



직접대기탄소포집·저장(DACCS) 기술에 대한 우리나라 R&D 정책 방향성 연구 : DAC 기술 중심으로

송예원* · 오채운**†

*녹색기술센터 정책연구부 연구원, **녹색기술센터 정책연구부 책임연구원

Korea's Policy Direction on the Research & Development of Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) Technologies : Focusing on DAC technologies

Song, Yewon* · Oh, Chaewoon**†

*Researcher, Division of Policy Research, Green Technology Center, Seoul, Korea

**Principal Researcher, Division of Policy Research, Green Technology Center, Seoul, Korea

ABSTRACT

As a way to mitigate climate change, reducing greenhouse gas emissions from specific emission sources has been the focus of most research. Recently, however, increasing attention has been paid to a carbon dioxide removal approach that removes greenhouse gases from the atmosphere. While this approach utilizes diverse technologies, this paper focuses on direct air carbon capture and storage (DACCS) technologies. This technology is being considered as one of the mitigation options by governments and private sectors in several developed countries. Direct air capture (DAC) technology is also included in Korea's 2050 carbon neutrality scenario. Yet, DAC technology, which is related to DACCS technology, has a very small stake in that scenario. Furthermore, Korea has never undertaken R&D projects on DACCS technologies. Although some R&D projects have been conducted in Korea with yielded results, they were on general carbon capture, utilization and storage (CCUS) technologies, not directly dealing with DACCS. Therefore, this paper attempts to explore Korea's R&D potential for DACCS, focusing on DAC technologies, for DACCS technology deployment in Korea to meet the national mitigation target. In this regard, this paper questions whether the current research capacities of Korea are compatible with those required for DACCS technologies. From previous literature on three factors that influence the deployment of DACCS technologies, i) technological factors, ii) economic factors, and iii) environmental factors, this paper formulated an analytical framework with four technological factor components: i) capture materials, ii) capture process, iii) required (input) energy, and iv) carbon credits from technology project implementation. This paper analyzes current Korean R&D capacity in these four components and draws recommendations for future policy.

Key words: Climate Change, Carbon Dioxide Removal (CDR) Approach, Direct Air Carbon Capture And Storage (DACCS), Direct Air Capture (DAC), Liquid Solvent Process, Solid Sorbent Process, R&D Policy

†Corresponding author : chaewoon.oh@gmail.com (Green Technology Center, 17th floor, Namsan Square Bldg., 173, Toegyero, Jung-gu, Seoul 04554, Korea. Tel. +82-2-3393-3987)

ORCID 송예원 0000-0002-2767-094X

오채운 0000-0003-1357-5519

Lead author : Yewon Song, Chaewoon Oh

Received: November 19, 2021 / Revised: December 20, 2021 1st, January 3, 2022 2nd / Accepted: January 21, 2022

1. 서론

2015년 채택된 파리협정은 전 지구적 온도 상승을 산업화 이전 수준 대비 2°C로 억제한다는 목표를 설정하였고, 1.5°C를 넘지 않도록 노력한다는 목표를 설정하고 있다. 파리협정을 채택한 유엔기후변화협약(UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change) 제21차 당사국총회는 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)로 하여금 1.5°C 목표 달성을 위한 시나리오와 배출 경로에 대한 전 세계의 연구 결과를 정리하여 2018년까지 특별보고서를 발간하여 줄 것을 요청하였고, 이에 따라 IPCC는 2018년 10월 ‘1.5°C 특별보고서’를 발간하였다.¹⁾ 본 보고서는 1.5°C 목표 달성을 위해 2050년 즈음 전 지구적으로 이산화탄소 순무배출(net-zero emission)을 달성하여야 함을 보였고, 완화 노력의 정도에 따라 총 네 가지의 완화 시나리오를 도출하였다.²⁾ 각 시나리오에서 검토하는 완화 노력은 i) 화석 연료 사용 및 산업 부문의 배출량 저감, ii) 에너지 저수요 생활 패턴으로의 전환, iii) 이산화탄소 제거(CDR, carbon dioxide removal) 접근법 활용으로 구분할 수 있다(IPCC, 2018, p. 14). 이러한 완화 노력 중에서 주목할 점은 가장 강력한 산업 부문의 저감과 급격한 저수요 생활 패턴으로의 전환이 요구되는 시나리오에서조차 CDR 접근법의 활용이 필수적이라고 강조되었다는 점이다(Ibid.).

CDR 접근법은 ‘대기 중’의 이산화탄소를 포집하여 다른 물질에 격리시키는 방법을 통해 대기로부터 이산화탄소를 제거하려는 접근법이다. 이 CDR 접근법은 크게 두 가지로 구분되는데, 하나는 이전부터 중요성이 인정되어 오던 조림 등의 생태계 기반 CDR 접근법이고, 다른 하나는 기술을 활용하여 인위적으로 이산화탄소를 제거하는 기술 기반 CDR 접근법이다(Ibid., Sec. 2.3.4.1). 동 논문에서는 이러한 기술 기반 CDR 접근법 중 대기에 이미 배출되어 존재하는 이산화

탄소를 직접 포집하여 영구적으로 격리함으로써 대기 중의 이산화탄소를 제거하는 직접대기탄소포집-저장(DACCS, direct air carbon capture and storage) 기술에 주목하고자 한다.³⁾

그 이유는 전 세계적으로 2050년 탄소중립 달성을 위한 노력에 있어서 CDR 접근법의 활용을 고려하기 시작했기 때문이다. 우리나라도 2050년 탄소중립 목표를 설정하고, 이를 달성하기 위한 전략을 담은 ‘2050 탄소중립 시나리오’를 2021년 10월에 발표하였는데, 동 시나리오에 의하면 우리나라 역시 직접대기포집(DAC, Direct air carbon capture) 기술을 활용하여 탄소중립을 달성하고자 한다(CNC, 2021). 이 시나리오는 2050년 이전에 석탄화력발전과 가스발전을 전면 중단하는 A안과 석탄화력발전은 중단하되 가스발전은 일정 부분 활용하는 B안으로 구성되어 있으며, 두 안 모두 2050년에 순무배출 달성을 목표로 하고 있다. 이 두 개 안은 에너지 공급 외의 다른 부문에서도 차이가 존재하는데, 대표적으로 수송 부문에서 A안에서는 전체 차량 중 95% 이상이 전기 및 수소 차량인 상황을 가정하였으나, B안에서는 대체연료(e-fuel)를 활용한 내연기관 차량이 일부 남아 있는 것을 가정하였다. 이 B안에서 내연기관 차량에서 발생한 온실가스 배출을 상쇄하기 위해 우리나라는 이미 배출되어 대기 중에 존재하는 이산화탄소를 포집하는 기술인 직접대기포집(DAC) 기술을 활용하겠다는 전략이 포함되었다(CNC, 2021).

그러나 우리나라에서는 동 기술에 대한 직접적인 R&D 사업 역시 진행된 적이 없고, 또한 기술을 적용한 바가 없으며 관련 시설이 존재하지 않은 상태이다. 2050년 탄소중립 목표 달성을 위하여 동 기술의 적용 가능성이 시나리오에 포함되어 있는바, 동 기술의 R&D 및 활용에 대해서 구체적인 검토가 필요하다고 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 DACCS 기술에 대한 우리나라의 연구·개발·활용 방향에 대해서 고찰하고자 한다. 이를 위해, 일차적으로 현재 우리나라가 관련하여 보유한 일반 탄소포집-저장(CCS, carbon

1) 본 보고서의 부제를 포함한 공식 명칭은 ‘1.5°C 지구 온난화: 기후변화 위험과 지속가능발전, 빈곤 근절에 대한 전 지구적 대응을 강화하려는 배경 하에서 전 지구적 온도 상승을 산업화 이전 대비 1.5°C로 제한하는 것과 이와 관련된 전 지구적 온실가스 배출 경로의 영향에 대한 IPCC 특별보고서’이다.

2) 1.5°C 특별보고서의 네 가지 대표 시나리오는 완화 노력과 CDR 접근법의 활용 정도에 따라 P1~P4로 구분한다. P1은 에너지 수요와 공급 부문 전체의 완화 노력으로 인해 생태계 기반 CDR 접근법인 조림만을 활용해도 충분하지만, P2는 지속가능발전에 초점을 맞추며 기술적 CDR 방법을 일정 부분 활용하며, P3는 에너지 공급원 중심으로 완화 노력이 이루어지며 더 많은 기술적 CDR 접근법을 활용하고, P4는 자원 및 에너지 집중 발전으로 상당량의 기술적 CDR 방법에 의존해야 함을 보이는 시나리오이다.

3) 우리나라의 2050 탄소중립 시나리오에서는 Direct Air Capture를 직접 ‘공기’ 포집으로 번역하고 있는데, 이는 이산화탄소 포집을 배출이 발생하는 배출원이 아닌 대기 중에서 한다는 점이 핵심이므로, 동 논문에서는 직접 ‘대기’ 포집으로 번역하고자 한다. 또한, 대기에서 이산화탄소를 직접 포집하는 기술은 DAC라는 이름 외에도, 저장 기술과 함께 DACS (direct air capture with storage) 혹은 DACCS (direct air carbon capture and storage)라는 용어 역시 자주 사용된다. 우리나라의 ‘2050 탄소중립 시나리오’에서 채택한 용어가 직접공기포집(DAC)이므로 필요시에는 DAC를 그대로 인용하였으나, 본 논문에서는 IPCC에서 주로 사용하는 DACCS라는 용어를 사용하였다.

capture and storage) 기술에 대한 연구·개발·활용 역량과 얼마나 호환성이 있는지를 살펴볼 필요가 있다. 특히, DACCS 기술과 CCS 기술의 차이는 이산화탄소 포집 과정에서 발생하며, 포집된 이산화탄소의 ‘저장’ 기술은 동일하므로, 이산화탄소 포집에 대한 DAC 기술에 초점을 두고자 한다.

이에, 본 논문은 제2장에서 대기 중의 이산화탄소를 제거하기 위한 CDR 접근법의 개념과 유형을 설명하고, 이 중 대표적인 기술로 DACCS 기술을 소개하고 국제사회에서 그 중요성이 강조되게 된 배경을 설명한다. 제3장에서는 DACCS 기술을 도입할 시 고려해야 하는 요소에 대한 기존 문헌들을 살펴보고 이를 ‘기술성’, ‘경제성’, ‘사회·환경성’의 세 항목으로 구분하고, 항목별 고려 요소들을 도출한다. 그리고 제4장에서는 이러한 요소 중 ‘기술성’에 해당하는 고려 요소인 i) 포집제, ii) 공정, iii) 투입 에너지, iv) 감축실적 인정에 기반하여, 우리나라가 이미 보유하고 있는 일반 CCS 기술역량이 DAC 기술과 호환이 되는지를 분석하고, 이를 바탕으로 DAC 및 DACCS 기술을 도입하기 위한 R&D 정책의 방향성을 제시한다. 마지막으로 제5장에서는 분석 결과를 바탕으로 정책적 시사점을 도출하였고, 향후 연구 방향을 제안한다.

2. 배경

2.1 이산화탄소 제거(CDR) 접근법

유엔기후변화협약에서 대기 중 온실가스 농도 안정화라는 목표 하에 모든 당사국들이 의무적으로 관리 및 감축하기 위해 노력해야 하는 대상은 i) 온실가스의 ‘배출원에 의한 인위적 배출(anthropogenic emissions by sources)’과 ‘흡수원에 의한 제거(removal by sink)’이다.⁴⁾ 이러한 두 가지 대상 각각에 따른 감축유형(types of mitigation)은 다음과 같이 구분할 수 있다. 하나는 온실가스의 배출 점원(source)에서의 인위적 배출에 대한 감축유형으로, 이는 배출량 제한이나 배출원의 조정 등을 통해 오염물질의 배출을 저감(emission reduction) 또는 제한하는 활동이다(Park et al., 2020).⁵⁾ 다른 하나는 흡수원에 의한 제거에 대한 감축유형으로, 이는 특정 배출 점원 없이 대기 중 온실가스에

서 온실가스를 흡수원(산림 등)을 통해 제거하는 감축 활동이다(Park et al., 2020).⁶⁾ 그런데 이러한 두 가지 감축유형의 활동을 통해서 대기 중 온실가스 농도 안정화라는 목표가 충분히 달성되지 못한 상태이다(UNEP, 2020, p.34). 따라서, 또 다른 감축유형이 논의되어 왔는데, 이는 ‘제거(removal)’이다. 이는 앞서 언급된 ‘흡수원에 의한 제거’보다 확장된 개념으로, 온실가스를 일정 기간 동안 다른 물질인 식생, 토양, 광물, 해양, 제품 등에 저장하여 제거한다는 접근법이다(Burns, 2018; IPCC, 2018, p. 544; Park et al., 2020). 이 중에서 ‘대기 중’의 온실가스(이산화탄소)에 한정하여 일정 기간 동안 다른 물질인 식생, 토양, 광물, 해양, 제품 등에 저장하여 제거한다는 접근법이 바로 CDR 접근법이다. 이 CDR 접근법은 기후변화 완화 노력의 일환으로 소비 및 생산 패턴을 변경해야 하는 감축 활동 유형과 비교해, ‘대기 중’ 온실가스에 대한 감축 활동이므로 기존의 경제적 행동을 변경해야 하는 압박을 경감시켜 줄 수 있다는 측면과 동시에 기존의 감축 활동을 보완하는 측면으로서 작용할 수 있다는 장점이 있다(IEA, 2021).

이러한 CDR 접근법은 크게 두 가지로 구분되는데, 하나는 생태계 기반 CDR 접근법이고, 다른 하나는 기술 기반 CDR 접근법이다. 생태계 기반 CDR 접근법은 대기 중의 탄소를 흡수하는 성질을 가진 자연 생태계를 통한 접근법으로, 식생, 토양, 습지 등의 자연적 이산화탄소 흡수 기능을 증진 및 활용하는 방법이다. 반면, 기술 기반 CDR 접근법은 기술을 활용하여 인위적으로 대기 중의 이산화탄소를 제거하는 접근법이다(UNEP, 2017). 생태계 기반 CDR은 오랜 기간 감축 기여도가 검증되었고 사회수용성이 높다는 장점이 있으나, 식물이 활용되는 과정에서 흡수한 이산화탄소가 누출될 가능성이 있다는 단점이 존재한다. 반면, 기술 기반 CDR은 안정적인 탄소 저장소를 활용해 영구적으로 탄소격리가 가능하며, 포집에 필요한 토양 혹은 해양 면적이 매우 적다는 장점이 존재하지만, 생태계 기반 CDR 대비 사회수용성이 낮으며, 많은 경우 기술성숙도가 낮고 실증 사례가 충분하지 않으며 기술의 향후 발전 가능성을 전제로 하고 있어 감축 기여도가 현재로서는 불분명하다는 점이 약점으로 꼽힌다(Ibid.). <Table 1>은 이러한 CDR 접근법의 분류체계를 보여 준다.

4) 유엔기후변화협약에서 하에서 모든 당사국들의 의무로 몬트리올 의정서에 의해 통제되지 않는 모든 온실 가스의 “배출원에 의한 인위적 배출” 및 “흡수원에 의한 제거”에 대해 국가 인벤토리를 개발·갱신·게시·제출하고, 이러한 배출원에 의한 인위적 배출과 흡수원에 의한 제거를 통해 기후 변화를 완화하기 위한 조치를 포함하는 적절한 국가 및 지역 프로그램을 형성·이행·게시·갱신해야 한다 (UNFCCC 1992, article 4.1(a)(b)).

5) 원 출처는 GEMET (2020)이다.

6) 원 출처는 UNFCCC (1997)의 Article 3이다.

Table 1. Six major negative emission technologies for CDR approaches

Natural	Nature-technology combined	Technological
· Afforestation and reforestation (AR)	· Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS)	· Direct air carbon capture and storage (DACCS)
· Soil carbon sequestration		· Enhanced weathering
		· Ocean alkalinity

Source: Arranged by authors based on Figure 7.1 of UNEP (2017) and IPCC (2018)

이러한 CDR 접근법에는 6대 네거티브배출기술(negative emission technology)이 활용되는데, i) 조림 및 재조림(AR, afforestation and reforestation), ii) 토양 탄소 격리(soil carbon sequestration), iii) 바이오에너지 탄소포집·저장(BECCS, Bioenergy with carbon capture and storage), iv) 직접대기탄소포집·저장(DACCS), v) 강화된 풍화(enhanced weathering), vi) 해양 알칼리화(ocean alkalization)이다(IPCC, 2018, Sec. 4.3.7). IPCC 1.5°C 특별보고서의 경우, 이 중 다음의 세 가지 옵션에 초점을 맞추고 있다(IPCC, 2018, p. 42). 첫째는 생태계 기반 CDR 접근법 중에서 조림 및 재조림(AR)으로, 식물의 생장을 통해 자연적으로 대기 중의 이산화탄소를 흡수하는 기술이다. 이는 사회수용성과 기술성숙도가 모두 높으며, 다른 CDR 접근법 대비 비용이 적게 드는 장점이 있으나, 흡수한 이산화탄소가 누출될 가능성이 존재하며, 식생의 활용 측면에서 이산화탄소 제거와 식량 안보 사이에 이해 충돌이 발생할 우려가 있는 것은 장애요인으로 꼽힌다. 둘째는 기술 기반 CDR 접근법 중에서 DACCS이다. 이는 말 그대로 대기 중의 이산화탄소를 직접 포집하여 격리하는 기술로 최근 많은 기대를 모으고 있는 기술 기반 CDR 접근법이다. 그러나 대기의 이산화탄소는 농도가 약 0.04%로 극히 낮기 때문에 이를 선별하여 포집하는 데에는 에너지와 비용이 많이 들며, 아직 기술 실증이 충분히 이루어지지 않은 점이 장애 요인으로 지목된다. 셋째는 생태계 기반 및 기술 기반의 융합 CDR 접근법인 바이오에너지 탄소포집·저장(BECCS) 기술이다. 이는 대기 중의 이산화탄소를 식물을 통해 흡수하고, 이 식물을 통해 바

이오에너지를 생산하며, 생산 중에 환원되는 이산화탄소는 CCS 기술로 포집해 격리하는 기술이다. BECCS는 대기 중의 이산화탄소를 제거하면서 동시에 에너지도 생산할 수 있다는 장점이 있어 그 활용도가 높을 것으로 기대된다. 그러나 융합 접근법인만큼 BECCS의 원활한 활용을 위해서는 생태계 기반 접근법의 장애요인인 탄소 누출 가능성 및 식량 안보와의 이해상충, 기술 기반 접근법의 장애요인인 실증이 부족하다는 점에 모두 대응할 필요가 있다(UNEP, 2017, Ch. 7; IPCC, 2018, p. 42).

2.2 직접대기탄소포집·저장(DACCS) 기술

동 논문에서는 국제사회가 2050년 순무배출을 달성하기 위해서 필수적이라고 보는 기술 기반 CDR 접근법에 집중하고자 한다(IPCC, 2018; IEA, 2021). 그리고 이 접근법 중에서 DACCS 기술에 주목하고자 한다. DACCS 기술을 이해하기 위해서는 CCS 기술에 대한 이해와 비교가 필요하다. CCS는 이산화탄소 포집 기술과 저장 기술이 엮인 체인 기술이다. 화석연료 사용 및 산업 시설과 같은 대규모 점원으로부터 배출되는 배가스(flue gas)에서 이산화탄소를 포집하는 탄소포집 기술에 기반하고 있다. 이 포집된 이산화탄소를 압축 및 수송하여 지중 또는 해양 퇴적 암반층에 주입·저장하고 모니터링하는 기술과 연계될 때, 이를 CCS 기술이라고 한다(Oh et al., 2019, p.10).⁷⁾ 따라서, CCS 기술은 온실가스의 특정 배출 점원에서의 인위적인 배출량을 감축하기 때문에, CCS를 활용한 감축 유형은 배출 저감(emission reduction)에 속한다. 반면, DACCS는 배출 점원 없이 대기 중에 존재하는 온실가스를 포집 및 저장하는 기술이므로 감축유형에서 보자면 제거(removal)이며, IPCC 등에서 논의되는 표현으로는 CDR 접근법이다.

한편, 적용되는 기술 측면에서 볼 때, 포집 기술은 배출 원으로부터 포집하는 방법에 따라 구분되는바, CCS 기술의 포집 부문에 대한 연구는 i) 연소 후 포집 기술, ii) 연소 전 포집 기술, iii) 순산소 연소 기술을 중심으로 진행되고 있다. 먼저, ‘연소 후 포집’ 기술은 화석연료 사용 및 산업 시설에서 배출하는 배가스의 상당 부분을 차지하는 이산화탄소를 분리하여 포집하는 기술이며, 이는 다양한 종류의 기체가 섞여 있는 배가스에서 이산화탄소만을 추출해 포집하는 기술이다. 다음으로, ‘연소 전 포집’ 기술은

7) 포집된 이산화탄소를 ‘직접’ 또는 화학적·생물학적 방법을 통해 ‘전환’하여 잠재적 시장가치가 있는 제품으로 활용하는 기술이 탄소포집·활용(CCU, carbon capture and utilization)이다.

화석연료 사용 전 탄소를 제거해 연료 자체를 개질하여 연소과정에서 이산화탄소의 발생을 원천적으로 차단하는 기술이다. 마지막은 ‘순산소 연소’ 기술로, 이는 화석연료를 연소할 때에 일반 공기 대신 순수한 산소만 투입하여 연소하는 기법으로, 이 경우 연소과정에서 이산화탄소와 물 이외의 다른 부산물 생성을 차단함으로써 별도 공정 없이 이산화탄소를 포집할 수 있는 기술이다(KCRC, n.d.). 따라서 이 세 가지 포집 기술 중, 다양한 종류의 기체 중 이산화탄소만 선별하여 포집하는 기술은 ‘연소 후 포집’ 기술이며, DACCS 기술의 포집 부문 역시 여러 기체가 섞여 있는 대기로부터 이산화탄소를 선별 포집한다는 점에서 CCS의 연소 후 포집 기술과 기술적 유사성이 존재한다. 즉, 화석연료 사용 및 산업 시설에 적용되던 CCS 기술 중 DACCS 기술과 직접적인 비교가 가능한 기술은 연소 후 포집 기술이며, 이러한 특성을 고려해 동 논문에서는 화석연료 사용 및 산업 시설에 적용된 ‘연소 후 포집’ 기술을 편의상 ‘일반 CCS’ 기술로 칭하도록 하겠다.

아울러 DACCS 기술과 일반 CCS 기술의 ‘포집 부문’은 포집 점원이 각각 대기와 배출원이라는 차이가 존재하는 반면, DACCS 기술과 일반 CCS 기술의 ‘저장 부문’은 사실상 같은 기술을 공유한다. 이는 두 기술의 핵심적인 차이가 ‘포집’에 있다는 것을 시사한다. 이러한 특성으로 인해 DACCS 기술의 포집 부문만을 구분하여 DAC 기술이라 칭하기도 한다.⁸⁾ 그러나 IPCC에서는 감축유형상 ‘제거’ 기술로서의 역할을 강조하기 위해 단순히 포집 기술만을 의미하는 DAC 대신 DACCS라는 명칭을 지속적으로 사용하고 있으며, 이는 대기 중의 온실가스를 단순히 포집하는 데에서 그쳐서는 안 되며, 반드시 지중저장 등의 방법을 통해 ‘저장’까지 이루어져야 온실가스가 온전히 제거될 수 있기 때문이다. 동 논문에서는 이러한 IPCC의 명명법을 따라 DACCS라는 명칭을 주로 사용하되, 단순히 포집 부문에 한정하여 그 특성을 비교 논의할 때에는 DAC라는 용어를 보조적으로 사용하도록 하겠다.

DACCS 기술은 전 세계적으로 더딘 발전 및 보급 속도를 보이고 있다. 이러한 DACCS의 저조한 확산 기조는 전 세계적으로 2030년까지 유지될 것으로 보이나, 그 중요성이

계속 부각되며 2030년 이후에는 급속도로 보급되어 활용될 것으로 예상된다(IEA, 2021). 현재 DACCS 기술에 대한 실증은 캐나다의 카본엔지니어링(사)(Carbon Engineering), 스위스의 클라임웍스(사)(Climeworks), 미국의 글로벌써모스탯(사)(Global Thermostat), 총 세 개의 민간 기업을 중심으로 활발히 이루어지고 있으며, 이 중 스위스의 클라임웍스(사)는 2021년 9월 아이슬란드에서 대규모 상용 운영을 시작하였다.⁹⁾ 또한, 파리협정 목표 달성에 있어 CDR 접근법의 중요성이 강조됨에 따라 DACCS 기술에 대한 국가 정책적 검토 역시 이루어지고 있다. 일례로 영국에서는 2018년에 2050년 탄소중립 전략을 수립하며 감축 잔여분에 대하여 DACCS 기술을 활용할 수 있음을 언급하였으며, 특히 스코틀랜드에서는 DACCS를 비롯한 다양한 CDR 접근법의 전 세계적 동향 및 스코틀랜드에서의 활용 가능성을 분석하기도 하였다(RS and RAE, 2018; Haszeldine et al., 2019).

우리나라에서는 개별 연구 기관뿐만 아니라 국가 차원에서 ‘한국이산화탄소포집및처리연구개발센터’를 중심으로 일반 CCS 기술을 연구해왔으며, 해외의 DACCS에 대한 동향은 일부 파악하고 있었으나, DACCS 기술을 우리나라에 도입하는 것에 대한 R&D는 충분히 이루어지지 않았다(KCRC, 2020).¹⁰⁾ 그러나 최근 DACCS 기술의 필요성에 대해 우리나라에서도 검토하기 시작하였으며, 2050 탄소중립 시나리오 최종안에 이러한 사항이 반영되었다. 우리나라는 2030년 국가결정기여(NDC, nationally determined contributions) 상의 온실가스 감축목표를 2018년 대비 40% 감축, 2050년 탄소중립을 달성하고자 하며, 이를 위하여 탄소포집·활용·저장(CCUS, carbon capture, utilization and storage) 등을 통한 감축 노력과 더불어 산림 및 해양의 생태계 기반 CDR 접근법을 활용하고, DAC 기술 역시 일부 사용하겠다는 전략을 세웠다(CNC, 2021). 그러나 동 시나리오에 일반 CCS 기술의 활용과 산림 및 해양 흡수원에 대한 내용은 비교적 자세하게 서술되어 있는 반면, DAC 기술에 대하여는 구체적인 계획이 세워지지 않았다. 이는, 국가 감축 활동의 잔여 배출량 제거 수단으로 DAC 기술을 활용할 필요성이 있음을 인정하기는 하나, DAC에 기반한 DACCS 및 직접대기탄소포집·활용

8) 이는 우리나라 2050 탄소중립 시나리오에서도 채택하고 있는 명명법이다.

9) 스위스의 클라임웍스(사) 외의 다른 기업들도 실증 차원에서 DACCS 포집 설비를 건설하고 운영하며, 포집한 이산화탄소를 판매해 수익을 얻고 있기도 하나 본질상 상용 운전이라 보기 어렵다. 반면 클라임웍스(사)의 아이슬란드 포집 설비는 상용 운영을 목적으로 설립되어 운영 중에 있다.

10) DACCS 기술을 직접적으로 다루는 R&D는 전무하였으나, 이산화탄소 포집제 R&D에서 개발한 포집제를 대기 중의 이산화탄소 포집 용으로 적용해본 사례는 있다(Lee et al., 2014).

(DACCU, direct air carbon capture and utilization) 기술에 대한 구체적 검토까지 이루어지지 않는 것이 원인으로 사료된다. 그러나, 최근 IPCC의 1.5°C 특별보고서에서 1.5°C 온도 목표 달성에 있어 CDR 접근법의 역할이 매우 중요할 것으로 분석한바, 각국의 기후변화 대응 정책에서 다양한 CDR 접근법의 비중이 커질 것으로 보인다(IPCC, 2018, p. 14). 앞서 언급된 바와 같이 해외에서 민간기업들이 DACCS 기술을 실증 및 상용화하고 있고, 국가 차원에서 지원하기 위한 제도들을 수립하고 있다는 점을 고려할 때, DACCS 기술에 대한 우리나라의 대응 방향에 대한 입장을 검토할 필요가 있다.

3. 기존 문헌 분석 및 분석틀:

DACCS 기술 도입에 영향을 주는 요소

특정 기술에 대한 연구·개발·실증 및 도입을 고려할 때, 주로 고려하는 기술 특성은 기술성, 경제성, 환경성 세 항목이다. 국가 차원에서 고려할 때, 예를 들어 우리나라 기획재정부의 「예비타당성조사 수행 총괄지침」에서도 이 세 특성을 평가 항목으로 설정하고 있으며, 또한 특정 기술 기반 사업 레벨에서도 해당 기술을 도입한 사업이 환경에 미치는 영향을 사전에 분석하는 환경영향평가에서도 이 세 특성을 종합적으로 분석하고 있다(EIASS, 2019). 기술성, 경제성, 환경성의 세 항목으로 세분화하여 분석하는 방법은 다양한 선행 사례가 존재한다(Interagency, 2010; Gim et al., 2013). 우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로 기업의 신사업 및 신기술 전략 수립을 위해 활용되는 정치·경제·사회·기술 분석(PEST, Political, Economic, Sociological, Technological)에서도 이 세 요소는 중요한 분석대상이 된다(CIPD, 2020). 따라서, 동 논문에서 고려하고 있는 DACCS 기술 특성에 대한 기존의 연구에서도 기술성, 경제성, 환경성의 세 항목으로 세분화하여 정리하고자 한다. 기

술성은 도입하고자 하는 기술의 활용 시 효과·이점, 도입 가능성(수용역량 포함), 기술 도입의 장애 요인 등에 대한 검토가 포함된다. 또한 기술성이 갖추어졌다 하더라도 그 기술의 ‘경제성’과 ‘환경성 및 사회적 수용성’이 확보되어야 한다. 기술의 경제성이 확보되어야 민간 참여를 유도하여 활발한 기술 보급이 가능하며, 이 기술이 환경 및 사회에 미치는 악영향이 없어야 지속가능하기 때문이다.

3.1 기술성

DACCS의 기술 자체에 대한 특성을 다룬 선행연구는 일반 CCS 기술과의 비교연구를 통해 이루어지는 경향성이 있어 왔으며, 특히 CCS 기술과의 주요 차별점인 포집 부문에 집중하여 이루어져 온바, 본 절에서는 포집 기술에 한정하여 DAC의 기술성에 대해 살펴보고자 한다. DAC의 기술성은 크게 네 가지 측면인 i) 포집제, ii) 공정, iii) 에너지 소비, iv) 감축실적으로 구분된다. 이를 각기 살펴보면, 첫째는 DACCS의 포집제에 대한 연구이다. 일반 CCS 기술은 화석연료 사용 및 산업 시설에 접하여 운영되기에 외부의 접근이 쉽지 않은 구조, 즉 닫힌계(closed-system)로 운영된다. 이에 독성과 부식성이 있다는 단점이 있지만 포집 효율이 좋은 아민(amine) 수용액을 포집제로 사용할 수 있다.¹¹⁾ 반면, DACCS의 경우 대기와 직접 접촉하는 특성상 열린계(open system)로 운영되므로, 아민 수용액 대신 안전성을 확보할 수 있으면서 대기 중의 매우 낮은 이산화탄소 농도(0.04%)에 적합한 포집제에 대한 고려가 필요하다. 또한 배가스에는 이산화탄소 외에도 포집에 영향을 미치는 각종 불순물이 존재하나 대기 중에는 이러한 불순물이 거의 존재하지 않는다는 점도 고려해야할 사항이다. 현재 DACCS에 사용 중인 포집제로는 습식 설비의 경우 강염기 수용액이, 건식 설비의 경우 흡착제(adsorbent)가 있다(Gambhir and Tavoni, 2019).¹²⁾ 습식 설비에서 활용되는 대표적인 강염기 수용

11) 아민은 암모니아(NH₃)와 같은 질소화합물의 일종으로, 암모니아에서 하나 이상의 수소 원자가 다른 작용기로 치환된 화합물이다. 이산화탄소가 아민 수용액에 녹을 경우 이산화탄소와 아민 사이의 화학적 결합이 쉽게 일어나기 때문에 다양한 종류의 아민이 습식 포집제로 활용되고 있다. 가장 대표적인 아민 기반의 습식 포집제는 모노에탄올아민(MEA, monoethanolamine)을 물에 20~30 wt%로 희석시킨 수용액이다(Bui, 2018).

12) 강염기(strong base)란 물에 용해될 때 완전하게 이온화가 되어 수산화 이온(OH⁻)을 방출하는 물질로, 약염기(weak base)와 대비되는 개념이다. 보통 알칼리 금속(1족)이나 알칼리 토금속(2족)의 수산화물이 강염기로 분류되며, 대표적인 강염기로는 다음 8종이 있다. i) 수산화 나트륨(NaOH), ii) 수산화 포타슘(KOH), iii) 수산화 리튬(LiOH), iv) 수산화 라비듐(RbOH), v) 수산화 세슘(CsOH), vi) 수산화 칼슘(Ca(OH)₂), vii) 수산화 바륨(Ba(OH)₂), viii) 수산화 스트론튬(Sr(OH)₂). 이러한 강염기 수용액을 이산화탄소 포집에 사용한다면 이는 흡수제(adsorbent) 혹은 용해제(solvent)의 일종으로 이산화탄소를 물에 용해시켜 이온화한 후 화학적 결합으로 이산화탄소를 선별 및 흡수한다. 반면, 흡착제(adsorbent, sorbent)는 이산화탄소를 비교적 약한 물리적 결합으로 포집한다. 흡수제는 강력한 화학적 방법을 사용하기 때문에 일반적으로 매우 높은 이산화탄소 포집능을 보이지만 많은 에너지가 필요하다. 반대로 흡착제는 물리적 결합으로 비교적 적은 에너지와 간단한 공정으로 이산화탄소를 선별할 수 있지만 포집능이 다소 떨어진다.

액으로는 수산화물이 있는데, 수산화 소듐(NaOH), 수산화 포타슘(KOH)을 중심으로 실증이 이루어졌다(Gambhir and Tavoni, 2019; de Jonge et al., 2019). 이산화탄소가 물에 녹게 되면 이산화 과정을 통해 산성을 띠게 되는데, 이를 염기성 포집제와 중화반응을 시키는 것이 개략적인 포집 원리이다.¹³⁾ 건식 설비에서 활용되는 흡착제는 다공성(porous) 지지체에 이산화탄소 선별 능력이 우수한 물질을 담지(impregnation)하여 만들게 되며, 다공성 물질의 특성상 이산화탄소와 접촉할 수 있는 표면적이 넓어 효과적으로 이산화탄소를 흡착할 수 있다(Lee et al., 2014; Gambhir and Tavoni, 2019). 이때, 지지체에 이산화탄소 포집 기능을 부여하기 위해 보통 아민을 담지하는데, 습식 포집의 경우 아민이 ‘액체’ 상태의 수용액 형태이므로 아민이 누출될 시 문제가 발생하나, 건식 포집의 경우 아민이 지지체에 담지되어 안정적인 ‘고체’ 상태로 존재하기 때문에 아민이 외부로 유출될 가능성이 낮아 DACCS 용으로 활용이 가능할 수 있다.¹⁴⁾ 이러한 흡착제는 각 사용 환경에 최적화하여 만들게 되는데, 일반 CCS 기술에 활용되는 흡착제는 배가스 중 다른 불순물에 반응하지 않으면서 약 12~14% 농도의 이산화탄소 포집에 최적화된 반면, DACCS 기술에 활용되는 흡착제는 0.04% 농도의 이산화탄소 포집에 최적화되어야 한다. 대표적인 DACCS 상용업체 중 캐나다의 카본엔지니어링(사)는 강염기 습식 흡수제를, 스위스의 클라임웍스(사)와 미국의 글로벌써모스탯(사)는 건식 흡착제를 포집제로 사용한다.

둘째는 DACCS에 적합한 공정 기술에 대한 연구이다. 일반 CCS의 경우 배가스의 불순물을 여과하기 위한 설비가 필요하나, 공기 중에는 이러한 불순물이 극미량에 불과하기 때문에 DACCS에는 이러한 설비가 불필요하다. 대신 포집 과정에서 압력을 유지시켜 주기 위한 송풍 설

비가 필요하다. 또한 습식 설비의 경우, 포집제로 사용되는 강염기 수용액이 아민 수용액보다 많은 에너지를 필요로 하기 때문에 반응 에너지를 낮춰주기 위한 설비가 추가로 필요하다.¹⁵⁾ 이러한 습식 설비 공정 문제를 해결하기 위해 캐나다 카본엔지니어링(사)는 재생 과정을 다음 세 단계로 나누어 포집에 소요되는 에너지를 감소시켰다(Sanz-Pérez et al., 2016; Gambhir and Tavoni, 2019; de Jonge et al., 2019).¹⁶⁾ 1단계는 침전(precipitation)으로, 흡수탑에서 형성된 탄산화물에 수산화칼슘(Ca(OH)₂)을 첨가하여 강염기 수용액 재생 및 탄산칼슘(CaCO₃)을 형성(발열 과정)시키고, 재생된 강염기 수용액을 흡수탑으로 이동시켜 재사용한다. 2단계는 하소(calcination)로, 탄산칼슘을 순산소 연소하여(oxy-fired combustion) 산화칼슘(CaO) 및 이산화탄소로 분리(흡열 과정)한다. 3단계는 소화(slaking)로, 이는 산화칼슘에 물을 첨가하여 수산화칼슘을 형성(발열 과정)시키고, 수산화 칼슘은 침전기로 이동시켜 재사용한다. 한편, 건식 설비의 경우 공정 자체는 매우 간단한데, 크게 압력변동흡착(PSA, pressure-swing adsorption)과 온도변동흡착(TSA, temperature-swing adsorption)으로 구분된다(Bui, 2018; Gambhir and Tavoni, 2019). 압력변동흡착 방식은 압력을 높이면 흡착제에 이산화탄소가 결합되어 포집이 이루어지고, 다시 압력을 낮추면 이산화탄소가 포집제로부터 분리되는 방식이며, 온도변동흡착은 낮은 온도에서 이산화탄소가 흡착제에 결합되어 포집이 이루어지고, 온도가 높아지면 이산화탄소가 포집제로부터 분리되는 방식이다. 그러나 이 두 흡착 방식 중 반드시 하나만 취사선택해야 하는 것은 아니며, 실제로 스위스의 클라임웍스(사)와 미국의 글로벌써모스탯(사)는 이 두 방식을 혼합하여 적용하였다(Global Thermostat, n.d.; Deutz and Bardow, 2021).

13) 이산화탄소가 물에 녹아 형성된 탄산이온(CO₃²⁻)이 포집제로부터 형성된 알칼리성 이온(Na⁺, K⁺ 등)과 반응하여 탄산 소듐(Na₂CO₃)이나 탄산 포타슘(K₂CO₃)과 같은 탄산염을 이루는 것을 활용하는 포집 방법이다. 본 중화반응을 화학 반응식으로 표현하면 다음과 같다. 반응식: CO₃²⁻ + 2Na⁺ → Na₂CO₃ 혹은 CO₃²⁻ + 2K⁺ → K₂CO₃

14) DACCS 기술에서 아민 기반 포집제를 사용하면 안 되는 이유는 아민이 누출되어 대중에게 영향을 미칠 수 있다는 점이다. 일반적으로 물질이 기체-액체-고체 순으로 누출되기가 쉽다는 점을 고려할 때, 안정적인 고체 상태로 아민을 활용하는 것은 기존의 아민 기반 습식 포집제와 비교했을 때 누출 위험성이 훨씬 낮다.

15) 강염기 수용액에 이산화탄소가 용해되며 형성된 탄산염은 중화반응의 결과물로서 매우 안정적인 중성의 염(salt)이다. 화학적으로 안정적인 물질일수록 이를 다시 분리해내기 위해서는 더 많은 에너지가 투입되어야만 한다. DACCS를 비롯하여 CCS에서는 이산화탄소를 포집한 포집제로부터 다시 이산화탄소를 분리해내어 이산화탄소는 지중이나 제품에 격리하고 포집제는 재사용하는 ‘재생’ 과정을 거치게 되는데, DACCS 습식 설비에서는 안정적인 탄산염의 형태로 이산화탄소가 포집되기 때문에 이를 재생하는 데에 많은 에너지가 필요하다.

16) 본 세 단계의 과정을 화학 반응식으로 표현하면 다음과 같다(포집제는 수산화소듐(NaOH)으로 가정).

i) 침전: Na₂CO_{3(aq)} + Ca(OH)_{2(s)} → 2NaOH_(aq) + CaCO_{3(s)}, ΔH° = -5.3 kJ/mol

ii) 하소: CaCO_{3(s)} → CaO_(s) + CO_{2(g)}, ΔH° = +179.2 kJ/mol

iii) 소화: CaO_(s) + H₂O_(l) → Ca(OH)_{2(s)}, ΔH° = -64.5 kJ/mol

셋째는 DACCS 설비 구동 시 투입되어야 하는 에너지와 관련된다. 일반 CCS 기술은 포집 기술이 적용된 화석연료 및 산업 시설로부터 포집에 필요한 에너지를 공급받을 수 있으나 DACCS 기술은 독립적으로 운영되기 때문에 에너지 공급이 여의치 않다. DACCS 기술 활용 실증 결과를 살펴보면, 습식 방식의 캐나다의 카본엔지니어링(사)와 건식 방식의 스위스의 클라임웍스(사)¹⁷⁾는 1 tCO₂ 포집을 위해 소요되는 열에너지가 각각 5.25 GJ와 5.76 GJ, 전기에너지는 각각 366 kWh와 400 kWh로, 습식과 건식 간의 소요 에너지 ‘양’ 차이는 크지 않았다(McQueen et al., 2021). 대신 필요한 열에너지의 ‘품질’에 차이가 있었는데, 습식 설비는 900℃의 고온이 필요한 반면, 건식 설비는 80~120℃의 낮은 품질의 열에너지로 구동 가능하였다. 즉, 건식은 화석연료 사용 및 산업 시설의 폐열을 활용하여 에너지 공급이 가능하였으나, 습식 설비는 폐열로 충당하기 어려워 반드시 추가적인 열원을 필요로 하였다(McQueen et al., 2021). 따라서 건식 설비는 ‘저온’으로 충당하기 때문에 산업 시설에서 배출되는 폐열을 재활용할 수 있으므로, 경제적으로 열을 공급받기 위해 화석연료 사용 및 산업 시설과 인접한 입지가 유리하다. 그러나, 습식은 ‘고온’을 공급받기 위해 천연가스로 직접 가열을 해주어야 하므로 가스발전 설비와 함께 설치하고 또한 천연가스 가격이 낮은 지역에 설치하는 것을 고려해야 한다(Keith et al., 2018; Azarabadi and Lackner, 2020). 전기에너지의 공급 측면에서는 건식설비 및 습식설비 모두 재생에너지의 잉여전력을 활용하기 위해 재생에너지 발전 설비와 인접하여 위치하는 것이 유리할 수 있다(Breyer et al., 2019).

넷째는 DACCS를 통해 제거한 이산화탄소에 대해 국제탄소시장의 감축실적으로 인정받을 수 있는지에 대한 연구이다. 온실가스 배출 저감이 목적인 일반 CCS 기술 역시 대기역전, 안전성 등에 대한 우려로 인해 감축실적 산정이 도전과제로 평가되기는 하나¹⁸⁾ 감축 대상 및 범위의 명확한 설정에는 어려움이 없는 반면, 제거가 목적인 DACCS는 감축의 점원이 대기이기 때문에 조직경계를 특정하기 어려워 국가 온실가스 인벤토리 및 감축실적 산정에 대한 추가적인 연구와 이에 대한 국제적인 합의가 요

구되기 때문에 아직 구체적인 정책적 논의가 이루어지지 않았다(Park et al., 2020).

3.2 경제성

DACCS 기술의 경제성에 대한 연구는 크게 i) 포집 비용, ii) 제도적 지원, iii) 탄소 시장, 이 세 가지 측면에서 이루어진바, 이에 대해 각기 살펴보고자 한다. 첫째는 DACCS의 이산화탄소 포집 비용이다. 이산화탄소 포집 기술의 경제성을 평가하는 데에는 1 tCO₂당 포집 비용을 나타내는 이산화탄소포집원가(COC, cost of CO₂ capture)가 주로 사용된다(IPCC, 2005). 포집하는 이산화탄소량 대비 투입되는 총비용으로 계산되는데, 일반 CCS의 이산화탄소포집 원가는 규모의 경제 및 경험효과를 고려했을 때 50~100 USD/tCO₂이 달성 가능한 것으로 알려졌으며(Azarabadi and Lackner, 2020), 배가스의 이산화탄소 비율에 따라, 혹은 사용 기술에 따라 더 낮은 비용으로 이산화탄소를 포집 가능하다는 연구결과도 보고되고 있다(Bui et al., 2018). 한편, DACCS 기술의 경우, 습식 방식은 용해제 재생을 위해 하소(calcination) 과정을 거쳐야 하며, 이로 인해 거대한 가열 및 냉각 설비가 필수적이라 고정 비용이 크지만, 규모의 경제 효과가 커서 일정 규모 이상의 포집 설비를 갖춘다면 포집 비용을 상당히 낮출 수 있다(McQueen et al., 2021). 캐나다의 카본엔지니어링(사)는 실증 사업을 통해 연포집량 1 MtCO₂급으로 규모의 경제 달성 시 94~232 USD/tCO₂의 이산화탄소포집 원가로 포집이 가능함을 보였다(Keith et al., 2018). 반면, 건식 방식은 하소 과정이 없어 냉각탑이 필요하지 않아 규모의 경제 효과가 크지 않지만, 대신 모듈성이 좋아 작은 규모의 설비에도 효과적으로 대응할 수 있다(McQueen et al., 2021). 현재 스위스의 클라임웍스(사)의 DACCS 설비는 한 유닛당 연간 50 tCO₂의 설계규모를 가지며 여러 개의 유닛을 연결해 원하는 규모로 설치할 수 있다(Ibid.). 이러한 유닛 18개를 연결하여 연포집량 900 tCO₂인 설비로 실증사업을 진행한 결과, 이산화탄소포집 원가는 500~600 USD/tCO₂로 관측되었다(Gertner, 2019). 그러나 보급이 충분히 이루어질 때에는 경험효과로 인해 향후 200

17) 건식 DACCS 실증을 진행한 또 다른 업체인 미국의 글로벌써모스텍(사)는 자사의 DACCS 설비 구동에 필요한 에너지 및 비용에 대한 정보를 공개하고 있지 않다.

18) CCS 기술은 교토의정서 하의 청정개발메커니즘에서 배출 저감 활동으로 2011년 인정을 받았다. 그러나 일반 청정개발메커니즘의 사업 요건 이상의 요건들이 전제되었는데, 이는 i) 사업 주최국(host countries)의 강화된 참여(지중저장에 대한 국가 법령 제정 등), 이산화탄소 저장의 순 대기역전(net reversal)에 대한 예비 계정 마련, iii) 위험 및 안전 평가, iv) 재정 지원 요건이다(Dixon et al. 2013). 또한, CCS 기술 기반 감축사업에 대해 아직 인증받은 베이스라인 및 모니터링 방법론이 부재한 실정이다(UNFCCC, 2020).

USD/tCO₂ 정도로 포집이 가능할 것으로 기대하고 있다 (Fuss et al., 2018). 정리하자면, DACCS의 이산화탄소 포집 원가는 약 100~200 USD/tCO₂로, 일반 CCS 대비 약 두 배에 해당하는 비용이 소요되기에 이를 정당화할 수 있는 상황과 환경에 대한 검토가 요구되는 실정이다. 이러한 검토는 CDR 접근법의 다양한 옵션들에 대한 고찰과 함께 이루어져야 한다. 그 이유는, DACCS와 BECCS 중 포집 원가 자체는 DACCS가 BECCS보다 더 높지만, 소요되는 전력의 균등화발전원가(LCOE, levelized cost of electricity)까지 고려하면 DACCS가 BECCS보다 더 경제적이 될 수 있으므로, 기술 기반 CDR을 반드시 도입해야 한다면 DACCS가 BECCS보다 경제적인 선택지가 될 수 있다는 연구 결과도 있기 때문이다(Lehtveer and Emanuelsson, 2021).

둘째는 비용 문제 해결을 위한 제도적 지원에 대한 내용이다. 앞서 언급된 바와 같이, DACCS 기술은 일반 CCS에 비해 포집 원가가 두 배 정도 비싸다. 따라서, 비용은 DACCS 기술 적용 및 확산의 대표적인 장애요인이거나, 제거 기술로서 DACCS의 중요성이 강조되고 있기에 이러한 비용 측면의 장애요인을 극복할 수 있는 제도적 지원이 필요하다는 주장이 있다(Kwon and Shinn, 2018). 일반 CCS의 확산을 위해서도 제도적 지원의 필요성이 이전부터 활발히 논의되어 왔으며, 이를 위한 관련 제도로는 탄소세, 감축분에 대한 세액 공제, 배출권 거래제, CCS 의무화 정책, 배출허용기준 규제 등이 있다(Global CCS Institute, 2019). 더 높은 포집 원가를 고려했을 때 DACCS 기술의 확산을 위해서는 이러한 제도적 지원의 역할이 더욱 중요하다고 할 수 있으며, 특히 조세나 탄소 시장을 활용할 경우, DACCS가 경쟁력을 갖추기 위해서는 이산화탄소의 가격이 DACCS의 이산화탄소포집 원가 하한선에 해당하는 100 USD/tCO₂ 이상으로 상승할 필요가 있다(Breyer et al., 2019; NASEM, 2019; Azarabadi and Lackner, 2020).

셋째는 탄소시장이다. 포집된 이산화탄소를 저장 및 활용할 수 있는 시장에 대한 고민이 있어야 한다. 이는 일반 CCS에서 이미 논의되는 쟁점이나, 이산화탄소 농도가 낮은 대기에서 포집하는 경우에는 설비 규모 대비 이산화탄소의 수율(yield)이 낮아 그 활용처가 더 제한적일 수 있다. 지중저장의 경우에도 적절한 저장소를 찾아야 하는 문제가 있으며, 포집된 탄소를 산업적으로 활용하는 것 역시 높은 가격 등으로 장애요인이 존재하기에 시장을 개발하는 노력과 함께, 이를 지원하기 위해 포집된 탄소 활

용을 제도적으로 강제하는 등의 정책적 지원 역시 함께 검토되어야 한다는 주장이다(Meckling and Biber, 2021).

3.3 환경성

마지막으로, DACCS 기술의 환경성은 i) 수자원 손실과 ii) 토지 이용이라는 두 가지 측면에서 살펴볼 수 있다. 첫째, DACCS 습식 설비의 경우 수자원 손실에 대한 우려가 존재하는데, 이는 DACCS 습식 설비뿐만 아니라 일반 CCS 습식 설비에 대해서도 동일하게 제기되는 우려이다. 습식 포집 기술은 용해제의 공급 및 재생(make-up) 과정에서 많은 물이 소모된다. 포집 공정 구동 과정에서 습식 포집제의 물이 증발하기도 하며, 포집제 재생을 위하여 다량의 냉각수가 필요하기 때문이다. 이는 건식 공정에는 해당되지 않는데, 건식 흡착제를 사용하기에 수증기 누출의 위험이 없으며, 구동에 필요한 온도 역시 습식 포집보다 월등히 낮기 때문에 냉각수에 대한 우려도 없거나 제한적이다. 따라서 습식 공정의 수자원 손실로 인한 대안으로 건식 공정을 활용할 수 있으나, 일반 CCS에서는 배가스에 상당량 존재하는 황화수소(H₂S) 등과 같은 불순물이 건식 흡착제에 쉽게 흡착될 수 있어 건식 공정을 활용하는 데에 어려움이 있었다. 이에 따라 원활한 수자원 공급이 어려운 환경에서 화석연료 사용 및 산업 시설에 CCS 기술을 도입하기 위해서는 연소 후 포집 기술 대신 순산소 연소 기술이 주로 활용되었다(Global CCS Institute, 2015). 그러나 대기 중에는 건식 흡착에 장애가 되는 불순물이 미미하기 때문에, DACCS 기술의 경우 수자원 손실 측면에서만 본다면 습식 공정보다는 건식 공정이 더욱 적합하다고 볼 수 있다. 오히려 대기 중의 수증기가 이산화탄소와 함께 흡착되기 때문에 설비 구동에 필요한 물보다 더 많은 물을 부산물로 얻을 수 있다는 연구 결과도 존재한다(Fasihi et al., 2019).

둘째, 설비 구동을 위한 토지 면적(land footprint)에 관한 연구이다. DACCS는 다른 기술적 CDR 접근법인 BECCS와 비교했을 때 필요한 토지 면적이 매우 작은 편이다. 하지만 앞서 언급한 대로 DACCS 설비 구동을 위해 필요한 에너지를 공급하기 위해 재생에너지 설비 및 가스발전 설비와 병행하여 설치하는 것이 필요하다. 에너지 공급에 대한 고려 없이 DACCS 설비에 필요한 토지 면적만 계산해보면 습식의 경우 연포집량 1 tCO₂ 당 약 0.05~0.1 m², 건식의 경우 약 1.5 m²로 매우 적은 면적만 요

구되지만, DACCS 구동에 필요한 재생에너지 설비인 태양광 혹은 풍력 발전 설비와 함께 설치할 경우 면적은 매우 크게 증가할 수 있다(Realmonte et al., 2019).

3.4 연구 질문 및 분석틀

DACCS 기술 도입 시 고려해야 하는 요소들을 기술성·경제성·환경성 측면에서 살펴 보았고, 이를 정리하면 <Table 2>와 같다. 동 논문에서는 DACCS 기술 도입 시 고려해야 하는 특성으로 ‘기술성’에 초점을 맞추고, 이에 해당하는 i) 포집제, ii) 포집 공정, iii) 소요 에너지, iv) 감축실적 인정에 기반하여 현재 우리나라의 기존 R&D 연구 역량과의 호환성을 중심으로 향후 DACCS 기술의 R&D 정책 방향성에 대해서 고찰해 보고자 한다. 각각의 분석 대상에 대하여 다음과 같은 연구 질문을 던지며 분석을 수행하였다.

a) 우리나라가 현재 보유하고 있거나 연구하고 있는 기술 중 DACCS와 호환될 수 있는 기술이 있는가?

b) DACCS 기술과 호환되는 기술 존재 여부에 대한 R&D 방향성은 무엇인가?

b-1) DACCS와 호환될 수 있는 기술이 ‘있을’ 시, 동 기술을 바탕으로 DACCS에 대한 R&D를 원활하게 추진할 수 있는가?

b-2) DACCS와 호환될 수 있는 기술이 ‘없을’ 시, DACCS를 위해 해당 기술을 개발하기 용이한가?

c) DACCS 기술에 대한 R&D 추진 전략은 무엇이며, 이를 지원하기 위한 정책의 방향성은 어떻게 되는가?

분석대상과 관련하여, 동 논문에서는 DACCS 기술의 포집 부문인 DAC 기술에 초점을 두고자 한다. 그 이유는 DACCS 기술과 일반 CCS 기술의 핵심 차별점은 ‘포집’ 과정이고, 포집이 이루어진 이후에 연계되는 ‘저장’ 과정에 관련된 기술은 동일하기 때문이다. 이러한 특성으로 인해 앞서 살펴본 선행연구에서도 DACCS 기술의 기술성·경제성·환경성에 대한 분석연구 시 ‘탄소 포집’에 집중하고 있다.

Table 2. Factors that determine the deployment of DACCS technologies

Factors	Liquid solvent process	Solid sorbent process	References
Technological			
· Capture Materials	· Strong base solutions (NaOH, KOH, etc.)	· Amine-impregnated adsorbents	McQueen et al., 2021
· Capture Process	· Cyclical process around absorber and stripper	· Pressure or temperature swing process (PSA or TSA)	McQueen et al., 2021
· Required Energy	· Thermal energy of 5.25 GJ/tCO ₂ at 900°C · Electrical energy of 366 kWh/tCO ₂	· Thermal energy of 5.76 GJ/tCO ₂ at 80 ~ 120°C · Electrical energy of 400 kWh/tCO ₂	McQueen et al., 2021; Azarabadi and Lackner, 2020
· Carbon credits	· Hard to be measured due to the lack of an acceptable methodology		Park et al., 2020
Economic			
· Cost of capture	· 94 ~ 232 USD/tCO ₂ for a large facility with the effects of economies of scale	· Around 200 USD/tCO ₂ with better modularity	McQueen et al., 2021
· Policy support	· Required to justify the high cost of capture, such as carbon tax, tax credits, emission trading systems, CCS obligation and emissions performance standard		Global CCS Institute, 2019
· CO ₂ market	· Needs to be expanded to effectively store or utilize the captured carbon		Meckling and Biber, 2021
Environmental			
· Water loss	· Needs to be considered; substantial amount of water is consumed	· Not an issue; the process may even produce water from the atmosphere	Fasihi et al., 2019
· Land footprint	· 0.05 ~ 0.1 m ² /tCO ₂ /yr	· Around 1.5 m ² /tCO ₂ /yr	Realmonte et al., 2019

Source: Arranged by the authors.

4. 분석: 우리나라의 DAC 기술 준비도

우리나라는 DAC 기술을 직접적으로 다루는 R&D 사업은 현재까지 전무한 실정이나, DAC 기술과 호환될 수 있는 개별 기술에 대한 연구는 존재한다. 앞서 정의한 DACCS 기술의 기술성 요소 네 가지에 대하여, 각각의 요소에 대한 우리나라의 기술 보유 현황을 살펴보고 DAC 기술의 R&D 가능성을 분석하여 향후 정책 방향성을 살펴보았다.

4.1 포집제

DAC 기술은 포집 점원이 불순물이 거의 없는 대기라는 점, 대기와 직접 접촉하는 열린계로 포집이 이루어진다는 점으로 인해 포집제의 누출 가능성, 독성 및 부식성을 고려하여 포집제를 선정해야 한다.

먼저 ‘습식 포집’을 살펴보면, 일반 CCS 습식 포집의 가장 보편적인 포집제라고 할 수 있는 아민 흡수제를 우리나라 역시 일반 CCS에서 활발히 활용하고 있다. 우리나라에서 개발한 대표적인 습식 포집제로는 대표적으로 두 가지가 있다. 먼저 한국전력공사 전력연구원이 아민 기반의 코솔(KoSol)을 개발하였다. 코솔은 두 종류의 아민을 혼합하여 만든 습식 포집제로(J. Lee et al., 2016), 한국전력공사 전력연구원은 이를 활용해 한국중부발전 보령발전본부의 석탄화력발전 시설에 하루에 약 200 tCO₂를 포집할 수 있는 10 MW급의 설비를 설치하여 대형 실증 사업을 성공적으로 진행한 후 2021년 6월에 상용 운전을 시작하게 되었다(Kwon, 2021). 다음으로 한국에너지기술연구원은 키어솔(KIERSOL)이란 포집제를 개발하였는데, 이 역시 최근 그 성능을 인정받아 민간 기업 SK머티리얼즈(사)로 기술이전 협약을 체결하기도 하였다(Kang, 2021). 키어솔의 경우 코솔과는 달리 탄산 포타슘(K₂CO₃)을 주물질로 활용하는 습식 흡수제이나, 반응 촉진제로 여전히 아민을 활용하고 있다. 이처럼 우리나라에서 현재 보유 중인 습식 포집제들은 아민을 사용하고 있으나 아민은 휘발성과 부식성이 강하기 때문에 DAC 기술에는 적합하지 않다.

DAC 습식 포집에서는 캐나다의 카본엔지니어링(사)의 사례에서 볼 수 있듯, 아민 대신 강염기 수용액을 사용하는 것이 일반적인 방법이며(Gambhir and Tavoni, 2019), 이는 아민 수용액과는 포집 메커니즘이 다르기에 기존의 아민 기반 포집제 기술의 활용은 제한적일 수밖에 없다. 그러나 아민 대신 활용하는 강염기 수용액은 매우 기본적인 화학 물질로 쉽고 저렴하게 제조할 수 있고, 산-염기 중화반응이라는 단순한 메커니즘으로 포집한다는 점에서 기술 개발의 장애요인이 크지

않을 것으로 사료된다. 강염기 수용액은 단순한 포집 메커니즘에도 일반 CCS의 포집 기술에서 활용되지 않았는데, 이는 형성된 탄산화물이 매우 안정적이라 이로부터 이산화탄소를 분리해내어 포집제를 재생하는 데에 아민을 활용했을 때보다 더 많은 에너지가 요구되기 때문이다. 그러나 DAC 습식 포집처럼 아민을 활용할 수 없는 환경에서는 강염기 수용액이 접근하기 어렵지 않은 대안이 된다. 현재 우리나라는 DAC 기술을 따로 고려하지 않고 있는 데다가 일반 CCS 포집용으로는 아민 수용액이 효율 측면에서 훨씬 좋기 때문에 강염기 수용액을 CCS용으로 활용하는 것에 대한 연구를 하고 있지 않다. 일반 CCS의 닫힌계로서의 특성으로 사용 가능한 아민 수용액의 효율이 좋아서 이를 사용했을 뿐, 기술이 없어서 강염기 수용액을 활용하지 않았던 것이 아닌 만큼, DAC 기술용으로 강염기 수용액에 대한 연구를 진행한다면 원천기술 연구가 아니라 실증연구 중심으로 빠르게 관련 기술을 확보할 수 있을 것으로 보인다.

다음으로, ‘건식 포집’을 살펴보면 우리나라에서는 한국전력공사 전력연구원과 한국에너지기술연구원이 공동으로 탄산 포타슘(K₂CO₃)을 활용하여 KEPCO2P2라는 이름의 일반 CCS용 건식 포집제를 개발하였고, 한국남부발전 하동발전본부의 석탄화력발전 시설에 10 MW급의 건식 설비를 설치하여 대형 실증을 진행하고 있다(Jang et al., 2019). 아민을 활용한 이산화탄소 포집은 수용액 상태일 때 원활히 이루어지기 때문에 우리나라에서는 건식 기술로 아민 대신 탄산화물을 포집제로 활용하고 있으나 포집 메커니즘은 아민과 마찬가지로 화학적으로 이산화탄소를 포집하는 흡수(absorption)이다.

반면, DAC 건식 포집에서는 흡수 대신 흡착(adsorption) 기술을 활용한다. 흡착은 흡수 대비 소비되는 에너지 및 비용이 낮고 포집제 소실 및 폐수가 거의 발생하지 않아 환경영향(environmental footprint)이 적다는 장점이 있지만(Heo et al., 2018), 이산화탄소 선별율이 낮아 황화수소(H₂S)와 같은 다양한 불순물이 상당량 섞여 있는 배가스에는 적용되기 어려웠기에 일반 CCS에서는 흡착 기술을 대형 실증 및 상용화를 하기 어려웠다(Bui et al., 2018). 이러한 이유로 앞서 언급한 우리나라 일반 CCS에서 활용되는 KEPCO2P2는 건식 포집제임에도 불구하고 흡착제가 아닌 흡수제이다. 그러나 DAC 기술에서는 대기 중에 흡착제 활용의 장애가 되는 불순물이 거의 없으므로 흡착제 기술을 활용하기에 매우 적합하며, DAC 건식 포집의 대형실증 및 상용화에 성공한 두 회사인 스위스의 클라임웍스(사) 및 미국의 글로벌써모스텍(사) 모두 흡착제를 활용하고 있다(Ibid.).¹⁹⁾ 이러한 흡착제는 이산화탄소를 물리적으로 포집하는 반면, 한국남부발전 하동발전본부의 건식 포집 실증 사업에서 이산화탄소를

화학적으로 포집하기 때문에, 동 실증에서 확보한 건식 흡수제 기술을 DAC 건식 설비에 적용하기는 힘들다. 물론, 현재 우리나라에서 건식 흡착제에 대한 연구가 전무한 것은 아니다. 이산화탄소 포집을 위한 흡착제에 대한 연구는 몇몇 대학 및 연구소에서 원천기술 개발 사업으로 진행 중이나 아직까지는 대부분 실험실 규모(lab-scale)로만 진행되고 있다.²⁰⁾ 그러나, 이는 대부분 일반 CCS를 위한 흡착제 기술에 대한 연구개발이다. DAC 기술에 활용되는 흡착제는 앞서 언급한 바와 같이 0.04%의 저농도 이산화탄소를 포집하는 데에 최적화되어야 하며 불순물에 대한 우려에서 자유롭다는 특징을 가지고 있다. 따라서 이 두 개의 흡착제 기술의 특징이 서로 다른바, 우리나라에서는 DAC 건식 설비용 흡착제 연구는 전무하다고 할 수 있다.

우리나라가 DAC 기술을 고려하여 건식 설비용 흡착제 연구를 하게 된다면, 우선적으로 대기 중의 이산화탄소 포집에 적합한 흡착제를 개발하여, 통상적인 실험실 규모의 흡착제 연구와

같은 수준인 기술성숙도(TRL, technology rediness level) 5단계 까지 확보할 필요가 있으며, 이후 실증 규모를 키워 TRL 7단계의 대형 실증까지 신속히 추진할 것을 염두에 두어야 한다. 또한, 현재까지는 원천기술 개발을 목적으로 대부분의 흡착제 연구가 진행되다 보니 흡착제의 가격이나 양산 가능성을 크게 고려하지 않고 있으나, DAC 기술의 대형 실증 및 상용화를 위해서는 이에 대한 고민도 반드시 병행되어야 한다. 일례로, 스위스의 클라임웍스(사)에서 개발하여 사용하는 흡착제의 지지체는 셀룰로오스²¹⁾ 매우 저렴한 지지체인 만큼 양산이 용이하며, 이를 통해 포집 비용 절감에 기여하고 있다(Deutz and Bardow, 2021).²²⁾ 다만, 클라임웍스(사)는 그 흡착제 자체를 상품화하여 시장에 출시한 것은 아니기 때문에 시장에서 구매가 용이하지 않다. 따라서, 우리나라 역시 대기 중 저농도(0.04%)의 이산화탄소 포집에 적합하며 저렴하고 대량 양산이 가능한 흡착제를 개발하여야 한다. 이러한 내용은 다음의 <Table 3>과 같이 정리될 수 있다.

Table 3. R&D direction for adopting DACCS technologies based on the comparison of the general CCS and DACCS technologies by 'Capture Materials'

Categorization	General CCS technologies in Korea		DACCS technologies*	R&D direction for adopting DACCS
Liquid solvent				
· Materials	· KoSol (amine-based)	· KIERSOL (K ₂ CO ₃ -based, amine-catalyzed)	· Strong base solutions	· Field-based empirical research needs to be pursued since the capture materials are easily accessible.
· Developer	· KETEP Research Institute	· Korea Institute of Energy Research	· Carbon Engineering (Canada)	
· User	· Boryeong P.G. Site Division of KOMIPO	· SK Materials	· same as above	
Solid sorbent				
· Materials	· KEPCO2P2 (chemical absorption)		· Solid adsorbent (physical adsorption)	· Current lab-scale adsorbent research needs to be expanded and to consider mass-producibility.
· Developer	· KETEP Research Institute with KIER		· Climeworks (Switzerland) · Global Thermostat (USA)	
· User	· Hadong Thermal Power Site Division of KOSPO		· same as above	

Source: Arranged by authors.

* The contents of this column are based on the literature review in Chapter 3.

- 19) 통상 흡착제는 포집하려는 이산화탄소와 접촉면이 많을수록 포집이 효과적으로 이루어지기 때문에 다공성(porous) 지지체(supporter)에 이산화탄소를 선별할 수 있도록 기능화(functionalization)하여 만들게 된다. 스위스의 클라임웍스(사)는 셀룰로오스(cellulose) 지지체를 기능화하여 흡착제로 활용하고 있으며, 미국의 글로벌써모스탯(사)는 세라믹 모노리스(monolith) 지지체를 기능화하여 흡착제로 활용하고 있다.
- 20) 동 논문은 CCS 기술에서 활용되는 흡착제를 논하기에 이산화탄소 선별을 위한 흡착제만 언급하였으나, 본래 흡착제 기술은 이산화탄소뿐만 아니라 다양한 종류의 오염물질을 선별 제거하는 데에도 활용될 수 있는 기술이다. 이는 유기화학 분야의 주요 연구주제 주제 중 하나로 다양한 연구소에서 관련 연구를 진행 중이다. 다만, 우리나라에서 흡착제를 DACCS 기술에 최적화하는 연구가 현재로서는 충분히 이루어지지 않고 있을 뿐이다.
- 21) 셀룰로오스는 흡착제 이름이 아니라 흡착제의 지지체이다. 셀룰로오스는 지구상에 존재하는 가장 흔한 유기화합물 중 하나로, 식물에서 쉽게 추출가능하며, 화학물질을 취급하는 판매사를 통해 구매하는 것 역시 수월하게 가능하다
- 22) 흡착제는 지지체와 그 지지체에 담지된 기능성 물질로 구성된다. 여기서, 지지체 자체가 중요한 것이 아니라 이 지지체에 원하는 기능이 있는 물질을 담지(impregnation)하는 것이 기술력으로 중요하다.

4.2 포집 공정

DAC 기술에서 사용하는 포집제가 일반 CCS 기술에서 사용하는 것과 다르기에, 포집제를 이용하는 공정 방법에서도 차이를 보인다. 우리나라 일반 CCS 기술의 ‘습식 설비’는 ‘흡수탑’과 ‘재생탑’을 중심으로 이루어져 있다(J. Lee et al., 2016). ‘흡수탑’에서 배가스의 이산화탄소를 화학적으로 포집하는 발열 과정이 일어나며, ‘재생탑’에서 탄소와 결합된 포집제에서 다시 이산화탄소를 분리하고 포집제를 본래의 상태로 되돌리는 흡열 과정이 일어난다.²³⁾ 이처럼 포집제는 흡수탑과 재생탑 사이를 순환하고, 이 과정에서 일부 증발하거나 불순물과의 결합으로 버려지는 경우에는 포집제를 보충해주게 된다. 이러한 우리나라의 습식 포집 설비는, 한국전력 전력연구원에서 포집제를 개발하고, 한국전력기술, 포스코건설, 한국중부발전, 대림산업이 습식 공정의 개발과 운영을 담당하고 있다(Yoo, 2010).

DAC 기술의 습식 설비 역시 ‘흡수탑’과 ‘재생탑’을 중심으로 구성된다(Gambhir and Tavoni, 2019). 포집제로 아민 수용액 대신 강염기 수용액이 사용되지만 본질적으로 흡수탑에서 발열 과정을 통해 이산화탄소가 포집되고, 재생탑에서 이산화탄소가 분리되면서 포집제가 재생된다는 점은 동일하다. 다만 강염기 물질은 아민보다 반응열이 훨씬 높아 재생 과정에 매우 많은 에너지가 공급되어야만 하기에 캐나다 카본엔지니어링(사)의 사례와 마찬가지로 반응 에너지를 낮추기 위한 추가적인 공정이 필요하다. 따라서 이러한 추가적인 공정을 고려할 때, 공정 설계가 매우 중요한 과제가 된다. 다만 각각의 공정 과정은 잘 알려진 방법들이며, 각 단계의 산출물을 다음 단계로 이동시키는 ‘유동 제어(flow control)’는 앞서 언급한 여러 기관들이 우리나라 일반 CCS 습식 공정의 개발 및 운영에 참여하며 확보한 경험을 충분히 활용할 수 있는 만큼 대형 실증 중

심의 연구를 통해 관련 기술을 충분히 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

다음으로 건식 방식에 대하여 살펴보면, 우리나라는 일반 CCS 기술의 건식 공정 대형 실증 설비가 한국남부발전 하동발전본부에 2014년에 준공되어 운영 중에 있다. 동 기술은 한국전력 전력연구원이 포집제를, 한국에너지기술연구원이 공정을 개발하였으며, 한국남부발전이 건설 및 운영을 담당하고 있다(Yoo, 2010). 그러나 동 건식 설비는 앞서 언급된 바와 같이 흡착제가 아닌 고체형 흡수제를 사용하고 있기에 포집 공정은 습식 설비와 동일하게 포집제가 흡수탑과 재생탑을 순환하는 방식으로 이루어진다(Lee, 2014). 우리나라 일반 CCS의 습식 및 건식 공정 사이의 차이점은 순환하는 포집제가 액체에서 가루 형태의 고체로 바뀌었을 뿐, 유의미한 차이가 없다고 할 수 있다.

DAC 기술의 건식 설비는 흡착제를 활용하기 때문에 흡수탑과 재생탑으로 이루어지는 복잡한 설비 없이 압력이나 온도를 변화시키는 것만으로도 포집과 재생이 이루어진다. 이를 위해 압력을 변화시키는 압력변동흡착, 온도를 변화시키는 온도변동흡착 등의 공정이 필요한데, 우리나라는 이를 산업현장의 오염물질 제거 목적으로는 활용해본 적이 있으나 이산화탄소 포집을 위해서는 대형 실증을 수행해본 경험이 부족한 실정이다. 따라서, DAC 건식 설비를 고려하게 된다면, 건식 설비 포집제(흡착제) 개발을 위한 연구와 동시에 다른 산업 분야에서 확보한 흡착 공정 기술을 바탕으로 DAC 기술에 적합한 흡착 공정 방법에 대한 연구가 함께 이루어져야 한다. 그러나 건식 공정은 압력이나 온도의 변동으로 손쉽게 이산화탄소를 포집할 수 있어 기계적 구조가 비교적 단순한데, 이러한 특성은 관련 기술을 신규로 확보해야 하는 우리나라의 입장에서 긍정적인 부분이다. 지금까지 논의한 내용은 다음의 <Table 4>와 같이 정리될 수 있다.

23) ‘발열 과정’은 화학적 반응이 일어날 때 열이 발생하는 과정으로, 열에너지가 외부로 방출되는 과정이기에 에너지 투입이 없더라도 반응이 일어날 수 있다. 반대로 ‘흡열 과정’은 반응이 일어날 때 열을 흡수하는 과정으로, 외부에서 열에너지가 공급되어야만 반응이 일어날 수 있다. 일반 CCS 및 DACCS 기술에 소요되는 에너지 중 포집제의 유동을 제어하는 등의 과정에 필요한 일부분을 제외하면 대부분 이 ‘흡열 과정’을 위해 필요한 에너지이다. 이때, 흡수탑의 발열 과정에서 방출된 열에너지를 재생탑의 흡열 과정에 사용할 수 있으나 전달 과정에서 열에너지가 손실될 수 있기에 재생탑은 항상 가열설비와 함께 구성된다. 흡수탑에서 방출된 열을 얼마나 효과적으로 재생과정에서 다시 사용하느냐도 포집 공정 분야에서 중요한 연구 주제 중 하나이다.

Table 4. R&D direction for adopting DACCS technologies based on the comparison of the general CCS and DACCS technologies by 'Capture Process'

Categorization	General CCS technologies in Korea	DACCS technologies*	R&D direction for adopting DACCS
Liquid solvent			
· Methods	· Cyclical process around an absorber and a stripper	· Cyclical process around an absorber and a stripper with additional process to lower the reaction energy	· Large-scale field tests are required to achieve technology readiness.
· Developer	· KEPCO E&C, POSCO E&C, KOMIPO, DL E&C	· Carbon Engineering (Canada)	
Solid sorbent			
· Methods	· Cyclical process around an absorber and a stripper	· Pressure or temperature swing process (PSA or TSA)	· An appropriate process needs to be designed based on experiences with adsorbents in other industrial areas.
· Developer	· Korea Institute of Energy Research	· Climeworks (Switzerland) · Global Thermostat (USA)	

Source: Arranged by authors.

* The contents of this column are based on the literature review in Chapter 3.

4.3 소요 에너지

일반 CCS의 포집 부문 및 DAC 설비를 운영하기 위해서는 전기에너지와 열에너지가 모두 필요하다.²⁴⁾ 설비의 구동 및 제어를 위해 전기에너지가 공급되어야 하며, 이산화탄소를 흡수 혹은 흡착한 포집제의 재생 과정이 흡열 과정이기 때문에 열에너지가 공급되어야 하기 때문이다. 배가스로부터 이산화탄소를 포집하는 일반 CCS 설비의 경우, 배가스가 발생하는 화석연료 사용 및 산업 시설로부터 CCS 설비 구동에 필요한 전기에너지 및 열에너지를 공급받아 운영할 수 있으므로, 일반 CCS 기술 도입에 있어 소요되는 에너지를 확보하는 것은 주요 고려사항이 아니었다. 고려하더라도 일반 CCS 설비 구동에 필요한 에너지량을 정량적으로 분석하기보다는, CCS 기술이 적용된 화석연료 사용 및 산업 시설의 효율이 CCS 설비 구동으로 말미암아 감소되는 정도, 혹은 CCS 설비 장착 전후를 비교해 화석연료 사용 및 산업 시설의 구동 에너지 증가율을 분석하였다(IPCC, 2005, Ch.8). 반면, 일반 CCS 포집 설비와 달리 DAC 설비는 기존 시설에 부착하여 운영되는 것이 아니라 독립적으로 운영되므로 소요되는 에너지의 절대량을 분석하는 것이 매우 중요하다.

‘습식 포집’의 경우를 살펴보면, 우리나라의 한국중부발

전 보령화력본부에 설치된 습식 방식의 일반 CCS의 경우, 전체 소요 에너지를 공개하고 있지는 않으나 이산화탄소 재생 과정에 소요되는 열에너지는 2.8 GJ/tCO₂이며, CCS 설비 구동으로 인해 같은 양의 발전을 하기 위한 발전단가는 약 43% 상승할 것으로 분석되었다(J.H. Lee et al., 2016). 이러한 발전단가 상승은 외국 사례와 비교할 때 약 30% 낮은 수준으로, 포집제의 우수한 성능과 낮은 설비 공사 비용으로 인한 결과이다(Ibid.). 반면, 캐나다 카본엔지니어링(사)의 DAC 습식 설비에서 필요한 열에너지는 5.25 GJ/tCO₂이므로 우리나라의 습식 방식의 일반 CCS 기술 대비 약 두 배의 열에너지가 필요함을 알 수 있다. 이처럼 소요 에너지가 많은 것은 DAC 기술 보급의 주요 장애 요인 중 하나로, 소요되는 에너지를 낮추는 것이 포집 효율 향상에 있어 중요하다(McQueen et al., 2021). 우리나라는 일반 CCS의 포집 기술에 있어 현재 수준으로도 외국 사례보다 높은 효율을 보이고 있으며, 포집제 및 공정 최적화를 통해 소요 에너지를 추가적으로 절감하여 포집 효율을 높이기 위한 기술 연구가 계속해서 이루어지고 있다(J.H. Lee et al., 2016). 따라서 우리나라에서 DAC 습식 설비를 도입한다면 이러한 연구 경험을 바탕으로 소요 에너지 절감을 고려하여 공정설계 연구를 추진할 필요가 있다.

DAC 습식 설비의 에너지 효율에는 설비의 입지성도 많

24) 전기에너지는 포집 과정에 필요한 에너지라기보다는 설비를 제어하기 위한 컴퓨터 등, 설비 안의 각종 기구나 조명 등을 전기로 구동하기 때문에 필요한 에너지이다. 공개된 자료에서 우리나라의 일반 CCS 설비에 소요되는 전기에너지를 밝히고 있지는 않아 DACCS 설비의 소요 전기에너지와 비교하는 것이 쉽지 않으므로, 동 절에서는 열에너지를 중심으로 접근하고자 한다.

은 영향을 미친다. DAC 습식 설비의 경우 900℃의 고온의 열에너지가 필요하기에 이러한 고온의 열을 공급할 수 있도록 가열 설비가 함께 운영되어야 한다. 이때, 단순한 가열 설비가 아니라 가스화력발전 설비를 활용한다면 DAC 설비에 고온의 열을 공급할 수 있을 뿐만 아니라 전기에너지도 생산할 수 있다. 따라서 DAC 습식 설비는 가스발전 설비와 함께 운영하는 것이 효과적이다(McQueen et al., 2021). 열 공급 측면 외에도 가스발전 설비와 인접한 입지가 주는 이점을 가스발전 설비에서 발생하는 배가스의 특성에서도 찾아볼 수 있다. 석탄화력발전소 배가스의 이산화탄소 농도는 약 12~14%로, 우리나라의 일반 CCS의 포집 기술 역시 이 농도의 이산화탄소 포집에 최적화되어 있다. 그러나 이러한 석탄화력발전은 탄소중립 정책에 따라 그 비중이 점차 감소될 것으로 보인다. 반면, 점차 비중이 확대될 것으로 예측되는 LNG 가스발전의 경우 배가스의 이산화탄소 농도가 3~10%로, 석탄화력발전에 비해 배가스의 이산화탄소 농도가 매우 낮다(Wang and Song, 2020). 따라서, 우리나라에서 상용화된, 혹은 대형 실증 과정에 있는 일반 CCS 기술을 가스발전에 적용하는 것은 기술 및 경제적 측면에서 효율적이지 않으며, 전 세계적으로도 가스발전의 경우 포집 효율이 낮기 때문에 일반 CCS 기술을 적용하지 않는 것이 일반적이다(Azarabadi and Lackner, 2020). 즉, 가스발전은 포집 효율이 떨어지고 비용이 많이 들어 가스발전에는 일반 CCS를 잘 활용하지 않는다. 그러나 가스발전 역시 온실가스를 배출하는 설비이며, 배출되는 이산화탄소를 저감해야 할 필요성이 존재한다. 이에 따라 가스발전 운영사에서는 효율이 떨어지는 일반 CCS의 포집 설비 대신, DAC 설비를 활용하여 가스발전 설비에서 배출하는 이산화탄소를 상쇄하는 방안을 고려할 수 있으며, 일반 CCS의 포집 기술 대신 DAC 기술을 적용하는 것이 더 효과적이라는 연구 결과도 존재한다(Ibid.). 실제로도 미국의 글로벌써모스탯(사)는 석유·가스 업체인 엑손모빌(사)(ExxonMobil)와 이에 대한 협력 연구를 진행하고 있다(Global Thermostat, 2020).²⁵⁾ 물론, 글로벌써모스탯(사)는 건식 방식의 DAC 설비를 활용하고 있으나, 습식 설비가 열 공급을 위해 가스 연소가 필요한 점을 고려한다면, 우리나라에서 DAC 습식 설비를 활용할

경우 가스발전 설비 주변에 입지하는 것이 유리하다.

다음으로 ‘건식 설비’를 살펴보면, 먼저 ‘에너지’ 측면에서 보면, 한국남부발전 하동발전본부의 건식 방식의 일반 CCS는 재생 과정에 3.25 GJ/tCO₂의 열에너지가 필요한 것으로 분석되었다(Yi, 2015). 이는 우리나라 습식 방식의 일반 CCS보다 조금 높은 값이지만, 건식이라는 특성상 화학 반응 자체는 습식보다 용이하게 일이기 때문에 더 빠른 포집이 가능하다(Yoo, 2010). DAC 건식 포집 역시 습식 방식보다 더 빠른 반응 속도가 장점이므로 기술 도입시 이러한 특성을 고려할 필요가 있다. 스위스 클라임웍스(사)의 사례에서는 DAC 건식 설비 구동을 위해 5.76 GJ/tCO₂의 열에너지가 필요하였으며(McQueen et al., 2021), 앞서 언급한 습식 설비와 마찬가지로 건식 설비에서도 소요되는 열에너지를 감소시키는 것은 매우 중요한 연구 과제가 된다.

에너지 효율 측면에서 DAC 건식 설비의 ‘입지성’ 역시 중요한 고려사항이다. 건식 설비의 경우 필요한 열에너지의 온도는 80~120℃ 정도로, 이는 화석연료 사용 및 산업 시설에서 사용 후 버려지는 폐열로도 충분히 공급 가능한 온도이다. 따라서 폐열을 공급받아 재활용할 수 있도록 화석연료 사용 및 산업 시설 인근에 입지하는 것이 효과적이다. 이 경우에는 DAC 건식 설비가 설치된 인근의 화석연료 사용 및 산업 시설의 감축 노력에도 불구하고 배출되는 이산화탄소를 다시 포집할 수 있다는 점에서도 이러한 입지는 효과적이다.

추가적으로, 앞서 언급한 바와 같이 일반 CCS 설비와는 달리 DAC 설비는 운영에 필요한 전기에너지의 공급 방안 역시 고려해야 한다. 가스발전 설비와 함께 운영되는 습식 설비의 경우, 함께 운영되는 가스발전 설비로부터 직접 전기에너지를 공급받을 수 있지만, 그 외의 경우에는 친환경적으로 생산된 전기에너지를 공급받을 수 있도록 재생에너지 시설(태양광 등) 주변에 입지하도록 DAC 기술 활용 전략을 수립하는 것이 필요하다. 재생에너지의 중요성이 강조되며 최근 우리나라에도 재생에너지 대규모 집적 발전단지가 조성·운영되고 있으므로 이미 활용된 설비 인근에 DAC 설비를 도입하는 것 역시 고려할 필요가 있다.²⁶⁾ 이 경우에는 재생에너지 발전 설비의 잉여 전력을 활용하는 ‘Power-to-X’ 전략으로 DAC 기술을 활용하는 것 역시 가능하다(Breyer et al., 2019). 지금까지 논의한 내용 다음의 <Table 5>와 같이 정리될 수 있다.

25) 이러한 DACCS 기술의 활용은 대기 중에 존재하는 이미 배출된 이산화탄소를 포집한다는 측면에서 감축유형 상으로 ‘제거’가 맞으나, 그 활용 목적을 고려했을 때에는 ‘배출 저감’과 유사하다고 할 수 있다.

26) 우리나라의 대규모 태양광 발전소로는 전라남도 해남에 98 MW급의 ‘솔라시도 태양광 발전소’, 영광에 100 MW 급의 태양광 발전소가 현재 완공되어 운영 중에 있으며(Kwon, 2020a; Kwon, 2020b), 전라북도 새만금에 육상 및 해상 태양광 발전을 합쳐 2.8 GW급의 대규모 설비를 조성하는 사업을 추진 중에 있다(SDIA, 2021). 국내 대규모 풍력 발전소로는 강원도 평창의 발전단지가 98 MW급으로 가장 크며, 경상북도 영덕의 영양 발전소가 61.5 MW급으로 그 뒤를 잇고 있다(KNREC, 2021).

Table 5. R&D direction for adopting DACCS technologies based on the comparison of the general CCS and DACCS technologies by 'Required Energy'

Category	General CCS technologies in Korea	DACCS technologies*	R&D direction for adopting DACCS
Liquid solvent			
· Thermal energy required	· 2.8 GJ/tCO ₂	· 5.25 GJ/tCO ₂ (at high temp. of 900°C)	· Optimization of capture materials and processes to lower required energy should be studied. · DACCS facilities can be diffused with gas-fired power plants.
· Energy-efficient location	· With fossil fuel combustion and industrial process facilities	· Near gas-fired power plants	
Solid sorbent			
· Thermal energy required	· 3.25 GJ/tCO ₂	· 5.76 GJ/tCO ₂ (at low temp. of 80 ~ 120°C)	· Optimization of capture materials and processes to lower required energy should be studied. · DACCS facilities need to be deployed near fossil fuel and industrial facilities.
· Energy-efficient location	· With fossil fuel combustion and industrial process facilities	· Near fossil fuel combustion and industrial process facilities and renewable energy power stations	

Source: Arranged by authors.

* The contents of this column are based on the literature review in Chapter 3.

4.4 감축실적 인정

우리나라는 2010년 ‘국가 CCS 종합 추진 계획’을 발표하며 본격적으로 국가 차원에서 일반 CCS 기술의 대형 실증을 추진하게 되었다. 그 일환으로 우리나라 근처 해역에서 지중저장 후보지를 조사하였으며, 포항분지 및 서해분지의 심부 대염수층과 고갈 시점이 다가오는 동해가스전이 이산화탄소 저장 잠재력이 높은 것으로 평가되었다(Kwon and Shinn, 2018). 그러나 2017년 포항 지진과 근처 해역에서 운영하던 지열발전소와의 연관성이 드러나면서, 이후 지열발전과 그 외 CCS 등의 기술 전반에 대한 사회적 수용성이 급격히 하락하고 안전 기준이 높아지며 이산화탄소의 지중저장에 대한 실증실험 역시 전면 중단하게 되었다. 최근 들어서는 한때 중단되었던 CCS의 저장 기술에 대한 연구가 재개되고 있으며 특히 2022년 고갈될 것으로 예측되는 동해가스전을 2025년부터 이산화탄소 저장소로 활용하고자 하는 실증 사업이 추진되고 있다(KNOC, 2021). 그러나 대기 중 온실가스 농도 안정화에 대한 필요성이 시급해짐에 따라 이산화탄소의 지중

저장 외에도 포집한 이산화탄소를 활용하여야 할 필요성 역시 강조되고 있으며, 이에 따라 우리나라는 포집한 이산화탄소를 활용하여 제품 안으로 격리시키는 탄소포집·활용(CCU, carbon capture and storage) 기술 역시 적극적으로 활용하려는 현 상황에 이르게 되었다(Interagency, 2021).

탄소시장 거래접근법의 일환으로 우리나라에서 실시하고 있는 탄소배출권거래제(Emission Trading System) 하에서 배출 점원에서 CCS 기술을 적용해서 감축이 발생할 시 이에 대한 감축노력이 인정된다. 그러나, CCU 기술에 대해서는 탄소배출권거래제에서 인정받고 있지 않은 상태이다(Interagency, 2021, p.36).²⁷⁾ 한편, 탄소시장의 상쇄 접근법의 일환으로 교토의정서 하의 청정개발메커니즘 하에서 CCS 기술을 적용한 사업은 배출 점원에서의 감축 활동으로 인정받고 있다(Dixon et al., 2013). 그러나, 역시 CCU 기술을 적용한 사업에 대해서는 청정개발메커니즘 하에서 감축사업으로 인정받지 못하고 있다. 이러한 탄소 시장이라는 시장 인센티브의 부재는 CCU 기술의 연구·개

27) 이러한 CCU 기반의 감축 활동은 제품의 형태로 저장된 이산화탄소의 영속성 문제가 제기되며 파리협정 제6조 하에서의 감축실적으로 인정받지 못하고 있다(Park et al., 2020). 이러한 상황으로 인해 CCU 기반의 감축 활동은 국가결정기여(NDC, Nationally Determined Contributions) 달성을 위한 국내 감축 활동으로는 일정 부분 기여를 할 수 있으나, 본 감축실적을 시장 메커니즘을 통한 국제적으로 이전 가능한 감축 결과물(ITMO, Internationally Transferred Mitigation Outcomes)로 인정받기는 어려워 관련 기술을 통한 국제협력에 제약이 따를 수밖에 없다. 이를 타개하기 위해 우리나라는 CCU 기반의 감축량 산정 및 모니터링 방법론을 마련하고 국제 협력을 통해 감축실적 산정 표준을 확립하고자 노력하고 있다(Interagency, 2021).

발·실증 뿐만 아니라 적용 및 확산에도 부정적 영향을 줄 수 있다.

한편, CDR 접근법의 경우 ‘조림·재조림 접근법’은 교토의정서 하의 청정개발메커니즘 하에서 조림·재조림 청정개발메커니즘(AR CDM)으로 진행되고 있는바, 동 접근법을 적용한 상당한 사업들이 진행되어 왔다(UNFCCC, 2003; UNEP-DTU Partnership, 2020). 이와는 대조적으로 DACCS 기술을 적용한 이산화탄소 제거 사업에 대해서 탄소배출권으로 인정하는 제도는 현재 전 세계적으로 부재하고 있다. 그러나, 최근 국제사회에서 CDR 접근법의 확산을 위한 유인책으로 국제탄소시장 및 다양한 재정적 인센티브 등에 대한 사항이 연구 및 고안되고 있다(Honegger and Reiner, 2018). 미국에서는 CCUS 기술의 보급 확대를 위해 포집하여 저장하거나 활용한 이산화탄소의 양을 기반으로 세금 혜택을 주는 45Q 세액공제(tax credit) 제도를 도입하여 운영 중인데, 2018년 이 제도의 적용 대상을 확대하며 DACCS 기술을 포함시켰다(GPI, 2019; Capanna et al., 2021).²⁸⁾ 또한 미국 캘리포니아주에서는 시장 기반으로 감축실적을 거래할 수 있는 저탄소연료표준(LCFS, Low Carbon Fuel Standard) 제도를 운영하고 있는데, DACCS 기술의 포집 실적을 동 제도 하에서 거래가 가능하도록 하였다(CARB, 2019). 캘리포니아주에서 DACCS 실증 사업을 진행 중인 캐나다의 카본엔지니어링(사)은 이러한 제도를 ‘효과적인 시장 기반 제도’라고 평가하며 이들을 활용할 수 있도록 자사의 실증 설비를 설계하였다(Carbon Engineering, 2019).

따라서, 향후 DACCS 기술을 적용한 이산화탄소 제거 사업에 대해 국제탄소시장 메커니즘 등에서 이를 인정할 수도 있는 가능성이 보여지고 있다. 따라서 이러한 국제탄소시장 및 선진국들의 재정적 지원 방식 등에 대한 현황을 주시할 필요가 있다. 이에 우리나라는 DACCS 기술을 우리나라에 적용할 뿐만 아니라 국제협력 방안으로 지중저장소가 존재하는 국가에서 DACCS 설비 운영, 포집한 이산화탄소를 활용하여 제품을 생산할 수 있는 국내 기업의 해외 공장 부지에서 DACCS 설비 운영 등 다양한 형태를 모색할 필요가 있다.

4.5 소결

제4장에서는 우리나라가 DACCS 기술을 도입하고자

한다면, 현재 우리나라가 보유하고 있는 일반 CCS 기술에 대한 지식과 경험과 호환성이 있는지 그리고 얼마나 다른지에 대해서 살펴보고 향후 R&D 연구 방향성을 모색해 보았다. 분석 결과를 정리하자면, 우리나라에서 현재 적용되고 있는 일반 CCS 기술은 DACCS 기술과 기술적으로 호환되는 부분도 일부 있다. 그러나, DACCS 기술이 이산화탄소 농도가 매우 낮은 대기로부터 이산화탄소를 선별·포집한다는 점과 열린계로 포집이 이루어진다는 점에서 활용되는 기술이 다른바, 신규로 개발하거나 대형 실증이 필요한 부분 역시 많음을 알 수 있었다.

이를 보다 구체적으로 살펴보면, 첫째, ‘포집제’ 측면에서, 습식 포집의 경우, 일반 CCS 기술과는 달리 강염기 수용액을 활용하기는 하지만 이는 구하기 쉽고 반응 메커니즘이 이미 잘 알려져 있기에 신규 포집제 접근에 대한 장애 요인이 크지 않다. 따라서 재료에 대한 원천적인 연구보다도 신속히 대규모 실증 중심으로 R&D를 진행할 수 있을 것으로 기대가 된다. 반면 건식 포집의 경우, 대기 중의 이산화탄소 포집에 적합한 흡착제에 대한 재료 연구가 반드시 선행되어야 한다는 점에서 도전적인 목표가 될 수 있다. 다만 지금까지 우리나라에서 흡착제에 대하여 실험실 규모로 원천기술 연구가 꾸준히 이루어지고 있었기에 관련 지식과 경험을 바탕으로 건식 포집제에 대한 연구를 규모화하여 추진할 필요가 있다.

둘째, ‘포집 공정’ 측면으로는, DACCS 기술의 습식 포집 공정은 일반 CCS 기술의 습식 공정과 유사하게 흡수탑과 재생탑 사이를 포집제가 순환하는 방식으로 이루어 지기에 일반 CCS 기술을 통해 확보한 지식 및 경험을 활용할 수 있다는 장점이 있다. 다만, 포집제 재생 과정에서 에너지를 낮춰주기 위해 침전-하소-소화의 과정이 단계적으로 진행되어야 한다는 점에서 추가적인 연구가 필요할 수 있으나, 각 단계에서 필요로 하는 기술이 이미 잘 알려진 방법들이기에 실증 연구를 통해 관련 기술 확보가 용이할 것으로 사료된다. 반면, DACCS 기술의 건식 포집 공정은 구조적으로 단순하긴 하나 현재 우리나라는 관련 공정으로 이산화탄소 포집에 대한 실증 경험이 부족한 실정이다. 만약 건식 포집에 기반한 DACCS 기술을 적용하고자 한다면, 건식 흡착제 연구와 더불어 공정 개발 역시 함께 추진되어야 하기에 습식 포집 대비 R&D에 대한 부담은 더 크다고 할 수 있다.

셋째, ‘소요 에너지’ 측면으로는, DACCS 기술은 일반

28) 이에 따라 일반 CCS와 마찬가지로 DACCS 기술로 포집한 이산화탄소를 지중저장할 시 50 USD/tCO₂, 원유회수증진(EOR, enhanced oil recovery) 혹은 제품으로의 활용(CCU)할 시에는 35 USD/tCO₂의 세금 감면 혜택을 받을 수 있게 되었다(Great Plains Institute, 2019).

CCS 기술보다 약 두 배의 에너지가 필요하므로 DACCS 기술의 원활한 활용 및 보급을 위해서는 이러한 에너지를 효과적으로 공급할 수 있어야 한다. 이를 위하여 DACCS 습식 설비의 경우 고온의 열에너지를 원활히 공급하기 위해 가스발전 설비와 함께 운영하는 것을 고려하여야 하며, 이 경우 일반 CCS 기술로 포집하는 것이 비효율적이었던 가스발전 배가스의 이산화탄소를 DACCS 기술을 활용하여 상쇄할 수 있으므로 사실상의 배출 저감 방안으로서의 DACCS 기술 활용도 가능하다. 건식 설비의 경우 저온의 열에너지로도 운영이 가능하므로 폐열을 용이하게 공급받을 수 있도록 화석연료 사용 및 산업 시설과 함께 운영하는 것이 유리하다. 또한 DACCS 설비 운영에 필요한 전기에너지의 친환경적 공급을 위하여 대규모 재생에너지 발전단지와 인접한 입지 역시 고려할 필요가 있다.

마지막으로, ‘감축실적 인정’ 측면으로는, 현재 해외에서 DACCS 기술의 활용을 촉진하기 위한 다양한 정책들이 활용되고 있는바, 이에 대한 정책적 접근 연구가 필요할 수 있다. 또한, 우리나라에서 추진 중인 CCU 기반의 감축실적 산정 방법론에 대한 연구 및 국제협력과 더불어 DACCS 기술을 통한 감축실적 산정 방안을 명확하게 정립할 필요가 있다. 이를 바탕으로 DACCS 기술을 활용한 국제협력 방안을 도출하고 선제적으로 대응하여야 한다.

5. 결론

본 연구에서는 대표적인 기술 기반 CDR 접근법인 DACCS 기술이 국제사회에서 강조되기 시작한 배경과 동 기술의 기술성, 경제성 및 사회환경성에 대해 살펴보았다. 이를 토대로 ‘기술성’ 측면에서, 우리나라에서 현재 활용하고 있는 일반 CCS의 포집 기술에 기반한 기술역량이 DAC 기술 활용에 필요한 기술역량과 호환성이 있는지를 분석하였고 이를 바탕으로 DACCS 기술 도입을 위한 R&D 방향성을 고찰해 보았다.

본 연구 결과를 바탕으로 i) 탄소중립 및 에너지 전환 측면, ii) DAC 설비 보급 및 활용 측면, iii) DACCS 기술의 감축실적 산정 측면에서 다음과 같은 시사점을 도출할 수 있다. 첫째, 탄소중립 및 에너지 전환 측면에서, 국제사회뿐만 아니라 우리나라 역시 탄소중립 목표 달성을 위해 DACCS 기술의 중요성을 강조하고 있음에도 아직 우리나라에는 직접적으로 DACCS 기술을 다루는 R&D 활동이 전무한 실정이었다. DACCS 기술의 필요성을 우리나라 역시 인정하는바, 관련 기술을 개발하고 도입 및 활용하

기 위한 전략을 신속히 수립하고, DACCS 설비의 효과적인 입지 및 에너지 공급 방안 등을 탐색할 필요가 있다.

둘째, DACCS 설비 보급 및 활용 측면에서, 우리나라가 DACCS 기술을 빠르게 보급하고자 할 시, 포집계 개발의 부담감이 적고 대형 실증을 진행하기 수월한 습식 설비를 우선적으로 고려할 필요가 있다. 특히 당분간 LNG 가스발전의 역할이 에너지 공급 부문에서 중요할 것으로 예상되는바, DACCS 습식 설비를 가스발전 설비와 함께 보급하는 방안을 검토해야 한다. 이와 더불어 에너지 효율이 좋은 DACCS 건식 기술에 대한 연구를 병행해서 할 필요가 있으며, 특히 유기화학 분야에서 연구되어 오던 흡착제 연구 성과를 바탕으로 저렴하면서 성능이 좋은 건식 포집용 흡착제 개발에 집중하고 관련 실증 규모를 키워나갈 필요가 있다. 이러한 DACCS 기술은 화석연료 사용 및 산업 분야의 감축 노력에도 불구하고 배출되는 잔여 탄소 배출량을 상쇄하는 효과도 있으므로 정부뿐만 아니라 민간 업체인 발전 업계 및 산업계 역시 동 기술에 관심을 가지고 투자 및 활용을 검토할 필요가 있다.

셋째, DACCS 기술의 감축실적 측면에서는, 국제적으로 DACCS 기술을 활용한 감축실적 산정에 대한 통일된 방법론이 아직 마련되지 않았기에 우리나라는 DACCS 기술 연구뿐만 아니라 실적 산정 방법론에 대한 연구를 함께 진행할 필요가 있다. 특히 우리나라가 향후 확대하고자 하는 CCU 기술을 활용한 온실가스 감축량 역시 감축실적으로 인정받지 못하고 있는바, CCU 기술과 더불어 DACCS 기술의 산정 방법론 마련에도 더욱 박차를 가해 온실가스 감축 노력이 시장 주도로 이루어질 수 있도록 유도하여 앞서 언급한 민간 업체의 참여를 통한 DACCS 기술 보급을 촉진할 수 있어야 한다. 또한, 국제적으로 통용되는 감축실적을 바탕으로 한 다양한 국제협력 방안을 고민하여 실행할 필요도 있다.

본 연구는 대기 중의 이산화탄소를 포집하기 위한 기술에 초점을 맞추어 분석을 수행하였으며, 포집한 이산화탄소를 저장하거나 활용하는 구체적인 방안은 연구 범위에 포함시키지 않았다. 이는 포집한 이산화탄소를 저장하거나 제품으로 활용하는 방법 자체는 일반적인 CCUS 기술과 크게 다를 바가 없는 것이 그 이유이다. 그러나 기존의 CCU 기술에서는 화석연료 사용 및 산업 공정 중에 발생한 이산화탄소를 포집하여 제3의 물질을 만드는 것이 보편적인 반면, 대기 중의 이산화탄소를 포집하여 제품화하는 것, 즉 DACCU 기술을 활용할 시 특정 제품 사용을 통해 발생한 온실가스를 포집하여 다시 그 제품을 만드는

데에 활용하는 것이 가능하여 탄소 순환 사이클을 이룰 수 있다는 점에서 그 의미가 매우 크다. 예를 들어 수송 부문에서 배출된 이산화탄소를 포집하여 대체연료(e-fuel)를 생산한 후 다시 수송 부문에서 활용할 시, 이산화탄소는 제품에서 대기, 대기에서 다시 본래의 제품으로 순환하는 사이클을 이룰 수 있어 결과적으로 수송 부문의 탄소중립을 달성하기 위한 방안이 될 수 있다. 이는 우리나라의 2050 탄소중립 시나리오에서도 수송 부문 탄소중립 달성을 위해 검토하고 있는 방법이기도 하다(CNC, 2021). 수송 부문 외에도 탄소 순환을 목적으로 한 DACCU 기술의 활용 방안을 발굴하여야 하며, 본 연구의 후속 연구로서 동 주제를 고려할 필요가 있다. 본 연구를 통해 우리나라의 탄소중립 목표 달성 방안으로 DACCS 기술에 대한 검토가 더욱 활발히 이루어지고, 이에 따른 동 기술의 보급이 우리나라의 기후변화 대응에 기여하기를 기대한다.

사사

본 논문은 녹색기술센터 2021년 연구과제 「녹색·기후 기술 협력을 위한 국제제도 분석 연구: UNFCCC 및 IPCC를 중심으로(C2120101)」의 지원에 의해 수행되었으며, C2120101 연구보고서의 내용을 토대로 작성되었습니다. 동 논문은 한국환경정책학회 추계학술대회(2021.10.8./온라인)에서 “직접대기탄소포집·저장(DACCS) 기술에 대한 우리나라 R&D 정책 방향성 연구”로 발표되었고, 수정·보완을 거쳐 같은 제목으로 한국기후변화학회 하반기학술대회(2021.11.25/울산컨벤션센터)에서 발표된 내용에 기반하고 있습니다.

References

- Azarabadi H, Lackner KS. 2020. Postcombustion Capture or Direct Air Capture in Decarbonizing US Natural Gas Power? *Environ Sci Technol.* 54(8):5102-5111. doi:10.1021/acs.est.0c00161
- Breyer C, Fasihi M, Bajamundi C, Creutzig F. 2019. Direct Air Capture of CO₂: A Key Technology for Ambitious Climate Change Mitigation. *Joule.* 3(9):2053-2057. doi:10.1016/j.joule.2019.08.010
- Bui M, Adjiman CS, Bardow A, Anthony EJ, Boston A, Brown S, Fennell PS, Fuss S, Galindo A, Hackett LA, et al. 2018. Carbon capture and storage (CCS): The way forward. *Energy Environ Sci.* 11(5):1062-1176. doi:10.1039/c7ee02342a
- Burns W. 2018. The Royal Society's New Report on Greenhouse Gas Removal. [accessed 2021 Dec 27]. <http://ceassessment.org/the-royal-societys-new-report-on-greenhouse-gas-removal/>
- Capanna S, Higdon J, Lackner M. 2021. Early Deployment of Direct Air Capture with Dedicated Geologic Storage: Federal Policy Options. https://www.edf.org/sites/default/files/documents/DACPolicy_Final.pdf
- CARB [California Air Resources Board]. 2019. Carbon Capture and Sequestration Project Eligibility FAQ. [accessed 2021 Dec 27]. <https://ww2.arb.ca.gov/resources/fact-sheets/carbon-capture-and-sequestration-project-eligibility-faq>
- Carbon Engineering. 2019. Engineering of world's largest Direct Air Capture plant begins. [accessed 2021 Dec 27]. <https://carbonengineering.com/news-updates/worlds-largest-direct-air-capture-and-sequestration-plant/>
- CIPD [Chartered Institute of Personnel and Development]. 2020. PESTLE analysis. [accessed 2021 Dec 27]. <https://www.cipd.co.uk/knowledge/strategy/organisational-development/pestle-analysis-factsheet>
- CNC [2050 Carbon Neutrality Committee]. 2021. 2050 Carbon Neutrality Scenario. [accessed 2021 Dec 27]. http://www.2050cnc.go.kr/download/BOARD_ATTACH?storageNo=204 (in Korean)
- Deutz S, Bardow A. 2021. Life-cycle assessment of an industrial direct air capture process based on temperature-vacuum swing adsorption. *Nat Energy.* 6(2):203-213. doi:10.1038/s41560-020-00771-9. <http://dx.doi.org/10.1038/s41560-020-00771-9>
- Dixon T, Leamon G, Zakkour P, Warren L. 2013. CCS projects as Kyoto Protocol CDM activities. *Energy Procedia.* 37:7596-7604. doi:10.1016/j.egypro.2013.06.704
- EIASS [Environmental Impact Assessment Support System]. 2019. Information on Environmental Impact Assessment. [accessed 2021 Dec 27]. <https://eiass.go.kr/inform/system/intro.do> (in Korean)

- Fasihi M, Efimova O, Breyer C. 2019. Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. *J Clean Prod.* 224:957–980. doi:10.1016/j.jclepro.2019.03.086
- Fuss S, Lamb WF, Callaghan MW, Hilaire J, Creutzig F, Amann T, Beringer T, De Oliveira Garcia W, Hartmann J, Khanna T, et al. 2018. Negative emissions - Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environ Res Lett.* 13(6). doi:10.1088/1748-9326/aabf9f
- Gambhir A, Tavoni M. 2019. Direct Air Carbon Capture and Sequestration: How It Works and How It Could Contribute to Climate-Change Mitigation. *One Earth.* 1(4):405–409. doi:10.1016/j.oneear.2019.11.006
- GEMET. 2020. Emission reduction. [accessed 2021 Dec 27]. <https://www.eionet.europa.eu/gemet/en/concept/2670>
- Gertner J. 2019 Feb. The Tiny Swiss Company That Thinks It Can Help Stop Climate Change. *N Y Times Mag.* [accessed 2021 Dec 27]. <https://www.nytimes.com/2019/02/12/magazine/climeworks-business-climate-change.html>
- Gim B-M, Choi TS, Lee J-S, Park Y-G, Kang S-G, Jeon E-C. 2013. Evaluation System of Environmental Safety on Marine Geological Sequestration of Captured Carbon Dioxide. *J Korean Soc Mar Environ Energy.* 16(1):42–52. doi:10.7846/jkosmee.2013.16.1.42 (in Korean with English abstract)
- Global CCS Institute. 2015. How does carbon capture affect water consumption. [accessed 2021 Dec 27]. <https://www.globalccsinstitute.com/news-media/insights/how-does-carbon-capture-affect-water-consumption/>
- Global CCS Institute. 2019. Global status of CCS. [accessed 2021 Dec 27]. https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/12/GCC_GLOBAL_STAT_US_REPORT_2019.pdf
- Global Thermostat. A Unique Capture Process. [accessed 2021 Dec 27]. <https://globalthermostat.com/a-unique-capture-process/>
- Global Thermostat. 2020. Global Thermostat Adds New Support for Its Carbon Removal Technology. [accessed 2021 Dec 27]. <https://globalthermostat.com/2020/09/global-thermostat-adds-new-support-for-its-carbon-removal-technology-2/>
- GPI (Great Plains Institute). 2019. Primer: 45Q Tax Credit for Carbon Capture Projects. [accessed 2021 Dec 27]. https://www.betterenergy.org/wp-content/uploads/2019/06/45Q_Primer_May_2019.pdf
- Haszeldine S, Cavanagh A, Scott V, Sohi S, Mašek O, Renforth P. 2019. Greenhouse Gas Removal Technologies - approaches and implementation pathways in Scotland. Edinburgh. [accessed 2021 Dec 27]. <https://www.climateexchange.org.uk/media/3749/greenhouse-gas-removal-technologies.pdf>
- Heo Y, Lee J, Lee JW, Park S. 2018. Recent Research and Developments of Solid Adsorbents for CO₂ Capture in Post-combustion. *KIC News.* 21(4):13–23. [accessed 2021 Dec 27]. <https://www.cheric.org/PDF/PIC/PC21/PC21-4-0013.pdf> (in Korean)
- Honegger M, Reiner D. 2018. The political economy of negative emissions technologies: consequences for international policy design. *Clim Policy.* 18(3):306–321. doi:10.1080/14693062.2017.1413322
- IEA. 2021. Net Zero by 2050. Paris. [accessed 2021 Dec 27]. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- Interagency. 2010. National CCS Project. [accessed 2021 Dec 27]. <https://www.korea.kr/common/download.do?tblKey=EDN&fileId=198568> (in Korean)
- Interagency. 2021. CCU Technology Innovation Roadmap. [accessed 2021 Dec 27]. <https://www.korea.kr/common/download.do?fileId=195009538&tblKey=GMN> (in Korean)
- IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change]. 2005. Carbon dioxide capture and storage. Metz B, Davidson O, de Coninck H, Loos M, Meyer L, editors. Cambridge: Cambridge University Press. [accessed 2021 Dec 27]. <https://www.ipcc.ch/report/carbon-dioxide-capture-and-storage/>
- IPCC. 2018. Global Warming of 1.5°C. [accessed 2021 Dec 27]. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Jang Y, Kim U, Yoon Y, Baek J-I. 2019. Characterization of Potassium Based Dry CO₂ Sorbents Developed for the Reduction of Side Reactions. *KEPCO J Electr Power Energy.* 5(4):337–341. doi:10.18770/KEPCO.2

- 019.05.04.337 (in Korean with English abstract)
- de Jonge MMJ, Daemen J, Loriaux JM, Steinmann ZJN, Huijbregts MAJ. 2019. Life cycle carbon efficiency of Direct Air Capture systems with strong hydroxide sorbents. *Int J Greenh Gas Control*. 80(October 2018):25-31. doi:10.1016/j.ijggc.2018.11.011
- Kang W. 2021 Mar 15. KIER concluded a contract with SK Materials on transfer of carbon capture technology. *Electronic Times Internet*. [accessed 2021 Dec 27]. <https://www.etnews.com/20210315000176> (in Korean)
- KCRC [Korea Carbon Capture & Sequestration R&D Center]. Definition of CCS technology. [accessed 2021 Dec 27]. <http://www.kcrc.re.kr/html/news.html> (in Korean)
- KCRC. 2020. Recent trends of CCS. [accessed 2021 Dec 27]. <http://www.kcrc.re.kr/html/news02.html> (in Korean)
- Keith DW, Holmes G, St. Angelo D, Heidel K. 2018. A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere. *Joule*. 2(8):1573-1594. doi:10.1016/j.joule.2018.05.006
- KNOC [Korea National Oil corporation]. 2021. Business Info - CCS Project. [accessed 2021 Dec 27]. https://www.knoc.co.kr/sub03/sub03_9.jsp (in Korean)
- KNREC [Korea Energy Agency New & Renewable Energy Center]. 2021. Current status of wind power. [accessed 2021 Dec 27]. https://www.knrec.or.kr/business/windpowerTF_internal.aspx (in Korean)
- Kwon J. 2021 Jul 1. 10-MW liquid CO₂ capture facility commenced commercial operation. *Energy Newspaper*. [accessed 2021 Dec 27]. <http://www.energy-news.co.kr/news/articleView.html?idxno=77274> (in Korean)
- Kwon J. 2020 Mar 15 [2020a]. 100-MW Solaseado PV plant, the largest in Korea, commenced commercial operation. *Energy Newspaper*. [accessed 2021 Dec 27]. <https://www.energy-news.co.kr/news/articleView.html?idxno=69684> (in Korean)
- Kwon J. 2020 Nov 17 [2020b]. Construction completed on 100-MW Yeonggwang PV plant, the largest in Korea. *Energy Newspaper*. [accessed 2021 Dec 27]. <https://www.energy-news.co.kr/news/articleView.html?idxno=73871> (in Korean)
- Kwon YK, Shinn YJ. 2018. Suggestion for technology development and commercialization strategy of CO₂ capture and storage in Korea. *Econ Environ Geol*. 51(4):381-392. doi:10.9719/EEG.2018.51.4.381 (in Korean with English abstract)
- Lee J, Kim BJ, Shin SH, Kwak NS, Lee DW, Lee JH, Shim JG. 2016. 0.1 MW test bed CO₂ capture studies with new absorbent (KoSol-5). *Appl Chem Eng*. 27(4):391-396. doi:10.14478/ace.2016.1046 (in Korean with English abstract)
- Lee JB. 2014. Development trends of CO₂ capture technology with solid absorbents. *Green Technology Trend Report*:83-90. [accessed 2021 Dec 27]. http://gift.kisti.re.kr/announce/analysis-report/2014/gtnet_14052.pdf (in Korean)
- Lee JH, Kwak NS, Lee DW, Shim JG, Lee Jung Hyun. 2016. Development of Techno-Economic Evaluation Model for CCS (Carbon Capture & Sequestration). *J Clim Chang Res*. 7(2):111. doi:10.15531/kscrc.2016.7.2.111 (in Korean with English abstract)
- Lee WR, Hwang SY, Ryu DW, Lim KS, Han SS, Moon D, Choi J, Hong CS. 2014. Diamine-functionalized metal-organic framework: Exceptionally high CO₂ capacities from ambient air and flue gas, ultrafast CO₂ uptake rate, and adsorption mechanism. *Energy Environ Sci*. 7(2):744-751. doi:10.1039/c3ee42328j
- Lehtveer M, Emanuelsson A. 2021. BECCS and DACCS as Negative Emission Providers in an Intermittent Electricity System: Why Levelized Cost of Carbon May Be a Misleading Measure for Policy Decisions. *Front Clim*. 3(March):1-12. doi:10.3389/fclim.2021.647276
- McQueen N, Gomes KV, McCormick C, Blumanthal K, Pisciotta M, Wilcox J. 2021. A review of direct air capture (DAC): scaling up commercial technologies and innovating for the future. *Prog Energy*. 3(3):032001. doi:10.1088/2516-1083/abf1ce
- Meckling J, Biber E. 2021. A policy roadmap for negative emissions using direct air capture. *Nat Commun*. 12(1):1-6. doi:10.1038/s41467-021-22347-1
- NASEM [National Academies of Sciences Engineering and

- Medicine]. 2019. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration. Washington, DC: The National Academies Press. [accessed 2021 Dec 27]. <https://www.nap.edu/catalog/25259/negative-emissions-technologies-and-reliable-sequestration-a-research-agenda>
- Oh C, Jang C, Lim H, Jeon D, Kim Y, Shin J, Kang M, Yang R, Eom D, Park I, et al. 2019. Facilitation of RD&D of carbon utilization technologies: The barrier analysis of Korean policy status and the suggestion of policy directions. Green Technology Center. [accessed 2021 Dec 27]. <https://gtck.re.kr/gtck/gtcPublication.do?mode=view&articleNo=1817> (in Korean)
- Park S, Oh C, Shin K. 2020. Research on Korea's Negotiating Position on Types of Mitigation based on Carbon Capture, Utilization, and Storage Technology under Article 6 of the Paris Agreement. *J Clim Chang Res.* 11(5-2):563-581. doi:10.15531/kscsr.2020.11.5.563 (in Korean with English abstract)
- Realmonde G, Drouet L, Gambhir A, Glynn J, Hawkes A, Köberle AC, Tavoni M. 2019. An inter-model assessment of the role of direct air capture in deep mitigation pathways. *Nat Commun.* 10(1):1-12. doi:10.1038/s41467-019-10842-5
- Sanz-Pérez ES, Murdock CR, Didas SA, Jones CW. 2016. Direct Capture of CO₂ from Ambient Air. *Chem Rev.* 116(19):11840-11876. doi:10.1021/acs.chemrev.6b00173
- SDIA [Saemangeum Development and Investment Agency]. 2021. The renewable energy cluster - Creating a power generating complex. [accessed 2021 Dec 27]. <https://www.saemangeum.go.kr/sda/content.do?key=2009163923245> (in Korean)
- RS [The Royal Society], RAE [Royal Academy of Engineering]. 2018. Greenhouse Gas Removal. London: The Royal Society. [accessed 2021 Dec 27]. <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/greenhouse-gas-removal/royal-society-greenhouse-gas-removal-report-2018.pdf>
- UNEP-DTU Partnership. 2020. CDM projects by type. [accessed 2021 Dec 27]. <https://www.cdmpipeline.org/cdm-projects-type.htm>
- UNEP [United Nations Environment Programme]. 2017. The Emissions Gap Report 2017. Nairobi. [accessed 2021 Dec 27]. <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2017>
- UNEP. 2020. Emissions Gap Report 2020. Nairobi. [accessed 2021 Dec 27]. <https://www.unenvironment.org/interactive/emissions-gap-report/2019/>
- UNFCCC [United Nations Framework Convention on Climate Change]. 2020. CDM Methodology Booklet. [accessed 2021 Dec 27]. https://cdm.unfccc.int/methodologies/documentation/meth_booklet.pdf
- UNFCCC. 2003. Modalities and procedures for afforestation and reforestation project activities under the clean development mechanism in the first commitment period of the Kyoto Protocol (Decision 19/CP.9). [accessed 2021 Dec 27]. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/cop9/06a02.pdf>
- UNFCCC. 1997. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. [Accessed on 2021 Dec 27]. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/cop3/107a01.pdf>
- Wang X, Song C. 2020. Carbon Capture From Flue Gas and the Atmosphere: A Perspective. *Front Energy Res.* 8(December 2019). doi:10.3389/fenrg.2020.560849
- Yi C-K. 2015. Dry Solid Sorbent CO₂ Capture Project of 10MWe Scale. In: Carbon Sequestration Leadership Forum. Riyadh. [accessed 2021 Dec 27]. <https://www.cslforum.org/cslf/sites/default/files/documents/riyadh2015/Yi-DrySolidSorbentProject-TG-Riyadh1115.pdf>
- Yoo C. 2010 Sep 27. Solid vs. liquid, which CCS technology. *Electronic Times Internet.* [accessed 2021 Dec 27]. <https://www.etnews.com/201009270171?obj=Tzo4OiJzdGRDbGFzcyI6Mjpp7czo3OiJyZWZlcmVyIjtoO3M6NzoiZm9yd2FyZCI7czo3Mzoid2ViIHRvIG1vYmlsZSI7fQ%3D%3D> (in Korean)