *Front Clim* 7: 1487138. doi: 10.3389/fclim.2025.1487138
- Hayashi D, Michaelowa A. 2013. Standardization of baseliine and additionality determination under the CDM. *Clim Policy* 13(2): 191-209. doi: 10.1080/14693062.2013.745114
- ICVCM (The Integrity Council for the Voluntary Carbon Market). 2024 Jan. Assessment framework (version 1.1). Integrity Council for the Voluntary Carbon Market. p. 51-102; [accessed 2025 Oct 15]. <https://icvcm.org/wp-content/uploads/2024/02/CCP-Section-4-V1.1-FINAL-15May24.pdf>
- IEAGHG (IEA Greenhouse Gas R&D Programme). 2024. Measurement, reporting and verification (MRV) and accounting for carbon dioxide removal (CDR) in the context of both project-based approaches and national greenhouse gas inventories (NGHGI). Technical Report 2024-09. doi: 10.62849/2024-09
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2022. Climate change 2022 mitigation of climate change; [accessed 2025 Oct 16]. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf
- IPCC. 2025. Decision adopted by the panel (Sixty-third session of the IPCC 27-30 October 2025, Lima, Peru); [accessed 2025 Oct 16]. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2025/11/Decision-6-MR-CDR.pdf>
- KCS (KCCI Carbon Standard). 2025. KCS in brief; [accessed 2025 Dec 9]. <https://kcs.centero.kr/>
- KECO (Korea Environment Corporation). 2021. Common guidelines for carbon offset project methodologies; [accessed 2025 Dec 9]. https://etrs.gir.go.kr/home/board/read.do?jsessionid=T11HK2ERT9tOyJBSL4b15SKLQ8LgEv5uNi7bGtv2JgE1Bkvuvon1gnRjXy5GbHnj.og_etwas1_servlet_engine1?pagerOffset=10&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=2&boardMasterId=4&boardId=49
- KLIC (Korea Law Information Center). 2024. Guidelines on pre-approval of international emission reduction projects and acquisition of international emission reduction credits; [accessed 2025 Aug 6]. <https://www.law.go.kr/admRulLsInfoP.do?admRulId=87138&efYd=&admRulNm=%EA%B5%AD%EC%A0%9C%EA%B0%90%EC%B6%95%EC%82%AC%EC%97%85%20%EC%82%AC%EC%A0%84%EC%8A%B9%EC%9D%B8%20%EB%B0%8F%20%EA%B5%AD%EC%A0%9C%EA%B0%90%EC%B6%95%EC%8B%A4%EC%A0%81%EC%9D%98%20%EC%B7%A8%EB%93%9D%20%EB%93%B1%EC%97%90%20%EA%B4%80%ED%95%9C%20%EC%A7%80%EC%B9%A8&lnkYn=Y>
- Korea Energy Agency (KEA). 2026. Emissions trading scheme external projects in the industry and transition sectors - Considerations for preparing monitoring reports; [accessed 2026 Jan 27]. https://offset.energy.or.kr/reduction/considerations_r05.do
- Kung L, Aeschlimann S, Charalambous C, McIlwaine F, Young J, Shannon N, Strassel K, Maesano CN, Kahsar R, Pike D, van der Spek M, Garcia S. 2023.

- A roadmap for achieving scalable, safe, and low-cost direct air carbon capture and storage. *Energy Environ Sci* 16: 4280-4304. doi: 10.1039/D3EE01008B
- Lebling K, Riedl D, Leslie-Bole H. 2024a Jun 13. High-quality carbon removal requires credible and consistent MRV - Government oversight can help; [accessed 2025 Oct 20]. <https://www.wri.org/technical-perspectives/measurement-reporting-verification-of-carbon-removal>
- Lebling K, Riedl D, Leslie-Bole H. 2024b. Measurement, reporting, and verification for novel carbon dioxide removal in US federal policy. World Resources Institute (WRI) working paper.
- Lee D. 2025. Understanding carbon offset project methodologies. Carbon offset verification auditor training materials.
- LRQA. 2026. Life cycle assessment the third verification; [accessed 2026 Jan 23]. <https://www.lrqa.com/ko-kr/iso14040-14044/>
- Mac Dowell N, Reiner DM, Haszeldine RS. 2022. Comparing approaches for carbon dioxide removal. *Joule* 6(10): 2233-2239. doi: 10.1016/j.joule.2022.09.005
- Mercer L, Burke J. 2023 May. Strengthening MRV standards for greenhouse gas removals to improve climate change governance. England, London: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment. Policy report.
- Mercer L, Burke J, Rodway-Dyer S. 2024 Oct. Towards improved cost estimates for monitoring, reporting and verification of carbon dioxide removal. England, London: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment; [accessed 2025 Oct 21]. <https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/wp-content/uploads/2024/10/Towards-improved-cost-estimates-for-monitoring-reporting-and-verification-of-carbon-dioxide-removal-pdf>
- Oh C, Oh S, Song Y. 2024. Policy research for the demonstration and promotion of DACU technology. Seoul, Korea: National Institute of Green Technology. Research report.
- Oh C, Song Y, Kim R, Choi K, Choi K. 2022. Application of environmental integrity to the institutional design of Korea's global carbon market mechanism under Article 6.2 of the Paris Agreement (in Korean with English abstract). *J Clim Change Research* 13(6): 755-778. doi: 10.15531/KSCCR.2022.13.6.755
- Song S, Heo E. 2007. A study on the applicability of CDM project methodology. *New Renewable Energy* 3(4): 104-113.
- Song Y, Oh C. 2023. Market-pull, technology-push, and regulatory stringency determinants: All in need in firms' decisions for large-scale demonstration of direct air capture technologies. *Energy Res Soc Sci* 106: 103339. doi: 10.1016/j.erss.2023.103339
- Trendafilova P. 2025. Top 20 direct air capture companies in 2025; [accessed 2025 Sep 18]. <https://carbonherald.com/top-20-direct-air-capture-companies/>
- UNFCCC. 2021. Rules, modalities and procedures for the mechanism established by Article 6, paragraph 4, of the Paris Agreement; [accessed 2025 Sep 25]. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2021_L19E.pdf
- UNFCCC. 2024. A6.4-STAN-METH-002: Requirements for activities involving removals under the Article 6.4 mechanism (version 01.0). Supervisory body of the Article 6.4 mechanism; [accessed 2025 Sep 25]. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/A6.4-STAN-METH-002.pdf>
- UNFCCC. 2025a. A6.4-STAN-METH-003: Demonstration of additionality in mechanism methodologies (version 01.2). Supervisory body of the Article 6.4 mechanism; [accessed 2025 Sep 25]. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/A6.4-STAN-METH-003.pdf>
- UNFCCC. 2025b. A6.4-STAN-METH-005: Addressing leakage in mechanism methodologies (version 01.0). Supervisory body of the Article 6.4 mechanism; [accessed 2025 Sep 25]. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/A6.4-STAN-METH-005.pdf>
- UNFCCC. 2025c. A6.4-STAN-METH-004: Standard:

- Setting the baseline in mechanism methodologies (version 01.0). Supervisory body of the Article 6.4 mechanism; [accessed 2025 Sep 25]. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/A6.4-STAN-METH-004.pdf>
- Van der Spek M, Bardow A, Baum C, Bolongaro V, Dufour-Decieux V, Esch C, Fritz L, Garcia S, Hamann C, Hondegorg D, Kiani A, Leuck S, Patel SK, Peh SB, Pisciotta M, Psarras P, Repke T, Saenz-Cavazos PA, Schulte I, Shu D, Shu Q, Sovacool B, Strefler J, Castano SV, Wang JY, Wessling M, Wilcox J, Young J, Minx JC. 2025. An ecosystem of carbon dioxide removal reviews – part 1: Direct air CO₂ capture and storage. *Energy Environ Sci* 18: 9713. doi: 10.1039/d5ee01732g
- Verra. 2024. VMD0056: CO₂ capture from air (direct air capture) (version 1.0). Verra; [accessed 2025 Nov 4]. <https://Verra.org/methodologies/vmd0056-co2-capture-from-air-direct-air-capture-v1-0/>
- Verra. 2025. Methodology development and review process (version 5.0). Verra; [accessed 2025 Nov 4]. <https://Verra.org/wp-content/uploads/2025/06/Methodology-Development-and-Review-Process-v5.0-4.pdf>
- Yao Y, Zhang B. 2025. Life cycle assessment in the monitoring, reporting, and verification of land-based carbon dioxide removal: Gaps and opportunities. *Environ Sci Technol* 59: 11950-11963. doi: 10.1021/acs.est.4c09510