Check for updates

Journal of Climate Change Research 2024, Vol. 15, No. 4, pp. 489~511
DOI: https://doi.org/10.15531/KSCCR.2024.15.4.489

이산화탄소 직접포집(DAC) 및 동시포집전환(RCC) 기술의 우리나라 기술수준 평가 연구: 델파이 방법을 활용한 전문가 설문을 중심으로

송예원[*†] · 오상진[**†] · 오채운[***†]
[*]국가녹색기술연구소 정책연구본부 글로벌전략센터 연구원, [**]국가녹색기술연구소 정책연구본부 선임연구원,
[***]국가녹색기술연구소 정책연구본부 국가기후기술협력센터 책임연구원

Korea's technological level evaluation compared with global direct air capture (DAC) and reactive capture and conversion (RCC) technologies: Expert surveys using the Delphi method

Song, Yewon[*†] · Oh, Sangjin[**†] and Oh, Chaewoon[***†]
[*]*Researcher, Center for Global Strategy, Division of Policy Research, National Institute of Green Technology, Seoul, Korea*
[**]*Senior Researcher, Division of Policy Research, National Institute of Green Technology, Seoul, Korea*
[***]*Principal Researcher, National Climate Technology Cooperation Center, Division of Policy Research, National Institute of Green Technology, Seoul, Korea*

ABSTRACT

As the need for carbon neutrality strategies intensifies globally, direct air capture (DAC) and reactive capture and conversion (RCC) technologies are emerging as important solutions to mitigating climate change through atmospheric carbon dioxide removal. DAC technologies are categorized into three types: i) liquid DAC, ii) solid DAC, and iii) membrane DAC, and each has specific operational and energy requirements. RCC technologies, which simultaneously capture and convert CO_2into valuable products, also hold significant promise for a circular carbon economy. This study evaluates South Korea's standing with regard to global DAC and RCC technological levels using a Delphi method-based survey of experts. The analysis aims to establish the relative position of Korea's technological capabilities compared to leading countries in this field. By leveraging expert opinions through the Delphi method, this research assesses Korea's position and derives strategic recommendations for future technological development and international cooperation, which are vital to achieving Korea's 2050 carbon neutrality goals and enhancing global competitiveness in climate technology. This study concludes that Korea's DAC and RCC technologies stand at 71-85% of the technological level of the leading countries globally and that significant technological improvements are still required. As policy recommendations, this research emphasizes the need for i) intensified research and development efforts, ii) more robust international cooperation, and iii) incentive-based policies to facilitate the demonstration and deployment of scalable DAC and RCC technologies.

Key words : Technological Level Evaluation, Direct Air Capture (DAC), Reactive Capture and Conversion (RCC), Delphi Method, Carbon Neutrality

†Corresponding author : songyewon@gmail.com, 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 송예원 0000-0002-2767-094X 오채운 0000-0003-1357-5519
오상진 0000-0003-4782-7016

Received: April 22, 2024 / Revised: June 10, 2024 1st, July 1, 2024 2nd / Accepted: July 22, 2024

1. 서론

기후변화 대응을 위한 국가 전략으로서의 탄소중립 달성이 중요해지면서 대기 중 이산화탄소 직접포집(DAC, direct air capture) 기술이 최근 많은 관심을 받고 있다. 이 기술은 온실가스 감축 노력의 두 가지 접근법인 배출저감(emission reduction)과 이산화탄소 제거(CDR, carbon dioxide removal) 접근법 중 후자에 속한다. 배출저감이 배출원(emission source)에서 사용되는 에너지를 전환하거나 또는 감축설비 등을 설치함으로써 배출량을 줄이는 접근법이라면, 이산화탄소 제거 접근법은 대기 중에 존재하는 이산화탄소를 포집하여 매체(자연 또는 상품)에 내구성 있게(durably) 저장하여 제거(removal)하는 활동이다(IPCC, 2023, p. 121). 이산화탄소 제거 접근법은 산림, 해양 등을 활용하는 자연적 접근법과 물리화학적으로 이산화탄소를 제거하는 공학적(engineering) 접근법으로 나눌 수 있는데, DAC 기술은 대표적인 공학적 접근법에 속한다(UNFCCC, 2022, pp. 7-8). 기후변화에 관한 정부간 패널(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)은 이산화탄소 제거 접근법이 배출저감 노력에도 여전히 존재하는 잔여 배출량을 상쇄함으로써 탄소중립 달성에 필요할 뿐만 아니라, 더 나아가 네거티브 배출(negative emissions)을 달성하는 데에도 필요하다고 밝히고 있다(IPCC, 2018, C.3, 2022, C.11).

그런데, 대부분의 CDR 접근법들은 많은 토지면적이 필요하거나 또는 환경·사회적으로 부정적 영향이 발생할 가능성이 높아 대규모 적용에 있어서 상당히 고려가 필요하다. 반면, 동 연구에서 집중하고 있는 DAC 기술은 상대적으로 적은 토지 면적을 필요로 하고 환경 영향이 낮으며 입지 선정의 자유도가 높다는 특징이 있어 전 세계적으로 많이 활용될 것으로 기대를 모으고 있는 접근법이다. 동 기술은 기존에는 높은 비용이 기술 활용 및 확산의 장애요인이 되었으나, 최근 기술 발전으로 소요 비용이 빠른 속도로 하락하고 있다(IEA, 2022, p. 9). 국제에너지기구(IEA, International Energy Agency) 보고서에 따르면, 2050년 탄소중립을 달성하기 위해서는 2030년까지 평균적으로 매년 대규모(연포집량 1백만톤) DAC 설비 8개가 지어져야 하며, 2030 ~ 2040년에는 매년 약 50개가, 2040 ~ 2050년에는 매년 약 40개가 지어져야 하고, 이 경우 2050년 DAC 기술을 통해 매년 약 10억 톤의 이산화탄소가 제거될 것으로 보인다(IEA, 2022, p. 34).

IEA의 이러한 분석을 뒷받침하듯, DAC 기술에 대한 R&D가 일찍이 시작된 몇몇 선진국에서는 DAC 기술 사업화가 활발히 진행되고 있다. 가장 대표적인 DAC 기술기업으로는 캐나다의 카본엔지니어링(Carbon Engineering)社[1] 와 스위스의 클라임웍스(Climeworks)社, 미국의 글로벌써모스탯(Global Thermostat)社를 들 수 있다. 이 중 가장 선도적으로 사업화를 진행하고 있는 곳은 클라임웍스社로, 현재 아이슬란드에서 이산화탄소 연포집량 4천톤 규모의 DAC 설비 오르카(Orca)를 운영하고 있으며, 더 나아가 현재의 설비 부근에 연포집량 3만6천톤 규모의 DAC 설비 맘모스(Mammoth)를 건설하고 있다(Climeworks, 2022). 카본엔지니어링社의 경우 현재 상용 운영 중인 설비는 없으나, 세계 최대 규모인 이산화탄소 연포집량 50만톤 규모의 DAC 설비 스트라토스(Stratos)를 미국 텍사스주에 건설 중이다(Carbon Engineering, 2023). 한편 글로벌써모스탯社의 경우 미국 콜로라도주에서 연포집량 1천톤 규모로 자사의 DAC 기술에 대한 실증을 진행하고 있다(Global Thermostat, 2023).

우리나라 역시 2050년 탄소중립 목표를 달성하기 위하여 DAC 기술을 활용하려는 노력이 최근 진행되고 있다. 2050탄소중립위원회(現 탄소중립녹색성장위원회)는 2021년에 발표한 탄소중립 시나리오 중 B안에 수송 부문의 잔여 배출량 상쇄를 위하여 DAC 기술을 활용하여 대기 중에서 이산화탄소를 포집한 후, 이를 활용해 대체연료(e-fuel)를 생산하겠다는 계획을 발표하였다(2050CNC, 2021, p. 63). 또한 최근까지의 R&D 동향을 살펴보면, 우리나라에서 진행된 대부분의 연구는 개별 연구자 혹은 연구기관 자체적으로 수행해 왔는데, 대표적으로 한국에너지기술연구원, 한국과학기술연구원 등의 정부출연연구기관, KAIST, 한양대학교 등의 대학교, 포스코홀딩스㈜, ㈜로우카본 등의 민간기업 등이 있다.[2] 그러나 우리나라의 탄소중립 목표 달성을 위한 DAC 기술의 활용 가능성이 점차 강조되어, 2023년에 우리나라에서 DAC 기술에 대

1) 2023년 미국의 석유기업 옥시덴탈(Occidental 혹은 Oxy)社는 카본엔지니어링사를 미화 11억 달러에 100% 자회사로 인수 · 편입하였다. 따라서 모기업은 미국 기업이나, 카본엔지니어링社의 본사는 여전히 캐나다에 있다(Stephenson, 2023).

2) 특히 ㈜로우카본의 경우 자체 개발한 모듈화된 DAC 포집설비의 상품화에 성공하여 “Zero C”라는 상품명으로 관련 사업을 진행하고 있다.

한 원천기술 R&D가 한국연구재단 사업으로 처음 시작되었다(NRF, 2023). 동 연구사업의 목표는 DAC 포집기술과 더불어 포집한 이산화탄소를 바로 제품으로 전환하는 "동시포집 · 전환(RCC, reactive capture and conversion)" 기술을 함께 개발하는 것이다. 이를 통해 이산화탄소 지중저장소가 부족한 우리나라의 환경적 요인에 대응하여 저장할 필요 없이 포집한 이산화탄소를 포집 즉시 효과적으로 제품화할 수 있을 것으로 기대를 모으고 있다. 다만, 앞서 언급된 바와 같이 해외 선도 기업들이 DAC 기술 R&D 단계에서 더 나아가 대규모 실증과 활용을 성공적으로 진행하고 있으며, 관련 선진국들이 DAC 기술에 대한 R&D가 상당히 진행되고 있는 바, 현재 우리나라 기술이 이러한 국가들과 비교할 때 어떠한 수준인지를 가늠하고 향후 R&D 및 실증을 위한 기술 R&D 및 정책 방향성을 지금부터 모색할 필요가 있다.

이에, 본 연구에서는 현재 우리나라가 보유 및 개발 중인 DAC 및 RCC 기술의 수준이 다른 나라와 비교할 때 상대적으로 어느 정도 수준인지를 분석해보고자 한다. 이를 통하여 우리나라의 기술수준을 파악하고, 기술선도국의 사례 검토를 통해 우리나라에 주는 시사점을 도출하며, 향후 우리나라의 기술개발 및 협력 방향성을 살펴보고자 한다. 이를 위하여 제2장에서는 기술수준분석에 필요한 배경 설명으로써 DAC 및 RCC 기술의 개요에 대하여 설명하고, 제3장에서는 기술수준 평가를 위한 연구방법론으로 채택한 델파이 방법론을 개괄하고 이를 DAC 기술수준 분석에 적용하기 위한 적용 절차에 대해서 설명한다. 제4장에서는 이러한 방법론에 따라 전문가 설문을 통해 도출한 기술수준 분석 결과 및 이에 대한 정책적 함의를 다룬다. 마지막으로 제5장에서 연구 내용을 정리하며 마무리한다.

2. DAC 및 RCC 기술 개요

2.1. DAC 기술

DAC 기술은 포집제의 종류에 따라 크게 습식포집(Liquid-DAC), 건식포집(Solid-DAC), 분리막포집(Membrane-DAC) 이 세 가지로 구분할 수 있다(IEA, 2022, p. 21).[3] 먼저, DAC 습식포집 기술은 대기 중의 이산화탄소를 '흡수제' 용액 속에 주입·이온화하는 흡수과정과 이후 열을 가해 화학적으로 흡수되었던 이산화탄소를 분리하는 재생과정으로 이루어진다(Song and Oh, 2022a, 2022b). 화석연료 연소 및 산업시설에서 활용되는 일반적인 이산화탄소포집·저장(CCS, carbon capture & storage) 기술에서는 습식포집으로 아민 기반 흡수제가 주로 사용되나, 아민의 특성상 독성 및 부식성이 크기 때문에 많은 양의 공기를 통과시켜야 하는 DAC 기술에서는 활용하기 어렵다(Brethomé et al., 2018). 대신, 이산화탄소가 물에 녹으면 산성을 띠는 탄산이온을 형성한다는 점을 활용하여 염기성을 띠는 수용액을 포집제로 활용하는 것이 일반적이다(Gambhir and Tavoni, 2019). 이렇게 산성을 띄는 탄산이온과 염기성을 띄는 포집제가 만나면 서로 결합하여 중성인 염(salt)을 형성하게 되는데, 이를 '중화반응'이라 부른다.[4] 이 중화반응을 통해 이산화탄소를 쉽게 포집할 수 있다. 이산화탄소 흡수 후 재생과정은 포집과정(중화반응)에서 형성된 염에서 이산화탄소를 분리해내어 다시 원래의 포집제를 재생하는 과정이다. 이 과정에서 매우 많은 열이 필요하며 이 반응열을 낮추기 위한 공정들이 다양하게 존재한다. 통상 제지산업에서 흔히 사용되는 바와 같이 탄산칼슘(CaO)을 첨가하여 반응열을 낮춰주는 크라프트(Kraft) 공정이 대표적이다(Song and Oh, 2022a). 그러나 반응열을 낮추었더라도 여전히 이산화탄소 재생 과정에서 고온의 열이 필요해 매우 많은 에너지를 필요로 하며, 또한 가열 설비를 갖춰야 하기에 재생탑의 규모가 커져 설비 비용 역시 많이 든다. 또한 습식공정 특성상 공정 과정 중 증발 등으로 물 손실이 발생할 수 있어 물 소모가 많이 발생할 수 있다는 문제 역시 존재한다(IPCC, 2022, Sec. 12.3.1). 이에, 고온이 필요하다는 점을 극복하고자 최근에는 상온·상압 조건에서 이산화탄소 포집 및 재생이 이루어지며, 소형으로 모듈화가 가능한 바이폴라 전기투석(BPED, bipolar electrodialysis) 장치를 이용하려는 시도가 존재한다.[5] DAC 습식포집 기술의 장점은 설비의 대형화가 용이해 운영 유연성이 높고, 빠른 반응 속도 및 높은 효율로 대기 중의 이산화탄소를 제거할 수 있다는 점을

3) 앞서 언급한 IEA의 DAC 기술보고서에서는 습식포집, 건식포집, 분리막포집을 각각 L-DAC, S-DAC, m-DAC로 칭한다(IEA, 2022, pp. 73-74). 그러나 본 연구에서는 직관성 제고 차원에서 명칭을 상술하였다.

4) DAC 습식 포집에서는 공기를 강염기성의 액상 포집제 안으로 주입하게 되는데, 이 때 이산화탄소가 포집제에 녹으며 탄산이온을 형성하게 되는데, 이때 용액이 강염기성을 띤다면 중화반응이 나타난다.

5) BPED 기술은 염(salt) 용액을 전기투석을 통해 산(acid)과 염기(base)로 분리하여 염기 용액은 CO_2 포집에 사용하고, 산 용액은 CO_2

들 수 있다. 그러나 고온의 열이 필요해 에너지 소모가 크고 엄밀한 제어가 필요하다는 점은 약점이라 할 수 있다(IPCC, 2022, Sec. 12.3.1).

다음으로, DAC 건식포집 기술은 흡착제의 표면과 이산화탄소 간의 친화도를 이용하여 흡착제의 표면에 이산화탄소만 선택적으로 흡착시키는 기술이다. 일반적으로 가스 분자는 고체 표면과 약한 인력작용(van der Waals 인력)을 통해서 고체 표면에 흡착되려는 성질을 가지고 있다. 이산화탄소도 마찬가지로 친화도에 따라서 고체 표면에 달라붙을 수 있으며, 이와 같은 과정을 물리흡착(physisorption)이라고 지칭한다. 물리흡착은 기본적으로 약한 인력을 이용하는 방식이기 때문에 흡착된 가스 분자를 떼어내는 역과정(재생과정)에도 적은 에너지가 사용된다는 장점이 있다. 하지만 공기에서 이산화탄소는 매우 낮은 농도(0.04%)로 인해 분압(partial pressure)이 낮아 결국 물리흡착의 구동력이 낮아져 많은 양의 이산화탄소를 포집하기는 어려운 과정이다(Bui et al., 2018). 반면, 물리흡착보다 매우 강한 분자 인력을 이용하는 화학흡착(chemisorption) 방식을 활용할 수도 있다. 이는 보통 금속 입자의 표면인력이나 화학반응을 이용하는 방식으로 DAC 건식포집 과정에서는 대부분 고형화된 아민 입자와 이산화탄소 간의 반응을 이용한다. 매우 낮은 농도의 이산화탄소와도 화학적으로 반응하는 과정이기 때문에 공기 중 이산화탄소의 매우 낮은 농도에서도 원활히 이산화탄소를 포집할 수 있는 기술이다. 화학흡착 방식을 통해 높은 친화력으로 포집된 이산화탄소를 제거하기 위해서는 물리흡착보다 높은 열에너지가 필요한데, 대략 80 ~ 120℃의 온도로 화학흡착제를 재생하는 과정이 일반적이다(Sanz-Pérez et al., 2016). 현재 대부분의 상용화된 DAC 건식포집 기술은 고체 아민 분자가 기능화된 흡착층으로 화학흡착을 진행하는 공정으로 진행되고 있다. 이러한 건식포집 기술은 포집설비 규모와 이산화탄소 제거량이 비례하기 때문에 설비의 규모화 측면에서의 유연성이 습식보다는 낮으나, 모듈화하여 활용할 수 있다는 점은 장점이 될 수 있다. 통상적으로 습식포집보다 에너지 소모량이 낮으나, 이산화탄소 포집 및 재생을 위하여 엄밀한 제어조건을 충족시켜야 하며, 흡착제의 종류에 따라 반응속도는 천차만별이다(Bui et al., 2018).

마지막으로, DAC 분리막포집 기술도 존재한다. DAC 습식포집 및 건식포집 기술은 이미 실증 및 사업화가 시작될 정도의 기술성숙도를 보이고 있으나, 여전히 포집된 이산화탄소의 재생공정에 많은 양의 열에너지와 습식의 경우 많은 양의 물을 소모하게 된다는 점이 장애요인으로 꼽힌다. 이에 반해 DAC 분리막포집 기술은 아직 연구개발 단계에 머물러있으나, 낮은 비용, 더 간단한 설치 및 작동, 더 작은 설치 면적 등의 장점으로 인해 많은 관심을 받고 있다. 기존의 분리막은 낮은 이산화탄소 투과도를 가지고 있어 DAC 기술에 활용하기 위해서는 이산화탄소 농축 및 매우 큰 막 면적이 필요하여 결과적으로 큰 에너지 소모량을 보이기 때문에 비현실적이라고 여겨져 왔다(Keith, 2009). 그러나 최근 막 기술의 발전과 함께 분리막 공정이 DAC 기술에 활용 가능성이 높아졌다. 이를 위해서는 우선 대기 중의 매우 낮은 농도의 이산화탄소를 분리·집중시켜 농도를 높이는 것이 필요하다. 만약 미래에 DAC 분리막포집에 사용될 수 있는 고(高)투과, 고(高)선택성 분리막 소재가 개발되어 단일공정으로 12%의 CO_2 농도를 달성할 수 있다면 이는 전 세계에서 사용되는 화력발전소 배가스 농도와 유사하게 되어 다단계 막공정이나 하이브리드 공정을 통해 직접 포집하여 사용하는 데 있어 더 뛰어난 성능을 제공할 것으로 기대된다(Yoo and Park, 2020). 이러한 DAC 분리막포집 기술의 성숙을 위해서는 i) 저렴한 막 재료, ii) 혼합물 분리에서 얻은 최적의 비투과도(specific permeance) 및 선택성, iii) 이산화탄소 외 기타 온실가스를 제거하는 효과, iv) 습식 및 건식포집과 비교시 분리막포집 공정의 적용 내구성, v) 공정 비용 절감 등이 증명될 필요가 있다. 지금까지 살펴본 DAC 습식포집, 건식포집, 분리막포집 기술의 특성을 정리해보면 Table 1과 같다.

다음으로 주요국(한국, 미국, EU, 일본)에서의 DAC 기술의 R&D 및 사업화 동향의 주요 특징을 살펴보고자 한다. 우리나라의 경우, DAC 습식포집 기술에 대해서는 (주)로우카본이 사업화를 진행하여 월간 이산화탄소 포집량 50 kg 및 100 kg 규모의 모듈을 Zero C라는 제품명으

분리에 사용하는 기술이다. 예를 들어 알칼리 흡수용액으로 KOH, 산용액으로 HCl을 사용할 경우를 가정하여 각 단위공정에서의 예상되는 반응식과 단위공정 특성을 살펴보면, 먼저 이산화탄소 포집을 위한 흡수공정을 살펴보면, 산-알칼리 중화반응을 통해 대기 중 이산화탄소를 KOH 흡수액으로 포집한다. 이때 K_2CO_3 혹은 $KHCO_3$가 생성된다. 다음으로는 이렇게 이산화탄소를 포집한 용액에 HCl 등의 산을 섞어서 pH를 낮추어 이산화탄소를 기체 상태로 분리시킨다. HCl을 활용할 경우에는 이산화탄소가 분리되며 KCl이 생성된다. 이러한 재생공정 역시 상온, 상압에서 이루어진다는 점이 하소를 필요로 하는 기존의 강염기 수용액 방식과의 매우 큰 차이점이라고 할 수 있다. 마지막으로는 BPED 장치에 전기에너지를 공급하여 염 용액을 산과 염기로 분리시켜 이를 이산화탄소 포집 및 재생공정에 다시 활용한다.

Table 1. Comparisons of DAC technologies by type

Characteristics	① Liquid-DAC	② Solid-DAC	③ Membrane-DAC
Operating flexibility	High	Medium	High
Control condition	High	High	Low
Response time	Fast (5-15 min.)	N/A	Immediate
CO_2 removal efficiency	90–98%	80–95%	80–90%
Energy required	4–6 MJ/kgCO_2	2–3 MJ/kgCO_2	0.5–6 MJ/kgCO_2

Source: Arranged by the authors based on Mondal et al. (2012), Aaron and Tsouris (2005), Xu et al. (2018), Bui et al. (2018), and Embaye et al. (2021)

로 출시하였다(Choi, 2024). 포항공과대학교와 포스코홀딩스(주)가 상온·상압에서도 이산화탄소 포집 및 재생이 가능하도록 바이폴라 전기투석(BPED) 기술을 활용하여 이산화탄소 연포집량 1톤 규모의 소형 이동형 DAC 장치에 대한 연구를 진행하고 있다.[6] DAC 건식포집 기술에 대해서는 KAIST에서 관련 연구를 2018년부터 진행해왔으며, 2023년에는 연구팀에서 자체적으로 스타트업 기업 Sorv를 설립하여 국내 DAC 기술의 사업화를 추진하고 있다(MMML, 2024). 또한 한국에너지기술연구원에서는 2023년부터 총 3년의 연구과제 수행을 통해 하루 10 kg의 이산화탄소를 포집할 수 있는 시설을 제작하고 실증하는 것을 목표로 하고 있다. 분리막포집 기술의 경우, 아직 민간기업 주도의 사업화 실적은 전무하다. R&D의 경우에는 DAC용에 적합한 막소재 및 막모듈에 대한 개발은 한양대학교에서 일부 진행되어져 왔다(Yoo and Park, 2020). 한양대학교에서 개발된 DAC 시스템은 개발한 DAC 분리막포집 시스템을 적용하여 실내에서 포집된 이산화탄소를 스마트팜에 적용하는 파일럿 규모의 실험을 국내 최초로 보고하였다(Yoo et al., 2023).[7]

미국의 경우, 에너지부(DOE, Department of Energy)를 중심으로 DAC 허브 구축을 통해 습식 및 건식포집 기술에 대한 다양한 실증 및 사업화가 대규모로 추진되고 있으며, 이 허브에 해외 기업들도 적극적으로 참여하고 있다. 특히 습식포집 기술로 가장 유명한 캐나다의 카본엔지니어링社가 석유화학기업 옥시덴탈社와 함께 텍사스주에서 세계 최대 규모인 연포집량 50만톤 규모의 DAC 습식포집 설비 Stratos를 2025년까지 건설할 예정이며, 이와 별개로 최대 연간 3천만톤까지 포집 가능한 초대형 DAC 기술사업을 추진하는 중에 있다(Jasi, 2023). DAC 건식포집 기술사업은 루이지애나주에서 추진되고 있는데, 건식포집 선도회사인 스위스의 클라임웍스社와 미국 스타트업 에어룸(Heirloom)社가 연합으로 연포집량 1백만톤 규모의 DAC 기술사업(Project Cypress)을 진행할 계획이다(Climeworks, 2024; DOE, 2023). 또한 에너지부의 펀딩을 통해 DAC 분리막포집 기술에 대한 R&D 역시 진행되고 있는데, 민간기업으로는 이노센스(InnoSense)사, 대학으로는 뉴욕주립대(SUNY) 및 델라웨어대학(University of Delaware)이 대표적이다(Alam, 2021; Lin, 2021).

유럽의 경우, DAC 건식포집 기술에 대한 실증 및 사업화가 스위스의 클라임웍스社를 중심으로 활발히 이루어지고 있는데, 특히 동 회사는 아이슬란드에서 현재 운영 중인 설비 기준 세계 최대 규모(연포집량 4천톤)의 건식포집 설비를 운영 중에 있다(Climeworks, 2022). 반면, DAC 습식포집 기술에 대해서는 아직까지 사업이 크게 이루어지지는 않고 있다. 그러나 유럽은 일반 CCS 부문에서 매우 활발히 사업을 진행하고 있는 지역 중 하나로, 관련 기술, 특히 습식포집 기술을 향후 DAC에 접목 시 매우 빠르게 관련 사업을 추진할 수 있을 것으로 기대를 모으고 있다(Bui et al., 2018). 한편, 분리막포집에 대한 연구도 조금씩 진행 중이며, 네덜란드의 카바이온(Carbyon)社가 사업화를 목표로 관련 기술에 대한 개발 및 실증을 추진하고 있다(Carbyon, 2024).

일본의 경우, DAC 기술에 대한 R&D는 일본 정부의 문샷(Moonshot) 프로그램 하에서 추진되고 있으며, 현재

6) 이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 산업기술알키미스트프로젝트사업 연구비 지원에 의한 연구로(2023000762, 도시형 식물공장 CO_2 공급을 위한 소형 Modular DAC 시스템 및 미세조류 이용 청록수소 생산기술 개발), 소형 설비를 2024년에 설치하여 운영하는 것을 목표로 하며, 규모를 확대해 지속적으로 실증하려는 계획을 가지고 있다.

7) 일반 CCS 기술개발에 있어 ㈜에어레인에서 분리막 포집 기술을 성공적으로 실증 및 사업화한 경험이 있으나 현재 개발된 막기반 CCS 기술을 DAC에 적용하기에는 분리막의 투과도 및 선택도가 낮아서 실용적이지 않다.

Table 2. R&D and business trends of DAC technologies

	① Liquid-DAC	② Solid-DAC	③ Membrane-DAC
Korea	- *Posco Holdings* are conducting R&D for BPED - *LowCarbon* made a liquid solvent and commercialized it for a liquid-DAC business.	- Some research, institutites including *KIER* and *KAIST*, are conducting several R&D projects.	- *Airrane* utilizes membrane technologies for CCS projects. - Some institutes, including *Hanyang University* and *KIER*, are conducting R&D projects.
The U.S.	- *Oxy* bought *Carbon Engineering* and is currently building a commercial-scale DAC facilities. - The Department of Energy has commenced large-scale DAC demonstration projects.	- Some start-ups, including *Global Thermostat*, *Heirloom*, and *Avnos*, are demonstrating their technologies.	- *InnoSense*, *SUNY*, and the *University of Delaware* are conducting membrane DAC projects supported by the Department of Energy.
E.U.	- Many countries already have the technology and experience for CCS, which can also be utilized for DAC.	- *Climeworks* runs a DAC business on a commercial scale.	- Some demonstration projects are being conducted. - *Carbyon*, a Dutch company, is developing a fiber membrane for DAC.
Japan	- *Nagoya University* is conducting a project to capture CO_2 and convert it to dry ice.	- *Kanazawa University* and *Tohoku University* are conducting DAC and utilization projects.	- *Kyushu University* is conducting an R&D project under the Moonshot Program.

Source: Arranged by the authors.

7개의 연구과제가 진행되고 있다(NEDO, 2022). 이러한 국가별 동향을 정리해보면 Table 2와 같다.

2.2. RCC 기술

다음은 공기 중 이산화탄소의 동시 포집·전환(RCC, Reactive Capture and Conversion) 기술이다. 이는 포집된 이산화탄소를 탈착·분리·압축공정 없이 유용물질(합성가스, 유기화합물 등)로 전환하는 기술이다. 이러한 RCC 기술은 동시 포집·전환을 하며 온실가스를 유용한 제품으로 전환하여 이산화탄소 배출을 완화하고 대기에서 이산화탄소를 제거하는데 점점 더 중요해지고 있으며, 순환 탄소경제에 기여할 수 있는 잠재력을 가진 핵심 초점 분야로 그 중요성이 더욱 강조되고 있다(Freyman et al., 2023).

RCC 공정은 변환 메커니즘에 따라 3가지로 구분될 수 있다. 첫째, 전기화학적 방법에서는 이산화탄소를 포집하는 포집물질, 이산화탄소 선택성 막, 압력, 전극 등이 이산화탄소 전환에 영향을 주는 변수가 될 수 있다. 둘째, 열적 RCC 공정에서는 이산화탄소 흡착제 또는 용매를 사용하여 이산화탄소를 포집한 후 촉매 부위가 있는 상태에서 기체 또는 액체상의 공반응물(Co-reactant)에 노출시켜 이산화탄소를 전환하는 방법으로, 촉매 역할을 하는 물질이나 이중 기능 재료, 공반응물의 영향을 크게 받는다. 셋째, 생물학적 RCC 공정에서는 메탄 생성균이나 초산 생성균과 같은 선택적 미생물을 활용하는 방법으로 미생물의 활성이나 밀도에 크게 영향을 받는다(Freyman et al., 2023). 이를 정리하면 다음 Table 3과 같다.

현재 RCC 분야는 전세계적으로 연구실 규모(Lab scale) 혹은 벤치 스케일(Bench scale) 수준(TRL 3 이하)의 기초연구 단계에서의 기술개발이 진행되고 있는 것으로 나타났다. 대기 중의 CO_2를 흡수한 후 분리-정체-압축-과정을 통해 연료 등의 고부가가치 화합물로 전환하는 DAC-CCU 연계 공정에 국한하여 준상용화 규모 운전 실증 사례가 보고되고 있으나(Carbon Engineering, 2017), 흡수한 CO_2를 탈거 공정 없이 곧바로 전환하는 RCC 공정개발의 경우 상용화 사례가 발견되고 있지 않다. 파일럿 규모로 한정해서 살펴봤을 때 2021년 서스테온(Susteon)社에서 콜롬비아 대학과 함께 이중기능재료(DFMs, Dual-Function Materials)을 이용하여 대기 중의 CO_2 흡착과 수소화 반응을 동시에 진행, 50 kg/day 수준의 메탄을 제조하는 실증 운전에 성공한 사례가 보고되었다(Susteon, 2021). 국내의 경우 DAC 로우카본에서 실시

Table 3. Overview of RCC technologies

RCC methods	Reactive CO_2 capture material	CO_2 concentration	Balance gas	Co-reactant	Processing mode	Temperature (℃)	Pressure (atm)	Product
Electro chemical	Molten salts	air		Electrons	Batch	650–900	1	Structured carbon
		9.7%–100%	0%–90% Ar					
	Bicarbonate electrolyzer	3.0 M bicarbonate solution	-	H_2O + electrons	Continuous	20-70	1-4	CO
								CH_4
		100%	-		Continuous	25	1	Syngas
		10%	90% N_2		Continuous	25	1	C1-C2 products
	Amine	100%	-	H_2O + electrons	Continuous	60	1	CO
	Ionic liquid	100%	-	H_2O + electrons	Continuous	22-60	1	CO
Thermal	Amine	408 ppm	80% N_2, 20% O_2	H_2	Batch	25-145	1–79	Methanol, Formate
		100%	-					
	Hydroxide	air		H_2 + ethylene glycol	Batch	25-140	1–69	Methanol, Formate
		100%	-	H_2				
	Polymers	100%	-	epoxide	Batch	100-120	1-30	Cyclic carbonate
	MOF	15%	85% N_2	epoxide	Batch	45-80	1-20	Cyclic carbonate
		100%	-					
	Metal on oxide	10%-100%	0%–90% N_2	H_2 C_2H_6 CH_4	Continuous cyclic	300-650	1	CH_4, Syngas
		6%	30% H_2 6% N_2					
		8%-10%	0%-21% H_2O 90%-71% air					
		7.5%	4.5% O_2 15% H_2O 73% N_2					
	Molten salt	10%	90% Ar	C_2H_6	Continuous cyclic	770	1	CO
	Ionic liquid	100%	-	epoxide	Batch	130	14.8	Cyclic carbonate
Biological	Methanogens	10%-100%	0%–90% N_2	H_2	Continuous	30-55	1	CH_4
		20%-25%	75%-80% H_2					
	Acetogens	20%-100%	0%-80% H_2	H_2	Semi batch	30-37	1	Acetate
	Hydrogen-oxidizing bacteria	11.5%	H_2	H_2	Semi batch	37	1	fatty acids
		5%	80% H_2 15% O_2			37	1	Acetoin
		Coal-fired power plant exhaust gas				30	1	Lycopene
		10%	60% H_2 2% O_2 28% N_2			30	3.9	Isopropanol
		100%	-			30	1	Sucrose, PHAs (Polyhydroxyalkanoates), LCO (Lipochitooligosacchardes)

Source: Arranged by the authors based on Freyman et al. (2023).

간으로 이산화탄소를 포집하여 탄산광물화로 전환할 수 있는 습식 전환제인 KLC를 독자적으로 개발하고 지역 생태공원 내 보도블록 제조에 적용하는 등 국내 실증 경험을 보유하고 있다(LowCarbon, 2023).

한편 R&D 분야에서는 북미 지역을 중심으로 국립 연구소들이 연합하여 공동연구를 수행 중에 있다. 미국의 경우 해당 분야에서의 원천기술 확보를 위해 미국에너지부(DOE) 산하 ARPA-E(Advanced Research Projects Agency-Energy)의 RCC 프로그램을 운영하고 있다. 해당 R&D 프로그램에는 미국 국립재생에너지연구소(NREL), 로렌스 리버모어 국립연구소(LLNL), 국립에너지기술연구소(NETL) 등의 국립 연구소들이 조인트 랩(Joint-lab) 형태로 참여하고 있으며, 상시적으로 RCC 기술동향 정보 공유 및 미래 기술개발 방향 설정을 위한 워크숍를 개최하는 등 연구소 간 융합연구를 추진하고 있다(DOE, 2021). 연구소 별 기술개발 동향을 살펴보면 퍼시픽 노스웨스트 국립연구소(PNNL, Pacific Northwest National Laboratory)의 경우 용매를 이용하여 이산화탄소를 실시간으로 포집하고 메탄올, 메탄 및 건축자재로의 전환을 고려한 이산화탄소 포집-전환 통합 프로세스를 제안하였으며(Heldebrant et al., 2022), 오크리지 국립연구소(ORNL, Oak Ridge National Lab)에서는 포집된 이산화탄소를 포름산(Formic acid)과 같은 RCC용 폴리머 원료로 전환하는 연구를 추진하고 있다(Kidder, 2022). 북미 지역 이외에도 RCC 기술개발 사례가 보고되고 있는데, 대표적으로 네덜란드 델프트 공대 연구팀이 이산화탄소 포집과 전기화학적 이산화탄소 동시 전환의 에너지 절감 경로를 제시한 연구 사례가 있다(Sullivan et al., 2021). 국내에서는 한국과학기술연구원(KIST) 연구팀이 막 전극 조립체(MEA, Membrane electrode assembly) 기술과 니켈 단원자 촉매를 활용하여 배기가스 수준의 저농도(10%) 이산화탄소를 93%의 일산화탄소로 전환하는데 성공한 사례가 있다(Kim et al., 2021). 또한 해당 연구팀은 아민계 액상 흡수제에 포집된 이산화탄소를 전기화학적인 방법을 이용하여 합성가스(수소+일산화탄소)로 직접 전환하는 기술을 개발하여 보고하기도 했다(Langie et al., 2022). 최근에는 국가 주도로 과학기술정보통신부의 ‘DACU 원천기술 개발사업’과 산업통상자원부의 ‘알키미스트 프로젝트’를 통해 RCC 원천기술 확보 및 조기 상용화를 위한 도전혁신형 R&D를 추진하고 있다.

2.3. 연구배경

앞서 살펴본 바와 같이 탄소중립 달성의 필요성이 커짐에 따라 전 세계적으로 DAC 및 RCC 기술에 대하여 R&D, 실증 및 사업화가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 세계적 흐름 하에서 우리나라 역시도 관련 기술 개발 및 사업화가 최근에 시작되었으나, 아직 초기 단계로 DAC 및 RCC 기술 및 유관 사업에 대한 체계적인 육성 정책 및 마일스톤이 부재한 상황이다. 동 분야의 연구개발 및 사업육성 전략을 도출하기 위해서는 먼저 우리나라의 해당 분야 기술수준에 대한 정확하고 구체적인 정보를 획득하는 것이 선행될 필요가 있다.

이러한 배경에서 과학기술 R&D의 정책방향과 전략을 수립하기 위한 사전조사연구로서 통상적으로 기술수준평가를 실시한다. 기술수준평가는 현재 보유하고 있는 기술이 글로벌 선진국 혹은 선진 연구기관과 비교하여 상대적으로 어떤 수준에 위치하고 있는지를 먼저 파악하고 기술격차, 격차요인 및 추격을 위한 필요조건 등을 알 수 있게 해줌으로써 정책수립 과정에서 중요한 기초자료를 제공할 수 있다는 점에서 의의를 갖는다(Han et al., 2010). 국내외 다양한 기관에서 R&D 육성 전략을 수립하기 위한 기초분석 작업으로 기술수준평가를 실시하고 있으며, 국내의 경우 과학기술기본법에 의거하여 한국과학기술기획평가원(KISTEP)에서 실시하는 ‘기술수준평가’와 산업기술기획평가원(KEIT)에서 실시하는 ‘산업기술수준평가’, 정보통신기획평가원의 ‘ICT 기술수준조사’, 국방기술진흥연구소의 ‘국방전략기술 수준조사’, 국가녹색기술연구소의 ‘2020 기후기술 수준조사’ 등이 있다. 상기 서술한 기술수준평가 사례들을 살펴보면 기술수준을 정량적으로 표현하기 위해 델파이를 비롯한 전문가 대상 설문조사의 정성평가 방식과 논문 및 특허와 같은 학술정보 데이터를 계량화하여 분석하는 정량평가 방식을 혼용하고 있다(IITP, 2024; KEIT, 2022; KISTEP, 2024; KRIT, 2023; NIGT, 2020).

다양한 기술수준평가 방식들 중에서도 델파이 방법은 전문가들의 의견 및 예측 등의 정성적 판단을 계량화할 수 있어 불확실한 신규기술의 미래 예측에 특히 유용하게 활용될 수 있다는 특징이 있다(Aichholzer, 2009, p. 253). 또한 델파이 방법은 표본크기가 작더라도 전문가 의견 수렴을 통해 신뢰성 있는 결과를 낼 수 있어(Aichholzer, 2009, p. 252), 단순히 논문이나 특허 등의 정량적 데이터가 부족한 경우 뿐만 아니라 아직 전문가의 수가 많지 않은 개발

초기 단계의 신규기술 수준 평가에 특히 적절하다 할 수 있다. 적절한 표본크기에 대해서는 표준적인 이론이 존재하지 않으나(Akins et al., 2005; Keeney et al., 2006; Lee et al., 2022, p. 19), 5인 이상의 전문가를 대상으로 2회 이상의 설문만으로도 충분하다는 연구 결과가 존재한다(Lee et al., 2002, p. 19; Rowe and Wright, 2001, p. 125).

이러한 기술수준평가는 정량적으로 평가되는 기술성숙도(TRL, technology readiness level)와는 시사하는 바가 다르다. TRL은 기술의 성숙도를 원천연구 단계부터 상용화 완료 단계까지 9단계로 나누도록 표준화되어 있는 평가체계로, 1970년대에 미항공우주국(NASA, National Aeronautics and Space Administration)에서 개발된 이래로 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 기술수준 측정 도구이다(Manning, 2023). 그러나 이는 다양한 기술에 대하여 범용적으로 사용하기 위해 개발된 것이기에, 각 기술의 독특한 특성을 반영하지는 못한다(Sauser et al., 2006). DAC 기술의 경우, 기존의 CCUS 기술에서 활용되었던 탄소포집 기술을 응용하는 것이기에 그 기본이 되는 기술에 대하여 이미 효과가 검증되었다는 시각이 존재한다는 점과, 기후변화의 시급성으로 인해 신속하게 활용되어야 한다는 배경으로 인해, 실험실 규모의 실증(TRL 4단계) 혹은 소규모 파일럿 실증(TRL 5 ~ 6단계) 이후에 즉시 상용화(TRL 9단계)되는 경우도 관찰된다.[8] 또한 TRL 평가체계상 같은 단계로 구분되더라도 그 안에서도 기술수준의 차이가 존재할 수도 있으나, 이는 TRL만으로는 표현이 어렵다는 한계도 존재한다.

따라서 동 연구에서는 신기술인 DAC 및 RCC 기술을 대상으로 기술수준을 평가하고자 하는 바, TRL 대신 정성적인 접근법으로 전문가들의 의견을 다루는 델파이 방법론을 활용하여 해당 기술에 대한 선도국이 어디인지를 파악하고, 이 선도국을 기준으로 할 때 우리나라의 기술수준이 어느 정도인지를 도출하고자 한다. 이러한 델파이 방법론 기반의 상대적 기술수준 평가는 TRL을 통해 기술의 절대적 개발 단계를 표현하는 것보다 우리나라 보유기술의 상대적 수준을 보여주는 데 효과적이며, 선도국의 사례를 벤치마킹하여 기술수준 향상을 도모하는 데에 활용될 수 있다. 이는 향후 우리나라의 R&D 및 사업화 정책 방향 설정에 기여할 수 있을 것이다.

3. 분석틀

동 연구에서는 우리나라의 DAC 기술과 RCC 기술에 대한 현재 및 향후 기술 수준을 분석하기 위해 델파이 방법론을 활용하고자 한다. 델파이 방법론은 “객관적인 사실”보다는 주관적인 평가나 예측 등의 “의견”을 다루는 수단이다(Schmidt, 1997, p. 764). 동 방법론을 간단히 설명하면, 특정 이슈에 대해 중요한 질문들을 준비하고, 일련의 전문가들을 대상으로 이 질문에 대한 인터뷰 또는 설문조사를 진행하며, 전문가들이 각자 주관적인 판단에 근거한 답을 내리고, 이 판단들을 종합하여 합의에 이른 결과물을 도출하는 방법론이다(Lilja et al., 2011, p. 1004). 이 결과물은 한 사람 이상의 그룹이 특정 이슈/문제에 대해 도출한 결과이므로 한 사람 또는 개별이 도출한 결과보다 더 좋은 결과물이라고 보는데, 여기에는 과정적인 측면의 이득(process gain)이 전제되어 있다(Rowe et al., 1991). 물론, 델파이 방법론은 다수 응답자를 대상으로 한 일반적인 설문조사(survey)와 차별화되는데, 이는 조사 대상이 해당 분야의 전문가들이며, 또한 전문가들이 의견을 내고 합의에 이르는 상호작용이 통제 또는 구조화되기 때문이다. 그룹 커뮤니케이션을 구조화하는 데에는 델파이 방법론을 적용하는 데에 4가지 특징이 있는데 첫째, 전문가들 간의 상호 익명성(anonymity), 둘째, 판단을 내리는 과정의 반복(iteration), 셋째, 다른 전문가들의 판단 결과를 공유/제시하는 통제된 피드백, 그리고 넷째 전문가들의 종합 의견을 최종적으로 중간값(median)이라는 통계적 수치로 표현하는 것이다(Rowe et al., 1991, p. 237). 델파이 방법론은 어려운 이슈/문제에 대한 데이터, 지식, 그리고 경험 정보를 수집할 수 있을 뿐만 아니라 향후 미래에 대한 생각과 의견을 모을 수 있다는 점에서 강점이 있다(Lilja et al., 2011, p. 1011).

동 연구에서는 우리나라 기술을 다른 선진국들과 비교하기 위해서는 기술 수준에 대한 순위(ranking)를 매기는 것이 필요하다. 이러한 순위 유형의 델파이 방법론에 대해서 주관적인 데이터를 수집 및 분석하는 과정과 적절한 전문가 설정 과정을 체계화한 Okoli and Pawlowski(2004)를 토대로 방법론을 설정하고자 한다.[9] 이는 총 4단계로 구성되며, 구체적인 절차와 이를 적용한 방법론은 다음과

8) 스위스 클라임웍스社는 자국 내에서의 소규모 실증 후에 즉시 연포집량 4천톤 규모의 상용 설비를 아이슬란드에 건설하여 사업을 진행하고 있다. 캐나다 카본엔지니어링社도 본사 부지 내에서 일포집량 1톤 및 2.5톤 규모의 소규모 실증 이후 즉시 연포집량 50만톤 규모의 대형 상용 DAC 설비를 건설하는 중에 있다.

9) Okoli and Pawlowski (2004)의 데이터 수집 및 분석 체계는 Schmidt (1997)에 기반을 두고 있다.

같다.

첫 번째 단계는 질문지를 설계하는 것이다. 이 과정에서 먼저 DAC 기술과 RCC 기술이 무엇이며 어떠한 기술 옵션들이 있는지에 대한 기반 자료를 작성하였다. 이 기반 자료는 델파이 조사를 위한 전문가 설문과정에 전문가들이 쟁점 사항에 대한 전문가 판단에 참고 자료로 활용되기 위함이다. 먼저, DAC 기술의 경우, i) 습식포집(L-DAC) 기술, ii) 건식포집(S-DAC) 기술, iii) 분리막 포집(m-DAC) 기술로 세부 기술을 구분하고, 각 세부 기술에 대해서 i) 기술의 정의 및 특성, ii) 기술의 종류 및 공정 방법, iii) 국외 사업화 및 R&D 현황, 그리고 iv) 국내 사업화 및 R&D 현황을 정리하였다. 다음으로, RCC 기술의 경우, 이 자체가 세부기술로서, 보다 구체적으로 설명하면 RCC 공정 설계 및 구축 기술이다. 동 기술에 대해서 i) 기술의 정의 및 특성(특히, 활용가치), ii) 기술의 종류 및 제조 방법, iii) 국외 사업화 및 R&D 현황, 그리고 iv) 국내 사업화 및 R&D 현황을 정리하였다.

다음으로, 델파이 조사를 위한 조사 대상 국가를 선정하였다. 동 연구에서는 세부기술에 대해서 5대 주요국인 i) 한국, ii) 미국, iii) 유럽연합, iv) 일본, 그리고 v) 기타 국가들을 대상으로 기술수준을 평가하고자 설정하였다. 여기서, 기타 국가의 경우, 전문가의 판단에 따라 중국 등의 국가를 추가적으로 선택하여 기술수준에 대해 평가할 수 있도록 하였다.

델파이 조사를 위한 질문에 대해서는 크게 세 가지 질문을 설정하였는데, 최고기술 보유국을 기준점으로 하여 기술수준(%), 기술격차(연), 그리고 기술수준 그룹을 설정해줄 것을 요청하는 것이다. 여기서 기술수준은 최고기술 보유국(1위 국가)의 기술수준(100%) 대비 상대적 기술수준으로 현재까지 달성한 과학기술적 성과와 창출된 지식의 효용 및 효과 뿐 아니라 해당 과학기술과 관련된 물적 인적 능력의 역량을 포괄하는 것이다. 기술격차(년)는 최고기술 보유국의 현재 기술수준에 도달하는데 소요될 것으로 예측되는 기간을 의미한다. 그리고 기술수준 그룹은 i) 선도그룹(기술분야를 선도하고 있는 그룹), ii) 추격그룹(선진기술의 모방개량이 가능한 그룹), iii) 후발그룹(선진기술의 도입적용이 가능한 그룹), 그리고 iv) 낙후그룹(연구개발 능력이 취약한 그룹)으로 설정하였다. 다음 질문은 기술수준을 판단한 근거를 국가별로 작성해줄 것을 요청하는 것이다. 그리고 마지막 질문은 한국의 해당 분야 기술에 대한 글로벌 기술경쟁력 제고를 위해 가장 시급한 것이 무엇이라고 생각하며, 기술수준 향상 옵션으로 i) R&D 투자 측면, ii) 국제협력 측면, 그리고 iii) 법/제도 측면을 제시하고, 이 각각에 대해서 작성해 줄 것을 요청하는 것이다. 따라서 첫 질문에 대하 답은 정량적 수치가 도출되고, 두 번째와 세 번째 질문에 대한 답은 정성적 내용으로 도출된다.

두 번째 단계는 적절한 전문가 그룹을 선택 및 구성하는 것이다. 먼저 해당 기술 분야의 전문가들을 파악하는 것이다. 보통 전문가 그룹은 대학, 연구소, 민간섹터, 그리고 정부 섹터를 중심으로 균형적으로 접근한다. DAC 기술 및 RCC 기술 모두 우리나라에서 이제 원천 R&D 연구가 시작되는 단계이고 신생기술인 바, 우선적으로 정부 섹터는 배제하였고, 또한, 이 분야의 전문가가 많지 않다는 점을 고려하였다. 먼저, 대기중에서 탄소를 포집하는 DAC 기술에 대해서는 신생기술인 바, R&D를 추진하는 대학, 연구소, 그리고 민간 섹터를 대상으로 전문가를 찾고자 하였다. 그런데 DAC 기술에 대한 원천 R&D 연구과제가 2023년 시작된 바, 동 연구과제를 주도적으로 추진하는 연구기관(한국에너지기술연구원)에서 직접적으로 R&D에 참여하고 있는 전문가를 포함할 경우 설문결과가 우리나라에 너무 긍정적으로 편향될 수 있다는 가능성을 고려하여, 동 연구기관의 전문가들은 배제하였다. 보다 명확히는 DAC 습식 및 건식포집 기술에 대하여는 각각 5명의 전문가가, 그리고 DAC 분리막포집은 4명의 전문가가 델파이 설문조사에 참여하였다. 다음으로, RCC 기술에 대해서는 앞서 언급된 바와 같이 동 연구과제를 주도적으로 추진하는 연구기관(한국과학기술원과 한국에너지기술연구원)의 전문가들을 배제하고, 민간 2인과 정부출연연구소 1인으로 총 3인을 설정하였다.

델파이 방법론 차원에서 통계적으로 의미있는 결과를 위해 필요한 전문가 그룹의 샘플 규모는 일반적으로 10인에서 18인이다(Okoli and Pawlowski, p.19). 그런데, DAC 기술과 RCC 분야 기술에 대한 기술수준 평가에 대해서는, 일차적으로 다양한 전문가들이 많지 않고, 유사분야의 전문가들을 대상으로 확대하여 사전 접촉 및 기술평가에 대한 사전 논의를 실시한 결과 기술평가가 어려울 것 같다고 전문가가 자체판단하여 의뢰를 거절하거나 또는 의뢰한 연구진이 의미있는 결과를 도출하기 어렵다고 판단하여, 핵심 전문가들로만 패널을 구성하였다.

세 번째 단계는 전문가들을 대상으로 설문조사를 실시하는 것이다. 여기서 중요한 것은 설문 대상자들은 서로 알지 못하는 상태에서 진행된다는 점이다. 다음으로 델파이 조사 차원의 설문조사의 반복 횟수와 관련하여, 이 반

Table 4. Procedure and application of Delphi method

Procedure of delphi method		⇨	Application
Step 1	**Design the questionnaire**		- **Formulation of reference materials for DAC and RCC technologies** · DAC: i) L-DAC, ii) S-DAC, iii) M-DAC · RCC - **Formulation of three questions**: (i) Technology level, (ii) Basis for judgment, (iii) Policy options to enhance technological competitiveness - **Setting countries for comparison** : i) Korea, ii) the US, iii) the EU, iv) Japan, v) Any possible country
Step 2	**Selection of appropriate group of experts** - Experts identification - Expert group size determination		- **Expert identification for DAC and RCC technologies respectively** - **Sample size determination through expert contact and pre-test discussion**
Step 3	**Administration of survey (Iteration of survey)**		- **Iteration**: Two successive rounds of survey on the basis of comparison of mean rankings
	- 1st survey - Interpretation of individual responses - Mean value		- **1st survey** - **(Question ①)** Average value calculation - **(Question ②&③)** Interpretation
	- 2nd survey - Interpretation of individual responses - Mean value		- **2nd survey** - **(Question ①)** Average value calculation - **(Question ②&③)** Interpretation
	- Comparison of mean value		- **Finalization of survey** with not much difference in average values
Step 4	**Formulation of consensus & Interpretation of consensus results**		**Interpretation and summary of consensus results**

Source: Formulated by the authors on the basis of Okoli and Pawlowski (2004)

복을 멈추는 데에 크게 보통 3가지 요건이 있다. 하나는, 일치성에 만족스러운 수준을 나타내는 W가 0.7 값에 도달하면 멈추는 것이다. 다른 하나는 조사에 참여하는 전문가들이 합의에 이를 때까지 반복하는 것이다. 마지막 하나는 두 번에 걸친 조사 시 그 중간값이 크게 차이가 없다면 두 번에 멈추는 것이다(Okoli and Pawlowski, 2004, p. 26). 동 연구는 마지막 요건에 기반해서 연구를 진행하였다.

이에 1차 델파이 조사에서는 첫 번째 질문에서 기술수준(%)과 기술격차(년)은 정량수치로 도출되는 바, 각 개별 전문가가 도출한 값을 중심으로 평균값을 도출하고, 이 값을 토대로 순위를 설정하였다. 그리고 동 조사의 통계적 의미 즉 타당도를 검증하기 위해 평균, 표준편차, 중위수(median), 사분위 범위 등을 도출하고, 이를 토대로'합의도(consensus)'를 계산하였다. 합의도는 전체 응답을 오름차순으로 정렬하였을 때, 3사분위수(Q_3)와 1사분위수(Q_1)가 중위수(Median)에 얼마나 근접하였는지를 나타내

$$Consensus = 1 - \frac{Q_3 - Q_1}{Median}$$

Q_3: Third quartile (75%) when expert responses are sorted in ascending order

Q_1: First quartile (25%) when expert responses are sorted in ascending order

Median: Median (50%) when expert responses are sorted in ascending order

(1)

는 수치로, 이를 계산하는 과정은 식 (1)과 같이 계산한다 (Kim et al., 2022, p. 259).

일반적으로 합의도는 0.75 이상으로 1에 가까워야 의견이 합의된 것으로 판단하며(Kim et al., 2022, p. 259), 본 연구에서도 전문가 응답 간의 합의도가 동 기준을 만족하도록 델파이 분석을 반복하는 것을 목표로 하였다. 그러나, DAC 및 RCC 기술이 비교적 신기술이라 참여 가능한 전문가의 수가 적고, 신기술의 불확실성을 고려하여, 국가별 기술수준에 대한 경향을 충분히 확인할 수 있을 때에는 합의도가 0.75보다 낮은 경우도 제한적으로 허용하였다.

합의도 조건이 충족되지 못한 경우, 델파이 조사를 재차 진행하였다. 이때에는 직전 델파이 조사 결과를 정리하여 전문가들에게 배포하고, 이를 토대로 다시 동일한 질문에 대한 답을 요청하였다. 본 기술수준평가의 경우 정량적 답이 도출되는 첫 번째 질문에 대해서 1차 조사와 2차 조사 간의 결과가 많이 차이가 나지 않게 된 바, 여기에서 조사를 종료하는 것으로 결정하였다. 대신, 두 번째 및 세 번째 질문에 대한 답에 대해서 전문가들이 보다 구체적인 의견을 제시하거나 내용을 수정한 것을 토대로, 2차 델파이 조사 값을 중심으로 최종 분석 결과를 도출하고자 하였다.

마지막 네 번째 단계에서는 전문가들이 합의를 이룬 델파이 조사 결과 값을 토대로, 현재 우리나라 기술수준을 정리하고, 향후 우리나라 기술수준 향상에 필요한 정책적 방향을 도출하고자 하였다.

앞서 언급된 델파이 방법론을 적용한 조사 및 분석과정과 이를 적용한 내용은 Table 4와 같이 정리된다. 다음 섹션에서는 이 델파이 방법론을 통해서 도출된 분석 결과를 설명하고자 한다.

4. 분석 결과

델파이 분석 방법을 활용하여 두 가지 기술군에 대해 수행한 기술수준 평가가 실시되었다. 먼저, DAC 기술에 대해서는 i) DAC 습식포집(L-DAC), ii) DAC 건식포집(S-DAC), 그리고 iii) DAC 분리막 포집(m-DAC)을 중심으로 기술수준 평가가 실시되었다. 그리고 DAC 기술과 활용/전환 기술을 통합한 RCC 기술에 대해서는 별도의 기술수준 평가를 실시하였고 이는 다음과 같이 정리될 수 있다.

4.1. DAC 기술

4.1.1. 습식포집 기술의 기술수준 평가

DAC 습식포집(L-DAC) 기술에 대한 조사 결과를 살펴보면, 5인의 전문가 모두 우리나라와 미국, EU, 일본의 기술수준에 대하여 응답해 주었으며, 그 중 3인의 전문가는 중국에 대하여, 1인의 전문가는 캐나다에 대하여 추가적으로 기술수준을 평가해주었다. 2차까지 델파이 조사를 시행한 결과, 분석틀에서 설정한 식 (1)에 따른 합의도 조건이 부합하게 되었다.

최고기술 보유국에 대한 평가 결과를 살펴보면, Table 5에서와 같이 5인의 전문가 모두 미국을 습식포집 기술에 대한 선도국으로 선정하였으며, 평가대상 국가에 캐나다를 포함한 전문가 1인을 제외하면 미국을 최고기술 보유국(기술수준 100%)으로 평가하였다. 캐나다를 포함한 전문가 역시 미국의 기술수준에 대하여 95%라는 매우 높은 평가를 제시하였으나, 최고기술 보유국으로는 캐나다를 선정하였다. 5인의 전문가는 최고기술 보유국으로 미국 혹은 캐나다를 선정하였는데 그 이유는 공통적으로 미국과 캐나다가 습식포집에 대하여 전 세계적으로 가장 먼저 실증사업을 수행했으며 또한 동 기술을 활용하기 위한 사

Table 5. Delphi survey results for Liquid-DAC

Expert	Korea			The US			EU			Japan			Other		
	Level (%)	Gap (yr)	Group*	Level (%)	Gap (yr)	Group*	Level (%)	Gap (yr)	Group*	Level (%)	Gap (yr)	Group*	Level (%)	Gap (yr)	Group*
(1)	70	4	B	100	0	A	85	2	B	55	5	B	n.a.		
(2)	55	7	C	100	0	A	85	2	A	80	2.5	B	China		
													50	7	C
(3)	75	3	B	100	0	A	95	1	A	80	2	B	China		
													70	4	B
(4)	70	10	C	95	1	A	80	3	B	63	15	C	Canada		
													100	0	A
(5)	85	5	B	100	0	A	90	2	A	85	5	B	중국		
													75	10	C

Source: Formulated by the authors.

* For the group, A is for the leading countries; B, the following countries; and C, the lagging countries.

업을 지속적으로 추진하고 있기 때문이다. 특히, 캐나다 브리티시컬럼비아주의 스쿼미시(Squamish)에 본사 및 실증연구설비를 둔 기업인 카본엔지니어링(Carbon Engineering)社는 현재 미국에서 전세계적으로 가장 대규모 사업을 추진하고 있다. 2023년 미국 정유회사 옥시덴탈(Occidental 혹은 Oxy)社에서 카본엔지니어링社를 인수하였기에 현재는 미국 기업으로도 볼 수 있다.

습식포집에 대한 최고기술 보유국 대비 우리나라의 기술수준에 대하여 모든 전문가들은 최소 55%에서 최고 85%의 기술수준을 제시하였다. 이렇게 평가한 근거를 살펴보면, 우리나라 기업인 ㈜로우카본에서 DAC 기술을 상용화하였으나 이는 무기탄산염을 만드는 기술로 활용이 제한적이며 아직 전과정평가(LCA, life-cycle assessment) 및 이에 대한 인증이 진행되지 않아 이산화탄소 제거량에 대한 산정이 추가적으로 필요하다는 이유가 주요하였다. 또한 우리나라에서 포스코홀딩스㈜ 등에서 습식포집에 대한 R&D가 진행되고 있으며 소규모 실증이 추진되고 있으나 아직은 실험실 수준에 머물러 있다는 점 역시 고려가 되었다. 한편, 우리나라는 화력발전소의 배가스를 대상으로 습식 포집제를 활용하여 이산화탄소를 포집하는 기술이 이미 실증 되었기 때문에 DAC 습식포집 기술 역시 신속하게 개발할 수 있다는 의견 역시 제시되었다.

다음으로는 평가 결과를 보정하는 과정을 거쳤다. 보정 작업은 i) 분석 제외 국가 선정, ii) 최고기술 보유국의 기술수준을 100%로 하는 기술수준 상대화, iii) 최고기술 보유국을 기준으로 하는 기술격차 조정의 3단계의 절차를 통해 이루어졌다. 먼저 분석 제외 국가를 선정하기 위하여, 3인 이상의 전문가로부터 응답이 이루어지지 않은 국가를 분석 대상에서 제외하였다. 또한 기술을 보유한 주체가 여러 국가에서 사업할 경우, 동 기업이 사업하는 국가들의 기술수준이 모두 비슷하게 평가될 수 있다. 이처럼 상이한 국가이더라도 사실상 동일한 기술 주체로 인해 평가가 이루어졌을 경우 해당 국가들을 하나의 국가 항목으로 통합하는 작업 역시 함께 이루어졌다. 다음으로, 본 델파이 분석에서는 최고기술 보유국의 기술수준을 100%로 정의하였기에, 이러한 정의에 부합하도록 보정하는 작업을 진행하였다. 기술수준평가에 참여한 전문가들이 모두 동일한 국가를 최고기술 보유국으로 선정하였다면 자연스럽게 동 최고기술 보유국의 기술수준 평균이 100%가 되겠지만, 마지막 델파이 설문 결과까지 일부 상이한 의견이 존재할 경우 최고기술 보유국의 기술수준 평균이 100%가 되지 않을 수도 있다. 이 경우 최종적으로 도출된 기술수준에서 최고기술 보유국의 기술수준을 100%로 설정하고, 그 외 국가들의 수준을 최고기술 보유국 기술수준으로부터의 상댓값으로 수정하였다. 마지막으로 기술격차의 보정절차를 거쳤는데, 최고기술 보유국의 기술격차

평균값을 0으로 만들기 위하여 일정값을 모든 국가의 기술격차 평균값에서 제하였다.

상기 절차를 따라 보정한 결과, Table 6과 같이 습식포집에 대한 각국의 기술수준이 도출되었다. 캐나다의 경우 1인의 전문가만 답변하였는데, 이는 캐나다에 본사가 있는 카본엔지니어링社이 실질적인 사업을 주로 미국에서 하고 있기 때문이다. 이러한 점을 고려하여, 미국과 캐나다를 같은 국가단위로 통합하는 것이 합리적이라고 판단하여, 미국과 캐나다 중 각 전문가들이 높게 평가한 수치를 최종적으로 적용하였다. 아울러 3인의 전문가만 응답한 중국에 대하여는 응답한 전문가들만을 모집단으로 설정하여 최종 기술수준을 도출하였다. 또한 기술수준 평균값은 1의 자리로 반올림하였으며, 기술격차의 평균값은 소수점 첫째 자리로, 표준편차 및 합의도는 소수점 둘째 자리로 반올림하였다.

그 결과, 최종적으로 미국/캐나다가 최고기술 보유국으로 평가되었다. 이를 기준으로 우리나라는 추격그룹으로, 최고기술 보유국 대비 71%의 기술을 보유하였고, 최고기술 보유국과의 기술격차는 5.8년인 것으로 분석되었다. 이외 EU, 일본, 중국은 각각 87%, 73%, 65%의 기술수준을 보유하였으며, 각각 2.0년, 5.9년, 7.0년의 기술격차가 존재하는 것으로 분석되었다. 2차 델파이 분석까지

Table 6. Technology level evaluation results for Liquid-DAC

Country	Group position	Relative technology level				Technology gap	
		Average (%)	Std. Dev.	Rank	Consensus	Average (yr)	Std. Dev.
Korea	Following	71	10.84	4	0.93	5.8	2.77
U.S. & Canada	Leading	100	0.00	1	1.00	0	0
E.U.	Following	87	5.70	2	0.94	2.0	0.71
Japan	Following	73	12.90	3	0.79	5.9	5.27
China	Lagging	65	13.23	5	0.82	7.0	3.00

Source: Formulated by the authors.

Table 7. Delphi survey results for Solid-DAC

Expert	Korea			The US			EU			Japan			Other		
	Level (%)	Gap (yr)	Group*	Level (%)	Gap (yr)	Group*	Level (%)	Gap (yr)	Group*	Level (%)	Gap (yr)	Group*	Level (%)	Gap (yr)	Group*
(1)	70	4	B	100	0	A	100	0	A	70	5	B	*n.a.*		
(2)	80	2.5	B	97	1.0	A	100	0.0	A	75	4.0	B	China		
													50	7.0	C
(3)	80	2.0	B	100	0.0	A	95	1.0	A	80	2.0	B	China		
													75	2.0	B
(4)	80	10	B	95	1.0	A	100	0.0	A	65	15	C	Canada		
													80.0	3.0	B
(5)	85	5	B	100	0	A	100	0	A	85	5	B	China		
													80	8	C

Source: Formulated by the authors.

* For the group, A is for the leading countries; B, the following countries; and C, the lagging countries.

Table 8. Technology level evaluation results for Solid-DAC

Country	Group position	Relative technology level				Technology gap	
		Average (%)	Std. Dev.	Rank	Consensus	Average (yr)	Std. Dev.
Korea	Following	80	5.48	3	1.00	3.7	1.67
U.S.	Leading	99	2.30	2	0.97	0.1	0.45
E.U.	Leading	100	2.24	1	1.00	0.0	0.45
Japan	Following	76	7.91	4	0.87	5.7	5.20
China	Lagging	69	16.07	5	0.80	6.3	1.80

Source: Formulated by the authors.

수행한 결과 기술수준에 대한 각 전문가 응답간의 합의도(consensus) 결과값 역시 Table 6에 표기되었으며, 모두 0.75 이상으로, 이는 전문가 간의 합의에 도달한 것으로 볼 수 있다(Lee, 2010). 기술격차에 대하여는 평균과 표준편차까지만 분석하였다. 이는 전문가 의견 편차로 인하여 다소 차이가 발생할 수는 있으나 기술수준과 거의 유사한 순위를 보이기 때문이며, 또한 기술수준에 대한 합의가 이루어지는 것이 본 델파이 분석의 주 목적이었기 때문이다.

4.1.2. 건식포집 기술의 기술수준 평가

DAC 건식포집(S-DAC) 기술에 대한 조사 결과를 살펴보면, 습식포집 기술과 마찬가지로 5인의 전문가 중 3인은 중국에 대하여, 1인은 캐나다에 대하여 추가적으로 응답을 해주었다. Table 7은 이러한 응답 결과를 보여준다. 5인의 전문가는 DAC 건식포집 기술에 대하여 최고기술 보유국을 선정하는 데에 미국과 EU가 모두 높은 점수를 주었다. 이는, 미국의 경우 글로벌써모스탯(Global Thermostat)社, EU의 경우 클라임웍스(Climeworks)社 때문이었다. 두 회사 모두 건식포집 기술로 대규모 기술실증을 성공적으로 수행한 회사라는 점에서 두 국가 모두 선도적인 기술을 보유하였다고 할 수 있다. 다만, 미국의 글로벌써모스탯社가 아직 소규모 실증까지만 완료하였다면, EU의 클라임웍스社는 매년 이산화탄소를 4,000톤 규모로 포집하는 상용 설비를 현재 운영 중에 있으며, 더 큰 규모의 신규 설비를 건설하는 중에 있다는 점에서, 더 많은 전문가들이 최고기술 보유국으로 EU를 선정하였다.

DAC 건식포집에 대한 우리나라의 기술수준을 살펴보면, 5인의 전문가 모두 최고기술 보유국 대비 70 ~ 85%의 범주에서 답을 하였음을 알 수 있다. 여기는 한국과학기술연구원 및 한국에너지기술연구원을 중심으로 DAC 건식포집 기술에 대한 R&D가 수행되고 있으며, 소규모 실증도 추진하는 중에 있다는 점이 고려되었다.

상기 응답 결과에 대한 보정을 수행한 결과, Table 8과 같이 각국의 기술수준 및 기술격차가 도출되었다. 보정 방식으로는, 먼저 '기술수준'에 대해 기술수준 평균값이 가장 높게 나온 국가의 기술수준을 100%로 설정한 후, 여타 국가의 기술수준을 최고기술 보유국 대비 상대수준으로 환산하였다. 반면 '기술격차'에 대해서는, 최고기술 보유국으로 선정된 국가의 기술격차가 0이 되는 것이 합당하므로 이를 위하여 모든 국가의 기술격차 평균값에서 일괄적으로 일정 수치를 감해주었다. 아울러 건식포집에 대하여도 습식포집과 마찬가지로 3인의 전문가가 응답해 준 중국에 대하여는 응답한 전문가들만으로 분석을 수행하였다. 그러나 본 델파이 분석은 최소 3인 이상의 전문가풀 구성을 원칙으로 한 바, 1인의 전문가만 의견을 제기해준 캐나다에 대하여는 최종 분석에서는 제외하였다. 동 분석에서도 기술수준 평균값은 1의 자리로, 기술격차 평균값은 0.1의 자리로 반올림하였며, 표준편차 및 합의도는 0.01의 자리로 반올림하였다.

그 결과, 최종적으로 EU가 최고기술 보유국으로 평가되었으며, 미국 역시 최고기술에 근접한 것으로 평가된다. 이를 기준으로 우리나라는 추격그룹에 해당하며, 최고기술 보유국 대비 80%의 기술을 보유하였고, 최고기술 보유국과의 기술격차는 3.7년인 것으로 분석되었다. 또한 EU와 더불어 기술 선도국으로 평가된 미국의 경우 기술수준은 99%, 기술격차는 0.1년으로 분석되었다. 이외 일본과 중국은 각각 76%, 69%의 기술수준을 보유하였으며, 두 국가 모두 최고기술 보유국과 약 6년의 기술격차가 존재하는 것으로 분석되었다. 기술수준에 대한 전문가 응답

간의 합의도는 이번에도 모두 0.75 이상으로, 합의에 도달한 것으로 사료된다.

4.1.3. 분리막포집 기술의 기술수준 평가

DAC 분리막포집 기술에 대해서는 4인의 전문가가 응답을 해주었다. 전문가 섭외 과정에서 일부 전문가들은 분리막포집이 현재 DAC 기술군에 있어 적합하지 않다는 연구결과가 존재하기에 기술수준평가가 불가능하다는 의견을 제시하여 다소 적은 수의 전문가만 섭외할 수 있었다. 동 응답 결과는 Table 9와 같이 정리된다. 4인의 전문가들은 모두 DAC 분리막포집 기술에 대하여 최고기술 보유국으로 미국을 선정하였다. 이러한 판단 근거로는, 현재 전 세계적으로 DAC 분리막포집에 대한 사업화 사례는 없으나 미국 에너지부의 지원 하에 분리막 기술에 대한 R&D가 다양하게 진행되고 있으며, 특히 InnoSense, 뉴욕 주립 대학교, 델라웨어 대학 등에서 실험실 규모로 DAC 기술에 대한 R&D가 진행되고 있다는 점을 들었다.

한편 DAC 분리막포집에 대한 우리나라의 기술수준은 최고기술 보유국 대비 최저 55%에서 최고 90%까지 응답의 격차가 다소 크게 존재하였다. 이렇게 큰 격차가 존재하는 이유는 한양대 등 일부 대학에서 DAC 분리막포집 기술에 대하여 연구를 수행하고는 있으나 이러한 기관의 수가 매우 소수이기 때문이다. 한 전문가는 DAC용으로 분리막포집 기술이 개발된 사례는 없으나 화석연료 연소 및 산업공정의 배가스로부터의 이산화탄소 포집에는 분리막포집 기술에 대한 실증이 우리나라에서 이루어져 공정 기술력은 있는 것으로 판단되나, DAC를 위하여 분리막 기술이 활용되기 위해서는 추가 기술향상이 필요하다는 점을 언급하기도 하였다.

Table 9. Delphi survey results for Membrane-DAC

Expert	Korea			The US			EU			Japan			Other		
	Level (%)	Gap (yr)	Group*	Level (%)	Gap (yr)	Group*	Level (%)	Gap (yr)	Group*	Level (%)	Gap (yr)	Group*	Level (%)	Gap (yr)	Group*
(1)	55	5	B	100	0	A	85	2	B	85	2	B	*n.a.*		
(2)	80	3	B	100	0	A	95	1	A	85	2.5	B	China		
													70	4	B
(3)	60	15	C	100	0	A	70	10	C	75	5	B	Canada		
													70	10	C
(4)	90	5	B	100	0	A	90	3	B	90	3	B	China		
													70	20	C

* For the group, A is for the leading countries; B, the following countries; and C, the lagging countries.
Source: Formulated by the authors.

Table 10. Technology level evaluation results for Membrane-DAC

Country	Group position	Relative technology level				Technology gap	
		Average (%)	Std. Dev.	Rank	Consensus	Average (yr)	Std. Dev.
Korea	Following	71	16.52	4	0.66	7.0	5.42
U.S.	Leading	100	0.00	1	1.00	0	0
E.U.	Following	85	10.80	2	0.89	4.0	4.08
Japan	Following	84	6.29	3	0.96	3.1	1.31

Source: Formulated by the authors.

이러한 결과를 보정하면 Table 10과 같다. 보정 과정을 정리하면, 우선 이번에는 응답자가 3인 이하인 중국 및 캐나다를 분석대상에서 제외하였다. 한국, 따라서 미국, EU, 일본을 대상으로 분석한 결과를 살펴보면, 최고기술 보유국은 모든 전문가의 합의가 이루어진 미국으로 분석되었다. 한국의 경우 추격그룹으로 평가되며, 최고기술 보유국 대비 71%의 기술수준을 보이고, 최고기술 보유국과의 기술격차는 7.0년으로 분석되었다. 이외 EU 및 일본의 경우 최고기술 보유국 대비 기술수준은 각각 85%, 84%, 기술격차는 약 3～4년으로 분석되었다. 특기할 사항으로는 이번 분석에서 DAC 분리막포집에 대한 우리나라의 기술수준에 대한 전문가 응답 간 합의도는 0.66으로 도출되었다. 이는 0.75 미만의 수치로 전문가들 간의 의견 합의가 충분히 이루어지지 않았음을 의미한다. 이는 상술한 바와 같이 아직 우리나라에서는 분리막기술에 대한 R&D가 충분히 검토되지 않아 전문가 간 의견 차이가 크기 때문으로 사료된다. 그러나 조사대상 국가 간의 기술수준 경향은 동 수치를 통해 확인 가능하므로 합의도가 다소 모자라더라도 의미가 있다고 사료된다.

4.2. RCC 기술 기술수준 평가

DAC 기술수준 평가와 마찬가지로 RCC 기술에 대해서도 기술수준 평가를 수행하였다. RCC 기술은 신기술이며 아직 국내에 관련 전문가가 많지 않은 상황이라 3명의 전문가만을 대상으로 델파이 조사를 진행하였다. 기술수준 설문 응답 결과는 Table 11과 같다. 앞선 조사와 마찬가지로 2회의 조사만으로 전문가 의견 간에 합의에 도달할 수 있었는데, 특히 합의도가 0.97 이상으로 전문가 의견 간 매우 높은 일치도를 보였다. 평가자 모두가 동의하는 기술수준 100%의 최고기술 보유국은 미국로 나타났다. 3명의 평가자 모두 한국의 기술수준은 85%, 기술격차는 3.0년, 추격그룹에 속하는 것으로 일관된 응답을 하였다.

상기 설문 응답 결과를 토대로, 응답 데이터의 평균을 기준으로 하여 Table 12와 같이 주요국의 'RCC 공정 설계 및 구축' 기술수준을 최종적으로 도출하였다. 최고기술 보유국은 미국으로 분석되었으며, 우리나라는 역시 추격그룹으로 분류되었다. 미국의 기술수준을 100%로 고정하였을 때 EU(93%), 한국(85%), 일본(83%) 순으로 기술수

Table 11. Delphi survey results for RCC

Expert	Korea			The US			EU			Japan			Other		
	Level (%)	Gap (yr)	Group*	Level (%)	Gap (yr)	Group*	Level (%)	Gap (yr)	Group*	Level (%)	Gap (yr)	Group*	Level (%)	Gap (yr)	Group*
(1)	85	3.0	B	100	0.0	A	95	1.0	B	85	3.0	B	*n.a.*		
(2)	85	3.0	B	100	0.0	A	95	1.0	A	80	5.0	B	Canada		
													95	1.0	A
(3)	85	3.0	B	100	0.0	A	90	1.0	A	85	3.0	B	*n.a.*		

Source: Formulated by the authors.

* For the group, A is for the leading countries; B, the following countries; and C, the lagging countries.

Table 12. Technology level evaluation results for RCC

Country	Group position	Relative technology level				Technology gap	
		Average (%)	Std. Dev.	Rank	Consensus	Average (yr)	Std. Dev.
Korea	Following	85	0.00	3	1.00	3.0	0.00
U.S.	Leading	100	0.00	1	1.00	0.0	0.00
E.U.	Leading	93	2.89	2	0.97	1.0	0.00
Japan	Following	83	2.89	4	0.97	3.7	1.15

Source: Formulated by the authors.

준의 상대순위가 나타났다. 기타 항목에 있는 국가 중 캐나다의 경우 미국과 함께 북미지역으로 흡수·통합하였다. 기술격차 항목에서는 한국이 최고기술 보유국인 미국에 비해 3.0년 정도 뒤처진 것으로 나타났다. 기술수준 평가에서의 합의도는 모두 0.97 이상으로 높게 측정되었다.

RCC 기술 선도국(미국 및 EU) 대비 한국의 기술격차 발생 원인에 대해 평가자들은 북미지역의 R&D 동향에 주목하였다. 미국에서는 에너지부(DOE)를 중심으로 RCC 프로그램을 구성하고 산·학·연 융합연구를 통해 다양한 기술을 접목한 RCC 기술을 개발중에 있음을 꼽았다. 또한 테슬라 CEO 일론 머스크(Elon Musk)가 운영하는 비영리 벤처 재단인 'XPRIZE'를 통해 탄소를 혁신적으로 제거하는 기술 경연대회인 'XPRIZE Carbon Removal'을 개최하여 북미 지역의 RCC 분야의 혁신기업을 효과적으로 발굴하고 있는 점에도 주목하였다. 한국의 경우 분야 자체의 연구 이력이 짧아 국내의 연구저변이 취약한 편이나 전세계적으로 기술의 성숙도가 높지 않은 분야인 만큼 향후 R&D 투자를 통해 기술격차를 해소할 수 있을 것으로 전망하고 있다.

4.3. 소결

DAC 세부기술에 속하는 습식포집 기술, 건식포집 기술, 분리막포집 기술을 대상으로 수행한 기술수준 평가와 RCC 기술에 대한 기술수준 평가의 분석 결과를 종합하면 다음의 Table 13과 같다. 모든 세부기술에서 가장 고르게 선도하고 있는 것으로 분석된 국가는 미국이었다. 미국은 습식포집과 분리막 포집에서는 최고기술 보유국이었으며, 건식포집 기술의 경우 EU가 근소하게 앞서나 미국 역시 선도국으로 분석되었다. 우리나라는 DAC 기술의 모든 세부기술에 대하여 최고기술 보유국 대비 71 ~ 80%의 기술수준을 보이는 것으로 나타났으며, RCC 기술은 DAC 기술보다 조금 높은 85%의 수준을 보이는 것으로 평가되었다. 우리나라의 기술이 선도국 대비 이 정도의 수준을 보이는 근거에 대하여 델파이 조사에 참여한 전문가들은 우리나라가 CCUS 기술연구 등을 통해 DAC로 연계가능한 기술이 있으나 관련된 실증 및 사업화 경험이 부족하기 때문이라는 답을 제시하였다. 세부기술 중에서는 건식포집과 RCC 기술이 여타 세부기술 대비 최고기술 보유국과의 격차가 낮았는데, 이는 건식포집 기술이 다른 기술들보다 R&D가 더 활발히 이루어지고 있기 때문으로 분석되었다.

분석 결과를 토대로, 우리나라의 DAC 및 RCC에 대한 기술수준 향상을 위한 방향을 i) R&D 투자 측면, ii) 국제협력 측면, iii) 법·제도 측면으로 구분하여 살펴보고자 한다. 먼저 R&D 투자 측면에서 우리나라는 최근에서야 DAC 기술에 대한 국가 R&D가 시작되어 아직 많은 투자가 이루어지지 않은 상황이다. 동 연구에서 도출된 선도국가와의 기술격차를 고려할 때, 정부의 지속적인 R&D 투자가 필요하며, 이 때 미국 에너지부(DOE)의 DAC 허브(DAC Hub) 프로젝트나, 일본의 문샷(Moonshot) R&D 프로그램과 같은 국가의 개발 로드맵을 통한 대규모 투자 사례를 참고할 필요가 있다. 또한 DAC 및 RCC 기술군 하에는 다양한 세부기술이 존재하기에 대규모의 실증 단지를 구축하여 포집기술 뿐만 아니라, 포집된 이산화탄소를 토대로 다양한 전환기술(RCC 포함), 저장 기술, 모니터링 기술까지 가치사슬 전반에 걸친 실증이 가능하도록

Table 13. Summary of the technology level evaluation results for DAC and RCC

Technology	Most advanced country	Korea			The US			EU			Japan			China		
		Level (%)	Gap (yr)	Group	Level (%)	Gap (yr)	Group	Level (%)	Gap (yr)	Group	Level (%)	Gap (yr)	Group	Level (%)	Gap (yr)	Group
DAC																
L-DAC	**The US**	**71**	**6**	**B**	**100**	0	A	87	2	B	73	6	B	65	7	C
S-DAC	**The EU**	**80**	**4**	**B**	99	0	A	**100**	0	A	76	6	B	69	6	C
m-DAC	**The US**	**71**	**7**	**B**	**100**	0	A	85	4	B	84	3	B	-	-	-
RCC	**The US**	**85**	**3**	**B**	**100**	0	A	93	1	A	83	3.7	B	-	-	-

Source: Formulated by the authors

Note: For the group, A is for the leading countries; B, the following countries; and C, the lagging countries.

할 필요도 있다. 아울러 기술 및 시장에 대한 다양한 환경을 고려하여 사업모델을 개발할 수 있도록 지원하는 것 역시 중요하다. 우리나라는 이미 소재 및 공정기술에 대하여 DAC 및 RCC로 응용 가능한 기술을 보유하고 있기 때문에 투자가 충분히 이루어진다면 기술수준의 빠른 향상을 기대할 수 있을 것이다. 이를 위하여 우리나라보다 상대적 기술수준이 높게 평가된 국가들의 DAC 및 RCC 기술에 대한 R&D 예산을 비교해보는 방법을 고려해볼 수 있을 것이다. 특히 사례분석을 통해 기술선도국의 시행착오를 반복하지 않도록 우리나라의 향후 R&D 방향을 설정함으로 R&D 예산의 보다 효율적인 분배 및 활용을 유도하여야 할 것이다.

다음으로 국제협력 측면을 살펴보고자 한다. 우리나라는 DAC 및 RCC 기술 개발에 뒤늦게 참여한 '추격그룹'에 속하기 때문에 기술선도국과의 협력이 매우 중요하다. 이때, 세부요소 기술에 있어서는 선도국과의 격차가 그리 크지는 않기 때문에 원천기술 개발 측면보다는 실증화 측면에서의 협력이 더 효과적일 수 있다. 단순 기술 모방을 넘어 전문성 높은 산학연 교류가 이루어지는 탄탄한 해외 네트워크를 구축하는 것은 우리나라 DAC 및 RCC 기술 성숙에 큰 도움이 될 것이다. 한국이 가진 촉매나 소재 등 요소 기술의 수월성을 기반으로 미국이나 EU의 RCC 프로그램들과 연계할 수 있는 방향성을 설정할 필요가 있다. 또한 기술이 성숙되면서 중요한 부분이 '국제 표준화'인 만큼, 이를 위한 국가 간 이니셔티브 참여가 중요할 것으로 여겨진다. 장기적으로는 선진국 외에 온실가스 배출량이 많은 개발도상국(중동/아시아/아프리카)에서의 사업도 고려할 필요가 있다.

마지막으로 법·제도 측면을 살펴보겠다. DAC 기술은 우리나라의 탄소중립 목표 달성에 필수적인 기술이라는 점을 인지하고, 우리나라의 법·제도 측면에서 DAC 기술에 대한 정확한 분류 체계를 마련할 필요가 있다. 또한 기술선도국의 사례를 분석하여 DAC 기술 R&D 뿐만 아니라 실증 및 활용 사업을 대상으로 정부 재정지원 및 세제 혜택 정책을 도입하는 것이 필요하다. 이를 위하여 관계부처간 조율과 공론화를 통해 구체적인 법·제도 설계가 필요하다. 또한 불필요한 규제를 간소화하고 유연한 규제 체제를 도입하는 규제 혁신이 필요하다. 현행 법률 상으로 이산화탄소가 폐기물로 분류되어 이를 이용하여 자원화하는 데에 제약이 따르는 바, 법·제도 상에서의 규제 완화가 필요한 시점에 와 있다. 또한 기술의 특성상 경제성을 확보하기 위한 시간과 노력이 필요한 분야인 만큼 RCC 공정에 의한 제품의 생산/판매 시 정부의 우선구매, 구매할당, 보조금 지원 등 인센티브를 통한 초기 시장 형성에 정부의 적극적인 역할이 중요하다.

5. 결론

본 연구에서는 탄소중립 목표 달성을 위해 국제적으로 각광받고 또한 최근 우리나라에서도 주목하고 있는 DAC 기술과 RCC 기술을 대상으로 우리나라 기술 수준을 델파이 방법을 통해 평가하였다. DAC 기술에 대해서는 습식기술, 건식기술, 분리막포집 기술로 세부기술을 구분하였다. 이에, DAC 기술과 RCC 기술의 수준을 평가한 결과, 우리나라는 모든 세부기술에 대하여 추격 그룹으로 분류되었으며, 최고기술 보유국 대비 71 ~ 85%의 기술수준을 보유하고 있는 것으로 분석되었다. 이러한 분석 결과를 토대로, DAC 및 RCC 기술에 대한 우리나라의 향후 R&D 방향성, 국제협력 전략, 그리고 법·제도 측면의 병행적 변화 방향에 대해서 제시하였다.

본 연구는 최신기술인 DAC 기술과 RCC 기술에 대한 우리나라 기술수준을 처음으로 평가해 보고 향후 이들 기술의 개발을 위한 방향성을 제시하였다는 점에서 학술적 및 정책적 함의가 있다고 자체적으로 평가한다. 동 결과는 향후 우리나라의 DAC 및 RCC 기술의 R&D 및 실증 방향성을 설정하기 위하여 기술선도국의 사례를 참고하기 위한 목적으로 활용될 수 있을 것으로 보인다. 더 나아가 우리나라와 유사한 수준의 경쟁국의 현황을 파악하고 기술수준의 도약을 위해 본 연구가 제시한 R&D 투자, 국제협력, 법·제도 개선 방안을 우선적으로 검토 및 고려할 수 있을 것이다.

물론, 본 연구 결과를 도출하는 과정에 있어서 한계점 역시 존재했다. 본 연구에서 활용한 방법론인 델파이 방법은 자체가 본질적으로 전문가 간의 진정한 합의보다는 전문가 간의 응답 경향에 따라 결과의 왜곡·조작이 발생할 수 있으며, 익명성에 근거하여 부정적인 응답이 발생할 수도 있다(Aichholzer, 2009, p. 253). 또한 동 방법론을 적용한 대상인 DAC 및 RCC 기술이 신규기술이라는 특성상 국내에 관련 연구를 수행하는 전문가 수가 아직 많지 않기 때문에 일부 세부기술 및 국가에 대해서는 5인 이상의 표본을 구축하지 못했다는 점이다. 적은 수의 표본으로도 의미있는 합의를 도출하기 위하여 델파이 설문을 다회 반복 수행하였으나, 소수 전문가 의견에만 의존하게 되는 위험성이 존재할 수 있기에 향후 관련 기술 종사자

의 수가 늘어난다면 더 많은 전문가를 대상으로 합의된 의견을 도출하려는 노력이 필요할 것이다. 한편, 차후 연구에서는 델파이 방법을 보완할 수 있도록 논문과 특허와 같은 정량적 데이터를 활용한 기술수준평가를 병행하여 진행할 필요도 있을 것으로 보인다. 또한 향후 TRL을 활용한 기술의 절대적 개발 단계를 함께 고려하는 연구 역시 필요할 것으로 보인다. TRL을 평가할 때에도 정량적 평가항목에 대하여 전문가 간 이견이 발생하는 경우 델파이 기법을 활용하여 합의된 평가결과를 도출하기도 하는 바(Dovichi Filho et al., 2021), 이러한 상대적 기술수준 평가에 더해 TRL 평가항목에 대한 전문가 의견을 수렴하는 연구도 많은 시사점을 제공할 것이다.

사사

본 연구는 국가녹색기술연구소에서 2023년 수행한 한국연구재단 연구과제 「DACU 원천기술개발(R&D) (RS-2023-00259920)」의 세부과제 「DACU 기술실증과 활용 활성화를 위한 정책 연구」지원에 의해 수행되었습니다.

References

2050CNC. 2021. 2050 carbon neutrality scenarios. https://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=4&boardNo=101

Aaron D, Tsouris C. 2005. Separation of CO_2 from flue gas: A review. Sep Sci Technol 40(1-3): 321-348. doi: 10.1081/SS-200042244

Aichholzer G. 2009. The Delphi method: Eliciting experts' knowledge in technology foresight. In: Bogner A, Littig B, Menz W (eds). Interviewing experts. London: Palgrave Macmillan. p. 252-274.

Akins RB, Tolson H, Cole BR. 2005. Stability of response characteristics of a Delphi panel: Application of bootstrap data expansion. BMC Med Res Methodol 5: 37.

Alam MM. 2021. High-performance, hybrid polymer membrane for carbon dioxide separation from ambient air. U.S. Department of Energy (DE-FE0031968). https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/21DAC_Alam.pdf

Brethomé FM, Williams NJ, Seipp CA, Kidder MK, Custelcean R. 2018. Direct air capture of CO_2 via aqueous-phase absorption and crystalline-phase release using concentrated solar power. Nat Energy 3: 553-559. doi: 10.1038/s41560-018-0150-z

Bui M, Adjiman CS, Bardow A, Anthony EJ, Boston A, Brown S, Fennell PS, Fuss S, Galindo A, Hackett LA, Hallett JP, Herzog HJ, Jackson G, Kemper J, Krevor S, Maitland GC, Matuszewski M, Metcalfe IS, Petit C, Puxty G, Reimer J, Reiner DM, Rubin ES, Scott SA, Shah N, Smit B, Trusler JPM, Webley P, Wilcox J, Mac Dowell N. 2018. Carbon Capture and Storage (CCS): The way forward. Energy Environ Sci 11(5): 1062–1176. doi: 10.1039/c7ee02342a

Carbon Engineering. 2017 Dec 13. Carbon engineering demonstrates AIR TO FUELS; [accessed 2024 Mar 25]. https://carbonengineering.com/news-updates/ce-demonstrates-air-fuels/

Carbon Engineering. 2023. History in the making: Experience the ground-breaking moment for world's largest Direct Air Capture facility. https://carbonengineering.com/news-updates/direct-air-capture-groundbreaking/

Carbyon. 2024. Technology. https://carbyon.com/technology/

Choi IS. 2024 Jan 17. LowCarbon supplies homegrown DAC device to Space Florida. Energy Newspaper. https://www.energy-news.co.kr/news/articleView.html?idxno=92438

Climeworks. 2022. Mammoth: Our newest direct air capture and storage facility. https://climeworks.com/plant-mammoth

Climeworks. 2024. Project Cypress DAC Hub team awarded funding from U.S. Department of Energy. https://climeworks.com/news/project-cypress-team-awarded-funding-from-us-doe

DOE (U.S. Department of Energy). 2021 Aug 17. Reactive Capture and Conversion (RCC) of CO_2; [accessed 2024 Mar 25]. https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/21CMOG_PSC_Kumar.pdf

DOE (U.S. Department of Energy). 2023. Regional direct air capture hubs selections for award negotiations. https://www.energy.gov/oced/regional-direct-air-capture-hubs-selections-award-negotiations

Dovichi Filho FB, Santiago YC, Lora EES, Palacio JCE,

del Olmo OAA. 2021. Evaluation of the maturity level of biomass electricity generation technologies using the technology readiness level criteria. J Clean Prod 295: 126426. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126426

Embaye AS, Martínez-Izquierdo L, Malankowska M, Téllez C, Coronas J. 2021. Poly(ether-block-amide) copolymer membranes in CO_2 separation applications. Energy Fuels 35(21): 17085-17102.

Freyman MC, Huang Z, Ravikumar D, Duoss EB, Li Y, Baker SE, Pang SH, Schaidle JA. 2023. Reactive CO_2 capture: A path forward for process integration in carbon management. Joule 7(4): 631-651. doi: 10.1016/j.joule.2023.03.013

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. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.11.006

Global Thermostat. 2023. Global Thermostat unveils one of the world's largest units for removing carbon dioxide directly from the air. https://www.globalthermostat.com/news-and-updates/global-thermostat-colorado-headquarters

Han MK, Kim BS, Ryu J, Byeon SC. 2010. Technology level evaluation based on technology growth model and its implication - In case of 'biochip and biosensor technology (in Korean with English abstract). J Korea Technol Innov Soc 13(2): 252-281.

Heldebrant DJ, Kothandaraman J, Dowell NM, Brickett L. 2022. Next steps for solvent-based CO_2 capture; Integration of capture, conversion, and mineralisation. Chem Sci 13: 6445-6456. doi: 10.1039/d2sc00220e

IEA. 2022. Direct Air Capture - A Key Technology for Net Zero. https://www.iea.org/reports/direct-air-capture-2022

IITP (Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation). 2024. 2022 ICT Technology Level Evaluation & Competitiveness Analysis. Daejeon, Korea: ITTP.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2018. Summary for policymakers. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SPM_version_report_LR.pdf

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2022. Climate change 2002: Mitigation of climate change: Summary for policymakers. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SummaryForPolicymakers.pdf

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023. Climate change 2023: Synthesis report. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf

Jasi A. 2023 Sep 1. Occidental agrees to acquire direct air capture developer carbon engineering. The Chemical Engineer. https://www.thechemicalengineer.com/news/occidental-agrees-to-acquire-direct-air-capture-developer-carbon-engineering/

Keeney S, Hasson F, McKenna H. 2006. Consulting the oracle: Ten lessons from using the Delphi technique in nursing research. J Adv Nurs 53(2): 205-212.

Keith DW. 2009. Why capture CO2 from the atmosphere? Science, 325(5948), 1654-1655. doi: 10.1126/science.1175680

KEIT (Korea Evaluation Institute of Industrial Technology). 2022. Industrial technology level evaluation. Daegu, Korea: KEIT.

Kidder MK. 2022. Porous catalytic polymers for simultaneous CO_2 capture and conversion to value-added chemicals. Proceedings of 2022 Carbon Management Project Review Meeting; 2022 Aug 15 ~ Aug 19; The Westin Pittsburgh. Pittsburgh, PA: National Energy Technology Laboratory.

Kim D, Choi W, Lee HW, Lee SY, Choi Y, Lee DK, Kim W, Na J, Lee U, Hwang YJ, Won DH. 2021. Electrocatalytic reduction of low concentrations of CO_2 gas in a membrane electrode assembly electrolyzer. ACS Energy Lett 6(10): 3488-3495. doi: 10.1021/acsenergylett.1c01797

Kim YY, Kim DG, Han SJ, Yun HJ, Park MH, Heo G. 2022. A study on the development of usability evaluation tools of AI educational contents for students through Delphi method (in Korean with English abstract). J Fish Mar Sci Educ 24(2): 256-265. doi: 10.13000/JFMSE.2022.4.34.2.256

KISTEP (Korea Institute of Science & Technology Evaluation and Planning). 2024. 2022 technology level evaluation. Eumsung, Korea: KISTEP.

KRIT (Korea Research Institute for Defense Technology Planning and Advancement). 2023. Defense strategy technology level evaluation. Jinju, Korea: KRIT.

Langie KMG, Tak K, Kim C, Lee HW, Park K, Kim D, Jung W, Lee CW, Oh HS, Lee DK, Koh JH, Min BK, Won DH, Lee U. 2022. Toward economical application of carbon capture and utilization technology with near-zero carbon emission. Nat Commun 13: 7482. doi: 10.1038/s41467-022-35239-9

Lee H, Park C, Jeon H, Choi M, Park N, Kwon M, Park Y, Kim H, Kim W. 2022. 2022 Technology Level Evaluation - 2nd Phase (KISTEP 2022-004). https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO202300003562#;

Lee KN, Choi WS, Park, K. 2010. The development of the process-oriented evaluation criteria for the cyber education program of human resource development (in Korean). The Journal of Vocational Education Research, 29(3), 157-185.

Lilja KK, Laakso K, Palomäki J. 2011. Using the Delphi method. Proceedings of PICMET '11: Technology Managemnet in the Energy-Smart World (PICMET); 2011 Jul 31 ~ Aug 4; Hilton Portland and Executive Tower. Portland, OR: Portland International Center for Management of Engineering and Technology. p. 1-10.

Lin H. 2021. Membrane adsorbents comprising Self-assembled Inorganic Nanocages (SINCs) for super-fast direct air capture enabled by passive cooling. U.S. Department of Energy (DE-FE0031960). https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/21DAC_Lin.pdf

LowCarbon. 2023. `Carbon dioxide' in a sidewalk block... First in Gangjin Bay Ecological Park, Jeonnam; [accessed 2024 Mar 25]. https://www.lowcarbon.co.kr/communication/newsroom/

Manning CG. 2023 Sep 27. Technology readiness levels. NASA. https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/technology-readiness-levels/

MMML (Multidimensional Molecular Materials Laboratory). 2024. An MMML spin-off company (Sorv Co. Ltd) gave a booth presentation at CES 2024 in Las Vegas! https://mmml.kaist.ac.kr/news/team-mmml-won-the-grand-prize-award-at-the-kaist-lab-startup-program-congrats-6f9j3-83w5s-fyewk-kd3g3-rwffc

Mondal MK, Balsora HK, Varshney P. 2012. Progress and trends in CO_2 capture/separation technologies: A review. Energy 46(1): 431-441. doi: 10.1016/j.energy.2012.08.006

NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization). 2022. Moonshot research and development program. https://www.nedo.go.jp/english/news/ZZCA_100007.html

NIGT (National Institute of Green Technology). 2020. 2020 climate change technology level evaluation. Seoul, Korea: NIGT.

NRF (National Research Foundation of Korea). 2023. Original technology development project for DACU. https://www.nrf.re.kr/biz/info/info/view?menu_no=378&biz_no=570

Okoli C, Pawlowski SD. 2004. The Delphi method as a research tool: An example, design considerations and applications. Inf Manag 42(1): 15-29. doi: 10.1016/j.im.2003.11.002

Rowe G, Wright G, Bolger F. 1991. Delphi: A reevaluation of research and theory. Technol Forecast Soc Change 39(3): 235-251.

Rowe G, Wright G. 2001. Expert opinions in forecasting: The role of the Delphi technique. In: Armstrong JS (ed). Principles of forecasting: A handbook for researchers and practitioners. Boston, MA: Springer. p. 125-144.

Sanz-Pérez ES, Murdock CR, Didas SA, Jones CW. 2016. Direct capture of CO_2 from ambient air. Chem Rev 116(19): 11840−11876. doi: 10.1021/acs.chemrev.6b00173

Sauser B, Verma D, Ramirez-Marquez J, Gove R. 2006. From TRL to SRL: The concept of systems readiness levels. Proceedings of Conference on Systems Engineering Research; 2006 Apr 7 ~ Apr 8; University of Southern California. Los Angeles, CA. p. 5-7.

Schmidt RC. 1997. Managing Delphi surveys using nonparametric statistical techniques. Decis Sci 28(3): 763-774. doi:

10.1111/j.1540-5915.1997.tb01330.x

Song Y, Oh C. 2022a. Demonstration and utilization of CO2 direct air capture technologies. Technical insights from the public with commentary (2022-02). Sejong, Korea: 2050 Carbon Neutrality and Green Growth Commission.

Song Y, Oh C. 2022b. Korea's policy direction on the research & development of Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) technologies: Focusing on DAC technologies (in Korean with English abstract). J Clim Change Res 13(1): 75-96. doi: 10.15531/KSCCR.2022.13.1.075

Stephenson A. 2023 Aug 17. Canadian firm carbon engineering being bought by occidental for $1.1B US. CBC. https://www.cbc.ca/news/canada/calgary/occidental-engineering-bought-oxy-low-carbon-deal-1.6939081

Sullivan I, Goryachev A, Digdaya IA, Li X, Atwater HA, Vermass DA, Xiang C. 2021. Coupling electrochemical CO_2 conversion with CO_2 capture. Nat Catal 4(11): 952-958. doi: 10.1038/s41929-021-00699-7

Susteon. 2021 Jul 20. Susteon selected for DOE Office of Science / SBIR Phase II Award to develop Dual Functional Materials (DFM) technology. https://susteon.com/dac-dfm-sbir-phase-ii/

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2022. A6.4-SB002-AA-A06: Information Note: Removal activities under the Article 6.4 mechanism (Version 01.0). https://unfccc.int/sites/default/files/resource/a64-sb002-aa-a06.pdf

Xu J, Wu H, Wang Z, Qiao Z, Zhao S, Wang J. 2018. Recent advances on the membrane processes for CO_2 separation. Chin J Chem Eng 26(11): 2280-2291. doi: 10.1016/j.cjche.2018.08.020

Yoo SY, Kim YJ, Lee TH, Lee BK, Kim MJ, Han SH, Ha SY, Park HB. 2023. Membrane system for management and utilization of indoor CO_2. J Ind Eng Chem 122: 161-168.

Yoo SY, Park HB. 2020. Membrane-based direct air capture technologies (in Korean with English abstract). Membr J 30(3): 173-180.