J. Korean Soc. Environ. Eng., 44(12), 652-664, 2022
https://doi.org/10.4491/KSEE.2022.44.12.652
ISSN 1225-5025, e-ISSN 2383-7810

Review Paper

Current Status and Perspectives of Carbon Capture and Storage

Sanghyeok Lee[#] · Mugung Lee[#] · Woong Jeon[#] · Minseok Son[#] · Sokhee P. Jung[†]

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Republic of Korea

(Received October 31, 2022; Revised December 20, 2022; Accepted December 20, 2022)

Abstract : As climate change progresses rapidly, unprecedented weather and natural changes are occurring. After carbon dioxide was identified as the main culprit of global warming and climate change, at the UN General Assembly in 2015, 195 countries signed the Paris Agreement to set greenhouse gas emission reduction targets. However, some countries are either withdrawing from the Paris Agreement or failing to implement it due to their own economic reasons. Reducing the use of fossil fuels increases energy costs. In this context, carbon capture and storage technology (CCS) is emerging as an alternative. In this review, the outline of CCS technology is explained, and the advantages and disadvantages of each technology, the status of CCS technology, and commercialization cases are investigated and analyzed. In addition, for an in-depth analysis of the CCS technology itself, the following issues were analyzed in depth during the research and analysis process: 1) Efficiency of CCS technology, 2) Comparison of carbon capture and storage capacity between CCS technology and vegetation, 3) Stability of carbon storage through CCS technology. Finally, the policy for carbon capture and storage technology and the development direction of this technology were presented.

Keywords : Paris Agreement, Greenhouse Gas, Carbon Capture, Carbon Storage, Plants, Safety

The Korean text of this paper can be translated into multiple languages on the website of http://jksee.or.kr through Google Translator.

† Corresponding author
E-mail: sokheejung@chonnam.ac.kr
Tel: 062-530-1857 Fax: 02-530-1859
#These authors are the co-first authors

© 2022. Korean Society of Environmental Engineers

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

J. Korean Soc. Environ. Eng., 44(12), 652-664, 2022
https://doi.org/10.4491/KSEE.2022.44.12.652
ISSN 1225-5025, **e-ISSN** 2383-7810

총 설

탄소 포집 및 저장의 현재와 전망

이상혁[#] · 이무궁[#] · 전 웅[#] · 손민석[#] · 정석희

전남대학교 환경에너지공학과 광주캠퍼스

요약 : 현재 기후변화가 급격하게 진행됨에 따라 이전에 없던 기상이변과 자연의 변화가 발생하고 있다. 이산화탄소가 지구온난화와 기후변화의 주범으로 지목된 이후, 2015년 유엔 총회에서 세계 195개국은 온실가스 배출 감축 목표를 설정하는 파리협정을 체결했다. 하지만 현재 몇몇 국가들은 자국의 경제적 이유로 파리협정을 탈퇴하거나 혹은 협정을 잘 이행하지 못하고 있는 실정이다. 화석연료 사용을 무리하게 감축하면 에너지 비용이 급격히 상승하기 때문이다. 이러한 상황에서 대안으로 부상하는 기술이 바로 탄소 포집 및 저장 기술(CCS)이다. 본 총설에서는 CCS 기술의 개요를 설명하고, 각 기술의 장단점, CCS 기술 현황 및 상용화 사례를 조사하고 분석하였다. 또한 CCS 기술 자체의 심도있는 분석을 위해 조사 분석 과정에 나온 다음과 같은 논쟁점에 대해 심도있게 분석하였다: 1) CCS 기술의 효율성, 2) CCS 기술과 식물의 탄소 포집 및 저장 능력의 비교, 3) CCS 기술을 통한 탄소 저장의 안정성. 마지막으로는 탄소 포집 및 저장기술에 대한 정책과 이 기술의 발전 방향에 대해 제시하였다.

주제어 : 파리협정, 온실가스, 탄소 포집, 탄소 저장, 식물, 안전성

1. 서 론

근대의 산업혁명 이래 근대화된 국가의 환경오염의 가속화와 함께 세계의 온실가스 배출량은 증가하고 있다.[1-8] 온실가스로 인한 전지구적인 기후변화에 대응하기 위해 방지하기 위하여, 2015년 세계 195 개국은 파리협정(Paris Agreement)을 채택하였는데, 이는 두 가지 목표를 가지고 있다: 1) 지구 평균 온도가 산업화 이전의 평균 온도보다 섭씨 2도 이상의 상승을 막는 것이고, 2) 궁극적으로 모든 국가의 이산화탄소 순 배출을 0으로 하는 것이다. 이 두가지 목표를 달성하기 위해 각 국가가 자체적으로 온실가스 배출 목표를 정하고 실천하는 종료 시점이 없는 협약이다.

체결 당시 온실가스 감축 목표를 자발적으로 제출한 147개국 가운데 127개국은 배출전망치와 감축 목표를 제시하였다. 그 중 하나인 대한민국 2018년 배출량 7.276억톤에서, 2030년에는 40%(2.91억톤)를 감축한 배출량 4.366억톤(연평균 감축률 4.17%/년)을 제시하며 '2050 탄소중립'을 하겠다고 선언하였다.[9] 하지만 2019년 대한민국의 온실가스 배출량은 전 세계 배출량의 1.9%인 연간 6.4억톤으로, 파리기후협약 감축 목표치보다 약 1억 톤을 초과 배출하고 있다.

하지만 이 1억 톤을 감축하기 위해서 과도하게 에너지 사용을 감축한다면 국가경제에 악영향을 줄 수 있다. 미국의 경우, 파리협약 준수로 인해 2025년에는 일자리 270만 개 감소, 2040년에는 GDP 3조 달러 감소 등이 예상되어, 내수경제 보호를 언급하며 파리협약 탈퇴를 선언하였다. 독일의 경우, 신재생에너지 비중을 확대한 후 산업용 전기요금이 6년동안 42%가량 상승하였다.[10]

재생에너지 생산 및 소비의 확대와 화석연료 사용의 감축은 직접적으로 온실가스를 감축하는 효과적인 방법이다. 하지만 재생에너지의 비싼 발전 단가, 에너지 생산의 변동성, 경제적인 대용량 에너지 저장 장치 부재로 인해, 무리한 재생에너지의 확장은 에너지 가격의 급격한 상승을 초래할 수 있다.

기술적 돌파구가 없는 현재로서는 화석 연료의 병행 사용이 불가피하므로 이산화탄소가 대기로 꾸준히 배출하고 있는 상황이다. REN21 보고서에 따르면, 2009년에 비하여 2019년의 화석에너지 사용 비율은 80.3%에서 80.2%로 줄었지만, 절대적인 화석연료 소비량은 오히려 증가하였다. 재생에너지와 탄소중립의 구호가 무색하게 인류의 에너지 사용량은 계속 늘어나고 있기 때문이다.[11]

인류의 에너지 소비를 감축하는 일은 쉽지 않다. 현 상황에서 대안으로 부상하는 기술이 바로 탄소 포집 및 저장(carbon capture and storage, CCS) 기술이다. 본 총설에서는 CCS 기술의 개요를 설명하고, 각 기술의 장단점, CCS 기술 현황 및 상용화 사례를 조사하고 분석하였다. 나아가 CCS 기술의 심

층적인 기술적 평가를 위하여 CCS 기술의 효율성, CCS 기술과 식물의 탄소 포집 및 저장 능력의 비교, CCS 기술을 통한 탄소 저장의 안정성을 분석하였다. 마지막으로는 탄소 포집 및 저장기술에 대한 정책 개선과 앞으로 CCS 기술의 발전 방향을 제시하였다.

2. 탄소 포집 및 저장의 중요성

대기 중의 온도 상승의 요인은 다양하게 존재하는데, 기후변화의 요인들 중 온실가스 농도 증가가 가장 큰 이유로 거론되고 있다. 온실가스에서 이산화탄소가 차지하는 비중은 91.4%이지만, 대기의 약 0.04% 정도의 매우 적은 양을 차지하고 있다. 대기를 구성하는 물질 중 이산화탄소의 비율 매우 적기 때문에 지구온난화의 원인으로 이산화탄소가 영향이 있는지에 대한 의견이 분분하다.[12)]

공기의 대부분은 산소와 질소, 아르곤 같은 분자가 차지하고 있다. 이러한 단원자 분자는 지구복사에너지인 적외선을 흡수하지 않는다. 하지만 적은 양의 이산화탄소라도 적외선 복사에너지를 흡수하면 흔들리기 시작하며, 이때 옆에 있는 질소와 산소를 같이 움직이게 한다. 따라서 전체 공기가 움직이게 되고 기온이 상승하게 되는 것이다. 기온 상승은 전체 이산화탄소가 차지하는 비율이 중요한 것이 아니라 적외선 복사에너지를 흡수하는 이산화탄소의 농도 즉, 양이 중요한 것이다.[13,14)]

18세기 중반, 전세계의 급격한 산업 발전이 이루어짐에 따라 에너지의 수요량이 가파르게 증가하였다. 대한민국 또한 1960년대 이후 시멘트, 철강, 화학 및 석유화학제품들을 생산하는 중화학공업과 에너지산업과 같은 탄소배출량이 높은 산업이 발달하였다. 이처럼 산업화 이후 이산화탄소 농도는 413.2ppm까지 증가하였고, 평균 기온 편차 또한 -0.5℃에서 0.4℃까지 꾸준히 증가하였다(**Fig. 1**). 이산화탄소 농도의 상승은 지구의 평균기온 증가와 관련이 있음을 알 수 있다.

이처럼 이산화탄소와 지구온난화의 상관관계가 있다고 판단하여 전세계는 지구온난화의 완화를 위해 이산화탄소 저감을 노력하고 있다. 대한민국 또한 다양한 정책들을 통해 이산화탄소 저감을 노력 중이다. 하지만 화력발전소와 원자력발전소의 점진적인 가동 중지로 인하여 에너지 부족이 심화되고 있다.[15)]

CCS 기술은 현재 에너지 산업구조에서 이산화탄소를 감소시킬 수 있는 현실적인 방안이다. 현재 에너지 수요를 충족시키 위해서는 화석연료에 대한 의존을 바로 탈피할 수 없기 때문이다.

3. CCS 기술의 종류

3.1. 탄소 포집 기술(carbon capture technology)

탄소 포집 기술은 이산화탄소를 포집하는 시기에 따라 구분할 수 있다(**Fig. 2**). 연소 후 포집(post-combustion carbon capture), 연소 전 포집(pre-combustion carbon capture), 그리고 연소 중 포집(carbon capture during combustion).

1) 연소 후 포집기술은 화석연료 등의 연소에서 발생하는 배기가스에서 이산화탄소를 포집하는 방법이다. 특히 발전소 시설에서 주로 사용되고 있다. 이때, 배기가스 내의 이산화탄소의 비율이 매우 낮아, 수송 및 저장을 위한 농축 비용이 필요하다.[17)] 연소 후 포집 기술은 흡수법, 흡착법, 막분리법으로 크게 나누어진다.

흡수법은 이산화탄소 분리 방법 중 가장 많이 사용되는 방법으로, 배기가스 내 이산화탄소를 용액 흡수제로 흡수하여 분리시키는 방법이다. 탈거와 재생 공정을 통해 흡수제를 재사용할 수 있다는 특징을 가지며, 대용량 연소 후 배출가스를 처리하는데 용이하고, 이산화탄소 농도 변화에 적용성이 크다는 장점을 가지고 있다. 하지만 흡수제를 재생하는데 높은 에너지가 필요하다는 단점도 있다.

흡착법은 고체 상태의 흡착제를 사용하여 배기가스 내 이산화탄소를 흡착과 분리를 하는 방법으로, 흡탈착 방법에 따라 고압에서는 흡착, 상압에서는 탈착하는 압력교대, 흡착법과 흡착된 이산화탄소를 고온에서 탈착하는 열교대 흡착법이 있다. 흡착법은 장치와 운전이 다른 방법에 비해 간단하고, 환경에 대한 영향과 에너지 효율성 측면에서 우수하다. 그렇지만

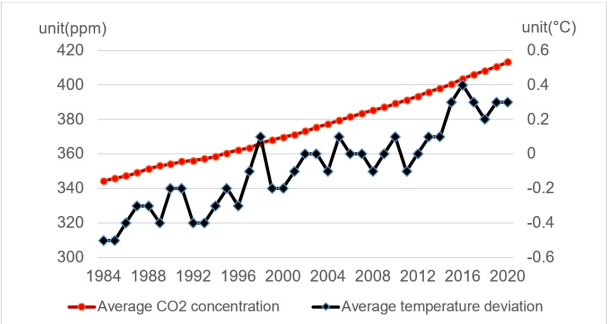

Fig. 1. Annual average temperature deviation and carbon dioxide concentration graph.[12)]

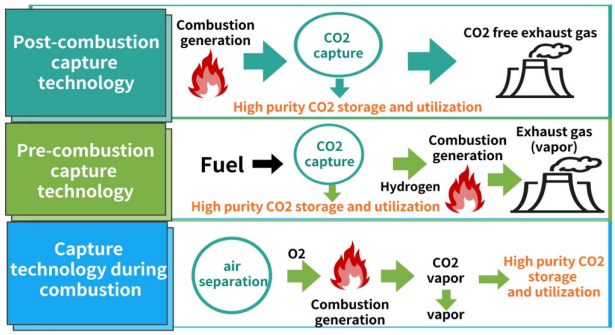

Fig. 2. Carbon capture technologies.[16)]

대용량 처리에 대해 효율이 낮다는 한계를 가지고 있다.[18]

막분리법은 이산화탄소를 선택적으로 막통과를 시켜 분리하는 방법이다. 이 방법은 흡수법보다 막분리 효율이 높고, 대형화 시 장치비와 운전비가 낮아지지만, 대용량 처리가 어렵고, 막소재의 높은 비용, 막오염 문제로 인해 대량 공정에 부적합하다는 문제를 가지고 있다.[17]

2) 연소 전 포집기술은 연료를 사전에 처리하여 이산화탄소와 수소로 전환시킨 후 이산화탄소를 분리하거나, 혼합가스를 연소시켜서 이산화탄소를 포집하는 방법이다. 주로 석탄가스화 발전소에서 사용되고 있다.[19] 과정 중에 생성된 이산화탄소는 농도와 압력이 높아 분리가 용이하다. 또 가스 부피가 적고, 회수장비의 규모가 작아 투자비가 적다는 장점이 있다. 반면에 연소 전의 초기 연료전환과정이 다른 기술에 비해 복잡하여 비용이 추가된다는 단점도 있다.[17]

연소 전 포집기술은 주로 고압에서 운전되어, 이산화탄소의 분압이 상대적으로 높기 때문에 물리흡수법을 주로 사용한다. 감압으로만 이산화탄소를 방출할 수 있어서 재생을 위한 많은 열소모 없이 회수할 수 있지만, 회수 시 용매의 감온, 재생 시 용매의 압력 손실이 에너지소모를 유발한다.

이 외에도 고체흡수제, 연소 전 분리막 기술 등이 상용화를 위해 연구·개발 중이다.[20]

3) 연소 중 포집기술은 연료를 공기가 아니라 순수 산소만을 사용하여 연소시켜 이산화탄소를 포집하는 방법이다. 배출가스 중의 이산화탄소 농도가 높아져 분리가 더 쉽고, 질소화합물은 저감되는 장점이 있다. 하지만 많은 양의 산소를 필요로 하며, 또 이 산소를 에너지소비가 많이 필요로 하는 공기분리를 통해 공급해야 하기 때문에 비용이 많이 든다는 단점도 있다. 이러한 단점 때문에 주로 소규모의 발전시설에 사용되고 있지만, 현재 포집 기술 연구 중 가장 중점적으로 연구되고 있는 분야이다.[17,20]

독일에서는 이산화탄소 재순환 순산소 연소법이 시험 운영하며 연구 중에 있으며, 대한민국에서는 매체 순환 연소법이 개발되어 시험 운행에 성공하여 상용화를 위해 발전 진행중이다.[20]

3.2. 탄소 저장 기술(carbon storage technology)

연료 연소 시 발생하는 이산화탄소를 배출 전 추출한 후, 압력을 가해 액화시켜 심부지층에 저장하는 기술이다. 탄소저장기술은 크게 지중저장, 해양저장, 광물탄산염화 3가지 기술이 있다.

1) 지중저장기술은 해저나 육상의 750-1,000 m 심도에 저장에 적합한 지층에 이산화탄소를 주입하여 저장하는 기술이다. 지중저장은 기술적 측면에서 저장용량과 주입성, 폐쇄성이 중점적으로 고려된다. 먼저 저장용량은 저장층 부피와 공극률, 이산화탄소 밀도와 포화도의 곱으로 계산할 수 있다. 주입성은 단위 시간당 주입 가능한 이산화탄소의 양을 의미하고 이때, 저장층의 공극률과 유체 투과율이 높을수록 이산화탄소의 주입이 용이함을 나타낸다. 폐쇄성은 주입된 이산화탄소가 누출되지 않고 저장층 내부에 반영구적으로 안전하게 저장될 수 있는가를 의미한다. 또한 덮개암의 지질학적 규모와 품질, 단층의 유무를 고려하여 평가한다.[14] 지중저장의 방식은 원유회수 증진 저장, 고갈된 유전 및 가스전 저장, 대수층 저장, 석탄층 저장으로 나눌 수 있다.[21]

원유회수 증진 저장(EOR)은 전세계에서 널리 사용중인 기술로 유전에 액체 상태의 이산화탄소를 주입하여 석유의 회수를 증진시키는 방법이다. EOR의 원리는 액체 상태의 이산화탄소가 지중에 주입되면 원유의 점성이 낮아져 회수가 수월해지는 원리를 이용한 것이다. 이러한 기술을 사용해 이산화탄소의 저장에 사용되는 비용의 일부를 EOR 기술을 통하여 절감할 수 있다는 장점이 있다.

고갈된 유전 및 가스전 저장은 고갈된 유전 및 가스전에 이산화탄소를 주입하여 저장하는 방식이다. 이산화탄소 저장조건은 심도가 800 m 이상이고, 7.38 MPa 이상의 압력을 유지해야 가능하다. 또, 회수가능한 탄화수소의 양만큼 저장할 수 있다.

대수층 저장은 대수층에 이산화탄소를 저장하는 기술로, 대수층이란 지하수가 존재하는 지층으로 해수보다 높은 염분농도로 채워진 암석으로 이루어진 층이다. 또한, 전세계 대부분의 지역에 존재하며 이산화탄소 저장용량이 충분하고, 대수층 상부에 덮개암(cap rock)이 존재하여 가스의 방출을 억제할 수 있다. 따라서 장시간 이산화탄소를 안전하게 저장할 수 있는 장점이 있다. 대수층에 저장하기 위해서는 아래의 조건을 충족해야 한다. 1) 약 800 m 이상의 깊이여야 한다. 2) 대수층에서 이산화탄소의 체류시간이 길어야 한다. 3) 대수층은 이산화탄소 주입하는 위치에서 충분한 침투성과 다공성이 갖춰져 있어야 한다. 4) 대수층은 반대수층로 덮여져 있어서 식수와 표층수의 공급으로부터 대수층이 분리되어 있어야 한다.

석탄층 저장은 석탄층에 직접 이산화탄소를 주입하여, 석탄층 내의 메탄가스를 회수하는 방법이다. 석탄층 저장방식은 경제적인 이점이 있어, 오래전부터 사용되어온 기술 중 하나이다. 석탄층 저장의 원리는 흡착되어 있는 CH_4(gas)를 주입한 이산화탄소로 대체하여, CH_4(gas)의 회수를 증진시킴과 동시에 이산화탄소를 석탄층에 저장하는 방법이다.

2) 해양저장기술은 해저 3,000 m 이하에 이산화탄소를 분사하여 이산화탄소를 수화 시켜 하이드레이트의 형태로 저장시키는 방법이다. 이산화탄소를 해양저장을 할 경우 향후 500년간 발생하는 이산화탄소를 저장할 수 있을 만큼 저장용량이 방대하다. 하지만 해양저장으로 인한 해양생태계 파괴와 해양의 산성화 같은 안전성 문제가 해결되지 않아 현재는 전세계에서 협의 하에 사용하지 않는 기술이다.

3) 광물탄산염화는 이산화탄소를 마그네슘 또는 칼슘 등을 포함하는 금속산화물과 반응시켜 저장하는 기술이다. 광물탄산화에 필요한 마그네슘과 칼슘은 폐콘크리트, 시멘트, 폐석면 등의 알칼리성 산업 부산물에서 추출 가능하다. 광물탄산

염화는 탄산염의 활용을 통해 이산화탄소의 재활용이 가능하고, 각종 산업 폐기물 또는 부산물을 처리하는데도 활용될 수 있다는 장점이 있지만, 원료물질이 되는 칼슘 및 마그네슘원의 전처리 과정에 에너지가 필요하고, 상대적으로 느린 반응을 가속화하기 위해 첨가되는 첨가제의 회수에 비용 추가되는 단점도 있다.

4. CCS 현황

4.1. 해외 CCS 기술 적용 사례

캐나다 Weyburn 프로젝트는 국가 사이에(미국-캐나다) 이산화탄소를 전송하여 저장하는 기술과 석유회수증진기술(EOR)을 사업적으로 접목시킨 첫 번째 프로젝트이다. 이 프로젝트는 2000년에 시작된 이산화탄소 지중 저장 사업으로, 이산화탄소를 파이프를 통해서 수송되도록 설계하여 하루에 3천-5천 톤의 이산화탄소를 수송하고 저장한다. Weyburn 프로젝트의 부지는 180 km^2에 면적과 석유 원시 부존량은 13.9억 6백만 배럴로서, 연간 3백만 톤의 이산화탄소를 저장할 수 있고 총 2천만 톤을 저장할 수 있을 것으로 추정하고 있다.[22)]

캐나다 Boundary Dam프로젝트는 SaskPower 발전소에 세계 최초로 이산화탄소 수집하는 저장 장치를 추가하는 사업이다. Boundary Dam은 오래된 발전소로 새롭게 시설을 교체하는 대신에 CO_2와 SO_2 수집 장치를 통합시켜서, 개별적인 장치 설치보다 비용을 절약하고 30년간 전력을 생산 가능하도록 만들었다. 이 발전소에서는 석탄을 열원으로 활용하여 연간 150 MW의 전력을 생산하며 수집 장치 통합을 완료하였을 때 전력 생산 시 발생되는 90%의 이산화탄소 1백만 톤을 수집 가능할 것으로 예측된다.[23)]

노르웨이 Sleipner 프로젝트는 1991년 노르웨이 정부에서 지구온난화에 따른 기후변화에 대한 대응책으로 유전에서 방출되는 이산화탄소에 대한 세금을 부과하기 시작하여, 이에 Slepiner 서쪽 가스정 부근에서 생산되는 천연가스에 포함된 이산화탄소를 세계 최초로 상업적 규모로 진행한 프로젝트이다. 연소 전 포집기술을 활용하여, 대염수층에 저장하였다. 또한 이 프로젝트는 대수층에 연간 1백만 톤씩 저장하여 1996년 총 2천만 톤을 목표로 저장을 실시하였다.[22)]

노르웨이 Snohvit 프로젝트는 2008년부터 시작되었다. 육상에서 먼저 천연가스를 처리한 후, 이산화탄소를 아민 포집 공정을 통해 포집 후 노르웨이 Barents Sea의 Harmmerfest분지 약 2,600 m 깊이의 대염수층에 저장되고 있는 프로젝트이다. 2008년 시작된 이후 연간 70만 톤씩 주입하고 있고, 최대 4천만 톤까지 주입할 수 있는 용량을 가지고 있다.[22)]

미국 Century 프로젝트는 미국 텍사스주에서 2010년에 시작되었다. 오시덴탈, 센드리지 에너지라는 회사가 진행하였으며, 북아메라카에서 단일 산업자원 이산화탄소 포집시설 중 가장 큰 규모이다. 최대 연간 8.4백만 톤의 이산화탄소를 저장할 수 있지만, 연간 5백만 톤만 저장하고 있다. 퍼마이분지에서 채취한 천연가스에 포함된 이산화탄소를 분리하여 분지에 존재하는 유층에 다시 주입하는 방식이다. 주입 깊이는 퍼마인분지의 규모가 매우 커 다양하게 존재한다.[24)]

미국 Coffeyville 프로젝트는 미국 캔자스주에서 2013년에 시작된 프로젝트로CVR 에너지라는 회사가 진행하였다. 석유 코크스를 가스화한 가스에서 분리한 이산화탄소와, 암모니아와 질산암모늄 비료를 제조하면서 나오는 부산물인 이산화탄소를 연간 85만 톤 포집하고 있다. 이 이산화탄소를 파이프를 통해서 노스 버뱅크까지 운송하는데, 주입량은 하루 2.4천 톤이고 연간 1백만 톤 정도이다. 주입 깊이는 약 914 m 정도이다.[25)]

브라질 Lula 프로젝트는 2011년 파일럿 프로젝트를 시작으로 2013년 상용화를 시작한 프로젝트이다. 해상 가스 처리 공장에서 배출되는 이산화탄소를 포집하여 탄산염의 형태로 저장한다. 연간 70만 톤을 처리할 수 있는 크지 않는 규모이지만, 브라질 Lula 지역에는 약 2013년 기준 약 65억 배럴의 회수가능유가 매장되어 있어, 현재 브라질에서 가장 중요한 CCS 프로젝트로 평가되고 있다.[26)]

호주 Gorgon 프로젝트는 호주의 첫 CCS 프로젝트로, 2009년에 착공을 시작하여 2016년부터 운행을 시작했다. 해안에 위치한 천연가스 가공 공장에서 이산화탄소를 포집하여, 육상 파이프라인을 통해 가공시설로 이동, 배로섬 아래 2.5 km 지점에 저장을 하고 있다. 연간 340~400만 톤의 처리 규모를 가지며, 프로젝트 기간동안 총 1.2억 톤의 이산화탄소를 처리할 것으로 예상되고 있다.[27)]

4.2. CCS 관련 해외 제도(Fig. 3)

미국에서는 '종합환경대응 배상책임법' 그리고 '자원보전재생법'을 제정하였다. 이는 이산화탄소 주입이나 포집 과정에 대한 법률이다. 2005년에는 지하수 오염 방지를 위한 '지하주입규제(UIC)'를 제정하였다. UIC가 가장 중요하게 여기는 원칙은 이산화탄소를 안전하게 주입하고, 주입된 이산화탄소로 인한 지하수의 수질 영향을 최소화하는 것이다. 또한, 저장된 이산화탄소의 안정성과 저장 효율을 평가하기 위해서 주입 단계별로 모니터링을 진행할 것을 규정하고 있다.

EU는 2009년에 CCS와 관련된 총 9장으로 구성된 지침을 제정하였다. 이 지침을 통해 자국 영토 안에서 저장능력과 효율에 대한 평가가 필수가 되었다. 따라서 지질학적으로 적합한 지역을 선정하고, 선정된 지역의 지진 안정성을 계산하도록 규정되었으며 누출의 위험이 낮은 지역에만 저장을 허용하고 있다.

독일은 EU의 규정을 국내법으로 수용한 법률을 2012년부터 시행 중이다. 상업적 규모로 운영되는 CCS 시설 설치를 허가하지 않고 있으며, 중소규모의 실증 프로젝트만 허용하고 있다. 또한, 한곳에서 저장할 수 있는 저장용량을 130만 톤 이하로 제한하고 있으며, 전체 국토에도 연간 404만 톤을 초

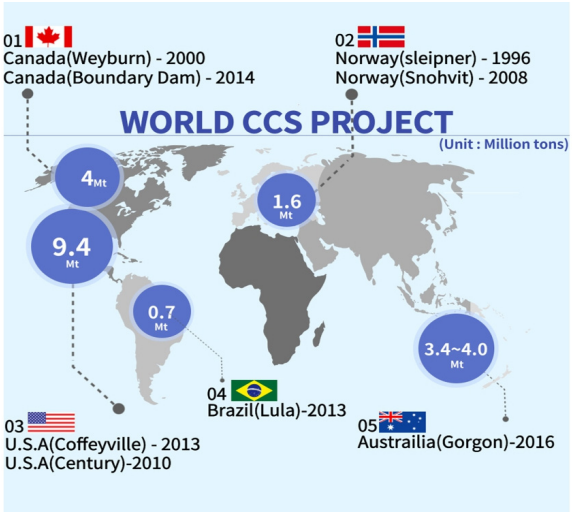

Fig. 3. Overseas status of CCS technology.[28]

과하지 않도록 규제하고 있다.

네덜란드의 경제부서는 CCS 프로젝트의 입찰 및 실증 기업을 선정하는 일을 하고 있고, 연구개발부서는 이산화탄소 포집기술이나 해저 또는 지하에 저장시키는 기술을 연구하고 있다. 네덜란드 정부는 CCS 기술이 이산화탄소 배출을 지속적으로 감소시키기 위한 가장 중요한 방법으로 여기고 있지만, 배출 감축 목표를 성취하기 부족하다 판단하고 있다.

트레일리아 정부는 CCS 기술에 대한 연구개발을 진행중에 있다. 오스트레일리아 정부는 8월에 산정된 보조금에서 추가로 2500만 달러를 더하며 전폭적인 지원을 하고 있다. 세계 최대의 이산화탄소 포집 프로젝트인 고르곤 프로젝트는 2016-2017년 동안 진행되었다. 오스트레일리아 정부는 2030년까지 이산화탄소 배출량을 2005년 대비 약 27% 저감하기 위해 CCS 기술에 대한 연구, 개발에 관심을 가지고 있다.

일본 CCS 조사 주식회사(JCCS)는 이산화탄소의 수송, 분리, 지중 저장의 프로젝트의 실증과 조사에 참여한다. 또한 일본에서의 CCS에 대한 법안의 정리와, 민간 의견을 집약하고, CCS 기술에 대한 최신 정보의 취합과, 국제 연구 기관등의 교류를 진행한다. 또한, 일본은 CCS의 실용화를 위해 해양오염방지법, 기존의 법체계의 정리와 기술 기준의 설정이 요구되고 있다. 해외의 선행 CCS 프로젝트의 기술 정보와 법규제 대응, 기술 기준을 참고하여, 일본내 보급과 안전을 최우선으로 하고 있다.

4.3. 국내 CCS 기술 적용 사례

보령화력발전소 10MW급 연소 후 습식 이산화탄소 포집 플랜트 준공 산업통상자원부는 화력발전에서 온실가스 문제를 해결하려, 온실가스 저감 기술을 개발해왔으며, 온실가스 포집 플랜트 시설을 보령화력 8호기에 설치하였다. 10MW급 습식 포집 플랜트는 연간 약 8만 톤의 이산화탄소 배출을 90% 이상 포집할 수 있으며, 국내에서 처음으로 화력발전소에 적용된 실증 파일럿 설비이다.

보령화력발전소 10MW급 건식 이산화탄소 포집 플랜트 2019년부터 한국중부발전 보령화력본부에서 발생하는 연간 약 7만톤의 이산화탄소를 포집할 수 있는 국내 최대 규모인 10MW 이산화탄소 포집 실증 플랜트를 설치하고 운영 중이다. 또한 전력연구원은 포집 플랜트 핵심 기술인 이산화탄소 흡수제 KoSol과 공정을 자체 개발하여, 이산화탄소 흡수에 필요한 에너지를 상용흡수제 대비 43% 절감하고, 흡수제의 손실량을 90% 줄였다.[29]

장기분지 1만 톤급 육상 지중저장 실증 프로젝트 2017년에 관측공을 확보했고, 2018년 초에는 이산화탄소 주입을 위한 장기분지 심부저장지층을 시추탐사를 하며, 저장소 확보·설계를 완료하였다.

포항분지 해저 지중저장 실증 프로젝트 국내에 대규모 저장소와 CCS 상용화 기술을 확보하고자 해저 저장을 추진하고 있다. 포항분지를 해양 물리탐사하고, 해양 심부시추를 통해 해저 저장소 확보·설계를 완료하였으며, 해양 플랫폼 구축과 주입설비 설치가 진행되고 있다. 대규모 통합실증과 상용화는 '국가 CCS 종합 추진계획'에 따르면 2015년까지 대규모 저장소가 확정되고, 2017년에는 통합실증사업이 착수되도록 계획했으나, 저장소 확정 지연과 CCS를 통한 대용량 온실가스 감축이 정책으로 확정되지 못하면서, 현재까지 추진 결정이 되지 못하고 있다.

5. 현재의 CCS 기술 검토

현재 대한민국 정부는 탄소 중립을 위한 10가지 핵심기술을 발표하였고, 연구개발을 추진 중이다. 이 핵심 기술에는 CCUS 기술이 포함되어 있고, 이 기술은 1972년 미국의 발베르데 천연가스 발전소에서 활용되기 시작한 후, 50년이 지난 최근 상용화 단계에 이르렀다. 하지만 이산화탄소의 인위적 포집이 나무를 통한 자연적인 포집 보다 효율적인지, 또 포집 기술은 이산화탄소 배출이 많은 산업군인 화학 및 석유화학제품, 철강 공장과 같은 곳에서만 제한적으로 사용되고 있는데 그 외 일반 대기 상태에서의 이산화탄소 포집이 효율적으로 가능한지에 대한 문제가 존재한다. 또한 이산화탄소 저장 시 저장소 존재여부, 안정성 문제 등 여러가지 문제점들이 존재하는데 이러한 CCS 관련 다양한 문제점에 대해서 알아보고자 한다.

5.1. CCS 기술과 식물의 효율성 비교

전 세계 산림면적은 약 40억 6천만 ha로 육지 면적의 31%에 달한다. 산림 1ha는 연평균 약 10.4톤의 이산화탄소를 흡수하므로 전 세계 산림은 연간 이산화탄소 42.2억 톤을 흡수하고 있다. 참고로 2020년 기준 CCS로 포집한 이산화탄소의 양은

4,000만 톤이다.[30] CCS는 아직 널리 상용화 되지 않았기 때문에 현재로서는 자연 산림의 탄소 포집 용량이 월등히 높다.[31]

CCS 기술이 적용된 동서발전 포집 장치 플랜트는 640 m^2의 부지가 필요하다. 이는 전국 평균 공시지가(평당 약 672,081원)로 계산 시 부지비용 약 1억 2천만 원이 계산된다. 여기에 2.5톤 CO_2/day를 포집하는 장치의 설치비용은 약 2억 5천만 원으로 총 3억 7천만 원의 비용이 필요하다.

위와 같은 면적에 30년산 은행나무(38.9 g CO_2/day를 포집, 그루당 약 200,000원)를 심는다고 가정한다.31) 이렇게 나무를 심는다고 가정하면, 부지 비용(1억 2천만 원)을 제외한 2억 5천만 원으로 1250그루를 심을 수 있다. 결과적으로 동서발전 포집 장치 플랜트와 동일한 면적과 비용을 사용한다면 나무를 이용한 포집양은 48.625 kg CO_2/day이고, 포집 장치를 이용한 포집양은 2.5톤 CO_2/day이다. 즉 포집 장치를 이용한 이산화탄소 포집이 나무를 통한 포집보다 약 51.4배 많은 양을 포집함을 알 수 있다.

하지만 위의 계산은 단순히 부지면적만 고려한 것으로서, 이산화탄소 포집시 필요한 에너지량 등 여러가지 요소를 고려할 필요가 있다. 실제 CCS 기술 구현을 위해 플랜트 건설, 흡수제 내 이산화탄소 탈착, 시스템 운영 과정 중 투입되는 화학물질 및 에너지 등의 사용에 따라 부가적인 이산화탄소가 배출될 수 있다. 고로, 좀 더 정밀한 비교를 위해서는 생애주기 측면에서의 순이산화탄소 포집량이 고려되어야 한다.

5.2. 비점오염원에 대한 CCS의 효율성

이산화탄소는 크게 지구 온난화에 영향을 미치는 기체이지만, 대기 중에 0.04% 밖에 존재하지 않는다. 하지만 이산화탄소는 대기에 배출되는 온실가스의 대부분을 차지하며 제어가 가능하기 때문에, 이산화탄소 포집을 하면 온실가스의 직접적인 감축이 가능하다. 이러한 이산화탄소의 배출원은 공장과 같은 점오염원으로의 배출과 자동차 매연가스와 같이 비점오염원으로의 배출로 나눌 수 있다. 공장과 같은 점오염원은 집약적인 곳에서 많은 양의 이산화탄소를 포집 가능하여 상대적으로 넓은 공간에서 이산화탄소를 포집해야 하는 비점오염원보다 효율적이다.

국제 에너지 위원회(IEA)에 의하면 현재 1톤당 점오염원 포집 비용은 60~70달러 수준인 반면 스위스의 기업 클라임웍스(Climeworks)에서 발표한 비점오염원 포집 비용은 1톤당 500-600달러에 달한다고 한다. 이처럼 비점오염원 포집은 비효율적이라는 것을 알 수 있지만, 비점오염원에서 발생하는 이산화탄소의 양도 상당하기에 완전한 탄소중립을 위해서는 발전시키고 활용해야 하는 기술이다.

따라서 조금이나마 비점오염원의 이산화탄소 포집 효율을 높이려면, 비점오염원을 점오염원화 시키는 방법이 있다. 예를 들어 자동차의 통행량이 많은 곳에는 많은 양의 이산화탄소가 발생하기 때문에, 포집 장치를 설치하면 조금이나마 효율을 높일 수 있을 것이다.

Table 1. Location, evaluation stage, and predicted carbon storage volume in Korea.[32]

storage location	evaluation grade	predicted storage	storage location	evaluation grade	predicted storage
SWEC	2	about 1.9 billion tons	SNBC	2	about 4 billion tons
	2.5	about 300 million tons		2.5	about 200 million tons
GWBC	2	about 10 billion tons	UBDE	2	about 200 million tons
	2.5	about 400 million tons	BBEC	2	about 140 million tons
SSBC	2	about 20 billion tons	PBEC	2.5	about 27000 tons
	2.5	not analyzed	JBPG	2	about 25 million tons

SWEC, Southern-West area in Eastern Continental shelf; **GWBC**, Gunsan Basin West Sea Continental shelf; **SSBC**, South sea Small Basin Continental Shelf; **SNBC**, South sea Non-oil basin Continental shelf; UBDE, Ulleung Basin deep in the East Sea; **BBEC**, Bukpyeong Basin East sea Coast; **PBEC**, Pohang Basin East Sea Coast; **JBPC**, Janggi Basin Pohang-si Gyeongsangbuk-do.

5.3. 국내 탄소 저장소 존재여부

대한민국의 경우 2000년대 초반 CCS 기술이 주목받기 시작하면서, 이산화탄소 저장 부지로 육상저장소의 활용 가능성도 주목을 받기 시작했다. 이에 2010년부터 한국지질자원연구원은 국내의 육상부지에 대한 이산화탄소 저장소 연구가 진행되었다. 일차적으로 국내의 퇴적층 중 심도가 1 km 이상인 육상 및 연안의 퇴적분지를 검색하여, 경산분지, 태백산분지, 장기분지, 포항분지, 북평분지, 음성분지를 후보 지역으로 선정하였고, 조사를 수행하였다.

경상분지의 경우 백악기에 형성되었고, 사암의 분포지역이 넓어 지중저장의 유망지역으로 간주되었지만, 8% 이상의 공극률을 보이는 사암층의 수가 매우 적어 적합하지 않다고 판단되었다.

태백산분지의 경우, 전기 고생대 퇴적층이며 태백과 영월지역에 분포하고 있다. 이 지역은 지중저장에 적합한 투수율과 공극률을 가지고 있지만, 산악 지역이고 분포 지역이 매우 넓어 정밀 탐사가 불가능하여 적합하지 않다고 판단되었다.

장기분지는 한반도 동남부 지역의 신생대 퇴적분지이며, 저장층의 물성이 적합하고 상부에 화산암으로 이루어진 덮개암까지 존재하여 지중저장에 적합할 것으로 판단되었다. 하지만 저장 용량이 넓지 않아 대규모 저장은 불가능하다.

포항분지는 포항 지역의 육상에서부터 영일만 지역의 해상까지 발달된 신생대에 형성된 퇴적분지이다. 포항분지의 경우 지중저장의 조건을 모두 충족하지만, 역시 대규모 저장소가 아닌 중소규모의 저장에 적합하다고 판단되었다.

결론적으로, 육상에서는 대규모 저장소를 확보하는 것은 어렵다고 판단된다.

반면, 한반도 주변 해역은 대규모 저장용량을 가진 저장소의 존재에 대해 기대를 받았다. 이에 한국석유공사와 한국지

질자원연구원이 수행한 조사에서 8대 유망구조 분포지역인 서북부 미탐사지역은 약 1억 톤 정도의 저장용량을 보유한 것으로 추정되고, 동해 가스전 인근에서는 약 8천만 톤 이상의 저장용량의 보유가 추정되었다.

이러한 평가에도 불구하고 국내의 저장소 존재 여부에 대한 논쟁이 계속되어, 한국지질자원연구원에서 한반도 주변 해역의 저장용량 평가 결과를 다시 발표하였다. 그 결과 서해 및 남해 대륙붕의 저장소 저장용량은 100억 톤 이상의 잠재용량을 갖는 것으로 추정한 바 있다.[32]

위의 **Table 1**에 따르면 2단계(탄성파 탐사자료 분석을 통한 저장용량을 분석) 기준 국내 해양 저장소의 저장용량은 약 200억 톤을 상회한다. 하지만 한반도의 이산화탄소 저장소 저장용량은 2.5단계(석유가스 탐사를 위한 시추공 사료활용) 기준으로 약 3억 톤에서 6억 톤 규모로 평가된다.

2030년까지 이산화탄소 포집 및 저장을 통한 온실가스 감축 목표가 연간 400만 톤이다. 이러한 목표를 달성하기 위해서 최소 약 1억 톤 규모의 저장소가 일차적으로 필요하고, 2030년까지 약 3억 톤에서 6억 톤 규모의 저장소를 확보해야 국가 온실가스 감축 목표 실현에 기여할 수 있다. 위의 발표에 따르면 2.5단계로 평가한 저장용량은 국가 온실가스 감축 목표 실현에 기여할 수 있는 용량이다.

5.4. 탄소 저장의 안전성

이산화탄소 저장기술의 안정성에 가장 중요한 관심사는 저장된 이산화탄소가 육지 또는 지표면 그리고 대기로 누출되는지 여부이다. 만약 이산화탄소의 대량 누출로 인해 공기 중에 농도가 7% 이상으로 증가하게 되거나, 비록 소량이더라도 장기간에 걸친 누출은, 지하수를 오염시켜 인간생활에 영향을 끼친다.[33] 또한 해양환경에 이산화탄소가 누출된 경우 대기에 비해 확산속도가 느리지만, pH변화로 인한 해양 생태계에 영향을 끼칠 수 있다.

IPCC 보고서에 따르면 이산화탄소를 적정 위치에 선정되고, 적정량만 주입하면 수백만 년 동안 갇혀 있을 수 있으며, 1000년 동안 주입된 이산화탄소의 99% 이상을 누출 없이 저장할 가능성이 있다고 말한다.[34] 이의 사례로 유럽에서 가장 오래된 가스전인 노르웨이의 Sleipner 가스전 저장이 성공했다고 결론지었고, 또한, 캐나다의 Weyburn의 경우 이산화탄소 누출가능성을 5000년 동안 1% 미만으로 예측하였다.

하지만 주입 파이프의 부식으로 인한 누출 위험과 정전 시 역류 방지 밸브의 작동으로 인한 압력 발생을 견디지 못하고 파이프가 찢어져 누출될 위험이 존재한다. 2008년 Berkel and Rodenrijs 사건은 파이프 라인에서 나오는 이산화탄소의 누출로 인해 오리의 죽음을 초래한 사례가 있다. 이처럼 모든 상황이 100% 통제되지 않기 때문에 다양한 모니터링을 통해 지속적으로 감시 및 점검을 해야한다.

이산화탄소 저장소 설치에 따라 유도된 지진 가능성의 우려도 제기되고 있다. 2017년 1월 포항 영일만 일대 지중 암석층에 시험주입을 하였으나, 그해 11월 포항지진의 원인으로 지열발전 실증시설이 지목되면서 이산화탄소 주입도 멈추게 되었다. 하지만 이산화탄소 저장소와 지열 발전 시설은 차이점도 있다. 지열발전시설은 지하 약 4 km까지 파이프를 연결한 다음 지반을 파쇄하고 고압의 물을 주입하지만, 이산화탄소 저장소의 주입은 준 고화 상태로 지하 약 800 m까지만 이산화탄소를 주입해 흐르는 지하수에 녹이는 방식이다. 즉 이산화탄소 지중저장 기술의 개념이 층 자체를 파쇄하는 것이 아닌, 유체로 채워진 퇴적층에서 유체를 밀어내면서 초임계상태의 이산화탄소를 주입하는 것이다. 하지만 장시간 대용량의 이산화탄소를 주입하면 저장하는 층의 압력이 크게 상승하여 지진을 유발할 수도 있다. 면밀한 검토를 통해 공학적인 조건에 부합하는 부지를 찾고 적합한 공학기술을 적용하여 운영하고 관리하는 작업이 매우 중요할 것이다.

6. 개선방안

6.1. CCS 관련 법제도적 정비

CCS 기술은 시간이 지나면서 꾸준하게 발전해오고 있지만, 이러한 기술적 움직임에 법제도의 대응이 따라가지 못하는 실정이다. 2010년 국토해양부가 해양관리법 시행법안을 개정하여 '이산화탄소 스트림'을 폐기물로 정의한 것 이외에는 다른 법제도들이 구체적으로 추진되고 있지 않다. 이산화탄소 포집의 경우 포집시설이 발전소시설에 포함되어 있는지, 혹은 발전소시설과는 다른 시설인지에 따라 법의 적용 범위의 차이가 존재하는데, 이에 대한 명확한 규정이 존재하지 않는다. 대한민국의 경우 해양지중저장을 유력한 저장 방법으로 고려하고 있는데, 이에 관련된 법률은 존재하지 않는다. 미래의 CCS 기술의 적극적 도입을 위해서는 CCS 관련 법제도적 정비가 필요하다.

CCS에 법제도 정비에 관한 선도사례에는 독일이 있다. 독일은 포집된 이산화탄소가 '순환경제 및 폐기물법'에 해당하는가에 관하여 의견이 나뉘었는데, 이를 자체적인 CCS법 제정을 통해 해결하였다. 기존에 명시되었던 '순환경제 및 폐기물법' 제2조 제2항 제5호를 다시 규정하여 동법의 적용 범위에서 제외했고, 지중에 오랜 기간동안 처리 목적으로 저장된 이산화탄소 역시 '순환경제 및 폐기물법'에 해당하는 폐기물에서 제외시켰다. 폐기물에서 제외됨으로써 이산화탄소의 저장의 허가를 '이산화탄소 저장법'에 따르게 되었다. 독자적인 CCS 법률을 통해서 기존의 여러 법에 적용되거나 확실히 정립되지 않았던 것을 독일의 CCS 사업에 적합하게 입법하였다.[35]

6.2. CCS 안전성에 대한 사회적 수용성 강화

이산화탄소 포집 및 저장은 영구적으로 이산화탄소를 격리할 수도 있는 장점이 있지만, 이산화탄소 포집 시 암모니아와

같은 각종 유해물질 발생과, 저장 시 유해물질 누출 등에 대한 안정성이 확실히 검증되지 않았다. 이러한 문제 때문에 아직 대중들은 시설 안전에 대한 확신을 갖지 못하였고, 따라서 CCS 기술이 아직 사회적으로 수용되지 못하였다.

CCS 기술의 사회적 수용성 강화 노력은 전세계 각국에서 일어나고 있다. 일본의 Tomakomai 프로젝트는 CCS 기술의 사회적 수용성 강화를 위한 노력의 예로 들 수 있다. 이 사업은 CCS 이해, 즉 사회적 수용성 양성을 목적이 원활하게 수행된 사업이다. 이 사업은 관할 시청에 관련된 정보를 확인할 수 있는 공간 설치를 통해 지역주민들에게 관련 정보를 지속적으로 공개하며, 현장견학, CCS 교육 등 다양한 활동을 통해 사회적 수용성을 강화하였다.[36)]

또한 제도적인 측면에서도 해저에 이산화탄소의 저장을 엄격하게 관리하는 법 제정을 통해 사회적 수용성 강화를 위한 노력을 하고 있다. 이 법을 통해 기름, 유해물질 등의 해양처리를 금지하고, 오직 이산화탄소 스트림 저장만이 환경부 장관의 허가로 진행되고 있다. 또한 저장소에 관한 자세한 검사와, 5년마다 재허가 과정을 통해 자국민들에게 해저 저장에 있어서는 안전하다는 인식을 심어주었다.[37)]

독일의 경우, 2012년에 이산화탄소 저장법이 발효되었다. 이 법안은 시험과 실증 목적의 이산화탄소 저장소만 승인 받을 수 있고, 주정부는 관할 지역 내의 저장시설에 대해 재량권을 갖게 하였다. 또한 이 법안을 통해 계획 수립 절차에 시민참여 절차를 포함시키게 되면서, 대중들은 사업계획과 더불어 저장소의 상태와 규모, 저장기술 정보를 제공받게 되었고, 의견도 표명할 수도 있게 되었다. 독일은 이 법안을 통해 사회적 수용성을 강화한 것이다.[38)]

이처럼 대한민국도 CCS 기술에 대한 사회적 수용성을 강화하기 위해, 계획 확정 절차부터 대중들이 참여하도록 해야 한다. 또, 체계적인 진행상황 감시시스템, 적법한 환경영향평가와 효율적인 환경위해성평가가 진행되도록 규정하여, 평가에 기반한 관리가 이루어지는 체계를 구축해야 한다.[33)] 그 후, 추가적으로 CCS의 안정성을 교육·홍보하면서 안전에 대한 신뢰와 대중의 인식 개선을 위해 노력해야 한다. 추가적으로 시설 설치 이후, 지속적인 모니터링 상황을 대중들에게 공개하고, 주변 거주 주민들에게 누출 징후 발생하면 즉각적으로 알릴 수 있는 시스템을 구축할 수 있도록 해야 한다.[39)]

6.3. 탄소가격제를 통한 이산화탄소 수익구조의 안정화

온실가스로 인한 기후변화를 최소화하기 위해 정부는 CCS 기술의 도입을 본격화하고 있다. 하지만 아직까지 이산화탄소 배출의 방지 및 감축으로 생성되는 수익만으로 CCS 시설의 비용을 충당하지 못하고 있다. 그리고 탄소세 도입으로 탄소배출권에 대한 수요가 계속적으로 일어나, 탄소가격의 안정화가 이루어지지 못하고 있다. 이렇기에 정부는 탄소세와 탄소배출권 거래제도와 같은 탄소가격제를 적극 활용하여 이산화탄소의 수익구조를 안정화시켜야 한다. 하지만 탄소세와 탄소배출권 거래제도는 큰 차이가 있다. 탄소세는 정부가 탄소배출 이전에 가격을 미리 정해 놓는 것이고, 탄소배출권 거래제도는 배출된 탄소의 가격을 시장에 의해 결정하게 만드는 것이다. 또한 탄소배출권 거래제도는 온실가스 감축분에 대한 인센티브가 존재하지만, 할당량 이상 배출 시 초과 비용을 부담해야 한다는 차이점이 존재한다. 이러한 탄소배출권 거래제도는 탄소배출 할당량이 탄소세와 달리 정해져 있지 않으므로 온실가스 감축이 더 효과적일 수 있다.

이러한 탄소배출권 거래제도는 국내에 2015년 도입되었지만 아직까지 국제적 배출권 시장과의 연동이 이루어지지 않고 있다. 그래서 정부는 글로벌 시장 간 연계 및 탄소배출권 거래가 가능하도록 해야 한다. 대한민국은 탄소배출량이 많은 중공업과 같은 산업군을 가진 나라이기 때문에, 탄소 포집 및 저장 기술에 적극적인 투자가 이루어진다면, 감축한 탄소를 통해 다른 나라와의 배출권 거래 수익이 발생할 수 있다. 이렇게 다른 국가와의 연계를 통해 시장이 확대된다면, 배출권 거래제도로 인하여, CCS 기술을 활용한 산업에 대한 투자가 활성화되고, 이에 따라 탄소배출권 가격이 안정화되어 배출권 구매 부담이 줄어들고, 실제 온실효과가 감축되는 효과까지 기대할 수 있다.

7. 전 망

7.1. CCS 기술의 시장전망

국제에너지기구(IEA)는 CCS 기술은 철강, 시멘트 등 중공업에 적용될 수 있는 거의 유일한 탄소중립 실현 방법이라며, CCS 기술 없이 기후변화 대응 목표를 달성하는 것은 불가능하다고 말한다.[40-45)] 실제로 탄소를 줄이는 현실적인 대안이 부족하고, 탄소가 포함된 휘발유, 경유, 플라스틱 등 유기화합물은 인류의 생활 속에 없어서는 안 될 필수품이기 때문에, CCS 관련 시장 규모는 크게 성장될 것으로 기대된다.

전 세계 시장조사 기관 Technavio에 따르면 CCS 시장은 2020년 4,066만 톤에서 연평균 성장률 20.83%로 증가하여, 2025년에는 1억 471만 톤에 이를 것으로 전망된다고 밝혔다 (**Fig. 4**). 또, Marketsand Markets의 조사에 따르면 2020년 전세계 CCS 시장은 약 14억 8,400만 달러에서 2025년 33억 4,700만 달러로 연평균 성장률 45%로 증가할 예정이라고 밝혔다. CCS 기술의 세부항목별 시장규모를 알아보면 포집은 11억 9,390만 달러(2020년 기준)에서 27억 6,470만 달러(2025년)에 이를 것으로 전망되고, 수송은 2억 4,540만달러(2020년)에서 4억 1,350만 달러(2025년), 저장은 4,470만 달러(2020년)에서 1억 6,610만 달러(2025년)에 이를 것으로 전망된다.

산업구조분석을 하기 위해서 사용되는 Five-force model 로 CCS 산업 내 경쟁도나 수익률을 분석할 수 있다(**Fig. 5**). Five-force model은 구매자의 협상력, 공급자들의 협상력, 잠재적

진입자의 위협, 대체재의 위협, 경쟁의 위협 요소로 산업구조를 분석한다.

먼저 구매자들의 협상력을 기준으로 CCS 시장을 판단해 보면, 2020년 기준 구매자의 협상력은 CCS가 신규 기술이고 시장에 경쟁자들의 수가 적기 때문에 낮았다. 따라서 CCS 관련 업체는 높은 시장 성장환경에서 판매 업체가 이윤을 만들 기회가 될 수 있다.

공급자의 협상력은 보통으로 평가되는데, 이는 구매자의 낮은 협상력으로 완화될 수 있으며, 판매 업체는 이러한 점을 활용하여 가격 결정력을 활용함으로써 이윤을 얻을 수 있는 투입 비용을 관리할 수 있다.

잠재적 진입자의 위협은 탄소 포집 및 저장의 국제 시장의 진입 장벽에 기반하고, 보통 상태를 유지할 것으로 예상되기 때문에 변하지 않을 것으로 예상된다.

대체제의 위협은 이산화탄소 포집 및 저장기술 이외의 기술로 이산화탄소를 저감할 수 있는 기술의 진입을 의미하며, 신재생에너지 사용과 같은 것을 예로 들 수 있다. 이 또한 보통으로 평가되었으며, 2025년까지는 동일하게 유지될 것으로 예상하고 있다.

마지막으로 경쟁의 위협은 업체 간의 경쟁을 뜻한다. CCS 시장은 성장가능성이 높고, 시장과 관련된 고정 비용이 높기 때문에 신규업체가 참여하기 쉽지 않아, 기존의 업체 간의 경쟁이 예상되기 때문에 경쟁의 위협은 보통으로 평가되었다.

종합적으로 시장이 성장 중이기 때문에 구매자와 공급자의 교섭력이 상대적으로 약하고, 높은 시장 고정비용으로 잠재적 진입자의 위협이 높지 않으며, 업체 간 경쟁 또한 보통이다. 그래서 마이클 포터의 'Five force model'에 따르면 CCS 시장은 산업 매력도가 있는 시장이라고 할 수 있다.[23]

그래서 국내의 경우 많은 기업들이 CCS 시장에 뛰어들고 있다. SK이노베이션은 한국석유공사의 동해 가스전을 활용한 CCS 사업에 관한 국책과제 협약을 체결하였고, 포스코의 경우 탄소포집기술을 활용하여 저탄소 제철 공정을 하겠다고 밝혔다. 또한 롯데케미칼의 경우 화학 공장에서 발생하는 부생수소에서 탄소를 포집해 블루수소를 생산하겠다고 밝히면서, 기존의 사업모델과 시너지를 낼 수 있는 방안으로 CCS 사업발전에 속도를 내고 있다.[47]

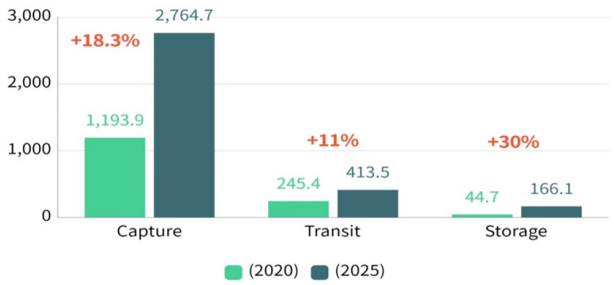

Fig. 4. Comparison of the size of the CCS market in 2020 and 2025.[46]

7.2. CCS 기술을 활용한 감축 목표량

이산화탄소의 배출량이 점점 늘어나는 시점에서, 2050년까지 전세계 배출량은 620억 톤을 향해 갈 것이라고 추측되고 있다. 전세계는 이 620억 톤 중 480억 톤 절감을 목표하고 있다. 이 이산화탄소 감축 목표를 위해 실행되는 계획으로 고효율화기술(공정 및 효율 향상기술) 43%, 신재생에너지기술 38%, CCS 기술 19%를 차지하고 있다. 따라서 오직 CCS 기술만으로 91억 톤 가량을 줄일 수 있을 것으로 예상된다.[15]

유럽위원회(EC)는 전세계가 CCS 기술과 CCU(Carbon Capture and Utilization)를 적극 사용할 경우 2050년에는 연간 6억 톤의 이산화탄소를 포집할 수 있을 것으로 전망했다. 국제에너지기구(IEA)도 2070년에는 연간 100억 톤의 이산화탄소를 CCS 기술과 CCU로 처리할 것으로 예상하고 있다.[48]

대한민국의 경우는 2015년에, 2030년 배출 전망치(851백만 톤)의 37%(318백만 톤) 감축을 목표로 수립하였다. 이중 400만 톤은 CCS를 통해, 630만 톤은 CCU를 통해 감축하고 계획하였다.[49] 따라서, 정부는 2025년부터 30년간 총 1,200만 톤의 이산화탄소 저장을 계획하고, 이를 실행하기 위해 포집·수송 기술개발, 저장 구역 탐사 등을 진행하고 있다.[50]

각 산업별로도 이산화탄소를 감축하기 위한 노력들이 활발히 진행되고 있다. 국제에너지기구(IEA)에 따르면 제조분야에서 시멘트분야의 경우 전체 이산화탄소의 11.8%를 감축하기 위해 노력 중이며, 모든 부분을 CCS 기술로 진행하고 있다. 철강분야도 목표치인 10.8% 중 9%를 CCS 기술을 이용하고 있다. 에너지분야는 에너지 생산 중 발생하는 이산화탄소 감축 목표량 27.6% 중 5.8%를, 석유와 가스 부분은 전체 27.2%를 오로지 CCS 기술만으로 감축하는 것을 계획하고 있다.[51]

8. 결 론

산업화로 인한 대기 중 이산화탄소 농도의 급격한 상승으로 강화되고 있는 온실효과는 지구평균기온 상승이라는 문제를 야기하였다. 한국도 산업화 과정에서 중화학공업과 제조업 같은 이산화탄소 다배출 산업이 발전하였고, 석탄화력발전 비중 또한 높아 세계 10위권의 온실가스 배출 국가가 되었다. 대한민국은 탄소중립을 하려는 세계의 움직임에 발맞춰 상당한 규모의 온실가스 감축을 실행해야 할 의무가 있다.

탄소배출저감을 위한 다양하고 혁신적인 기술들이 개발 중에 있지만[52-55], CCS 기술은 중화학공업과 제조업이 발달한 공장이나, 화력발전소와 같이 직접적으로 이산화탄소가 대규모로 배출되는 곳에서, 이산화탄소 양을 직접적으로 감축할 수 있는 유일한 온실가스 감축기술이다. 그러나 다른 감축 기술에 비해 아직 연구가 많이 이루어지지 않아 기술 상용화 단계에 미치지 못하여, 경제성이 확보되지 못하였고, 저장 과정에서 발생할 수 있는 가스 누출, 지진 유발 등 안전성 문제 해결 또한 진행해야 할 부분이다.

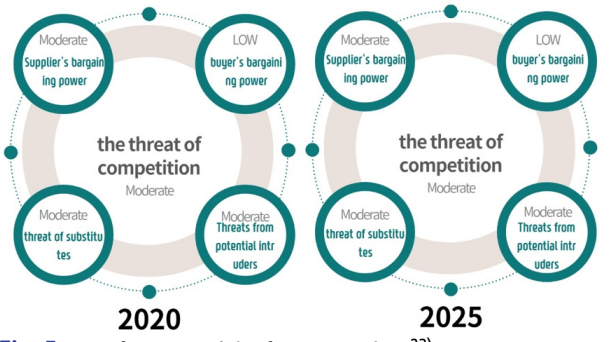

Fig. 5. Five force model of CCS market.[23)]

이산화탄소 포집 분야의 경우 현재는 연소 후 포집 기술이 가장 많이 사용되고 있지만, 순산소 포집 기술이 미래의 고효율 에너지 기술로써 가장 중점적으로 연구되고 있다. 순산소 연소 기술을 사용하면 질소화합물 저감과 이산화탄소 회수라는 두 가지 목적을 함께 해결할 수 있고, 배기 가스양 또한 80% 감소하여 이른바 '굴뚝 없는 발전'을 가능케 할 수 있다. 하지만 아직 산소를 제조하는데 높은 비용과, 새로운 공정을 위한 추가적인 설비가 필요하다는 문제를 가지고 있다. 또한, 발전소의 경우 이산화탄소 제거 공정이 기존의 발전 공정에 추가되어, 내부 전력 사용이 증가하여 발전 효율이 떨어지게 된다는 단점도 존재한다. 이러한 문제점들이 존재하지만, 이산화탄소의 저감에 대한 국제적인 관심은 더욱 드러남에 따라, 정부도 이에 발맞춰 순산소 연소 기술에 대한 지원을 더 늘려야 한다. 아직 이 기술은 이산화탄소를 포집 하는데 많은 비용이 들지만, 충분한 지원을 통해 기술의 발전과 상용화 단계를 거치면, 효과적인 온실가스 저감 기술로 자리매김할 가능성이 있다.

이산화탄소 저장 분야의 경우 세계적으로 지중저장방식을 사용하고 있고, 대한민국의 경우는 해양 지중저장방식을 사용하려 하고 있다. 해양 지중저장방식은 영구적으로 이산화탄소를 격리할 수 있다는 장점이 있지만, 가스누출 및 지진유발 등 안정성 문제와 대규모 저장소 존재여부에 대한 문제가 해결되어야 한다.

이론적으로 이산화탄소 누출은 주입 파이프의 부식으로 인한 누출 등 예측할 수 없는 주변 환경조건에 의해서도 일어날 수 있다. 하지만 지금까지 이산화탄소 저장 실증 운영 중인 국가 모두, 누출의 사례는 없다. 그래서 사업자는 저장소에 관련하여 지속적인 실시간 모니터링 시스템을 구축하고, 만약 누출 징후가 발생 시 지역주민들과 실시간 소통이 가능하도록 해야 한다.

국내의 이산화탄소 대규모 저장소 존재여부에 대한 의문도 있다. 하지만 이는 한국지질자원연구원의 조사에 따라 한반도 주변 해역 대륙붕 지역에 상당한 양의 저장공간이 있는 것으로 파악되었다. 이러한 한국지질자원연구원의 조사에 따른 저장 용량은 2030년까지 국가 온실가스 감축 목표 실현에는 기여할 수 있을 정도의 용량이다. 그렇지만 이는 2030년까지 단기적인 목표로, 탄소 중립이라는 중장기적 목표를 위해서는 정부 차원에서 적극적인 저장 장소의 실증적 탐색이 필요하다. 또한 지중저장의 노하우를 갖고 있는 노르웨이, 미국, 일본 등 선진국과 지속적으로 협력하여, 저장 기술의 발전이 필요하다.

결과적으로 이산화탄소 포집 및 저장 기술의 상용화를 위해서는 적극적인 민간투자자 참여를 통해 시장이 활성화 되어, 경제적 기술적으로 다른 기술들과의 차이를 좁혀야 한다. 하지만 이산화탄소 포집 및 저장 기술의 민간투자는 쉽지 않다. 먼저 이산화탄소의 수익구조가 불충분하고, 이산화탄소 포집 및 저장의 사업자가 동일하지 않을 경우 어느 한쪽에 문제가 생기면 다른 쪽의 사업이 중단될 가능성이 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 정부가 탄소세 활성화, 이산화탄소 포집 및 저장 의무제와 같은 탄소 배출 규제를 통한 이산화탄소 수익구조의 안정화를 이루어야 한다. 또한 이산화탄소 포집 및 저장의 사업자가 다를 때 상호의존도를 낮추기 위해 정부가 먼저 안정된 다양한 포집원과 연결할 수 있도록 저장 인프라를 지원하고, 통합관리를 위한 정책적인 지원도 병행되어야 한다. 이를 통해 하나의 종합시스템을 구축하여 기술 상용화를 이루어 낸다면, 전세계 이산화탄소 포집 및 저장 시장을 선점하고 지구온난화 대응에 선도적인 역할을 하게 될 것이다.

마지막으로 정부가 CCS 기술에 대한 독립적인 예산편성을 이루어야 한다. 현재는 CCS 기술에 대한 지원 비용은 신재생에너지 지원 비용에 포함되어, 태양광·풍력 발전에 많은 지원 예산이 편성됨에 따라 상대적으로 CCS 기술에는 적정한 지원이 불가능한 실정이다. 태양광 및 풍력 발전과 같은 신재생에너지도 중요하지만, 아직은 화석 연료 이용에 집중되어 있으므로, CCS 기술이 지금 당장 온실가스 저감에 훨씬 효과적이다고 볼 수 있다. 따라서 신재생에너지와 저탄소 연료로의 에너지전환의 예산 편성을 독립시켜 CCS의 지원을 증가시킬 필요가 있다. 이러한 CCS 기술과 함께 포획한 이산화탄소를 물리, 화학, 생물학적 공정을 통해 고부가 가치 제품으로 전환할 수 있는 CCU 기술 또한 적극적으로 투자하여 탄소 저감을 공동으로 실천하여, 완전한 탄소 자원의 선순환을 이루어야 한다.

Acknowledgement

이 연구는 대한민국 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단 중견연구자지원사업(NRF-2021R1A2C1013989)의 지원으로 수행되었습니다. 본 논문의 내용은 https://youtu.be/23Uh4IcuFzg 유튜브 영상으로도 감상할 수 있습니다.

References

1. S.P. Jung, Practical implementation of microbial fuel cells for

bioelectrochemical wastewater treatment, Journal of the Korean Society of Urban Environment, 13(2), 93-100(2013).
2. B. Koo, S.P. Jung, Trends and perspectives of microbial electrolysis cell technology for ultimate green hydrogen production, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 44(10), 383-396(2022).
3. S. Son, S.P. Jung, Trends and prospects of sediment microbial fuel cells as sustainable aquatic ecosystem remediation technology, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 44(11), 468-492(2022).
4. S. Son, Y. Kim, M. W. Kim, S.P. Jung, Recent trends and prospects of microbial fuel cell technology for energy positive wastewater treatment plants treating organic waste resources, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 43(10), 623-653(2021).
5. S. Park, W. Kim, M. Kim, Y. Kim, S.P. Jung, Trend of treatment and management of solar panel waste, Journal of Korea Society of Waste Management, 38(3), 200-213(2021).
6. J. Park, H. Jang, S. Choi, R. Jung, S.P. Jung, Current and prospects of waste heat utilization and cooling technology in data centers, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 44(11), 493-503(2022).
7. N. Ha, S. Oh, S. Lee, Y. Jung, J. Choi, S.P. Jung, Institutional management plan for hazardous chemical substances in textile products, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 43(5), 390-405(2021).
8. H. Chai, Y. Choi, M. Kim, Y. Kim, S. S.P. Jung, Trends of microbial electrochemical technologies for nitrogen removal in wastewater treatment, Journal of the Korean Society of Water and Wastewater, 34(5), 345-356(2020).
9. Joint ministries, 2030 National Greenhouse Gas Reduction Goals (NDC) Raised Plan, Joint ministries, Seoul, Korea, pp. 2-11(2021).
10. H. H. Kim, J. H. Bae, J. Y. Jeong, Technology for capturing, storing, and utilizing carbon dioxide, KISTEP Technology Trend Brief, Eumseong, Koera, pp. 3-4(2018).
11. RENEWABLES 2020 GLOBAL STATUS REPORT Home page, https://www.ren21.net/gsr, October(2021).
12. Korea Home Page, Annual emissions by greenhouse gas, http://www.climate.go.kr, October(2021).
13. Greenhouse gases only 0.04% of the air hit the Earth's vitals, https://www.khan.co.kr/science/science-general/article/201902141849001, October(2021).
14. M. Y. Bae, Introduction to capture, utilize and store carbon dioxide, The Korean Society of Mechanical Engineers, 61(6), 37-41(2021).
15. S. H. Lee, Carbon dioxide capture and storage technology status and policy trends as a key green technology for greenhouse gas response and low carbon green growth, KISTEP, Eumseong, Korea, pp. 6-15(2010).
16. Ministry of Science and ICT, A road map for technological innovation (CCU) for capturing and utilizing carbon dioxide, Seoul, Korea, pp. 5-16(2021).
17. Y. Jeon, Technology trends and business feasibility analysis for carbon capture, storage, and utilization, KOSEN Report, Seoul, Korea, pp. 1-6(2018).
18. Technology using dry adsorbent, Journal of the KSME, 53(6), 26-30(2013).
19. National Environmental Information Center, Patent trend of capturing and storing carbon dioxide, Economic and Environmental Geology, 50(5), 389-400(2010).
20. C. G. Lee, Advances of carbon capture technology, Korean Industrial Chemistry News, 12(1), 30-42(2009).
21. S. Y. Chae, S. J. Kwan, Analysis of the latest technology trends in carbon dioxide recovery and storage, Journal of Marine Environmental Safety, 18(6), 617-625(2012).
22. Y. Kwon, Review of CO2 storage projects and driving strategy of CO2 storage program in Korea, Journal on electric power and energy, 2(2), 167-185(2016).
23. New Growth Industry Technology Canada, Promising Carbon Collection and Storage Project, https://dream.kotra.or.kr/kotranews/cms/news/actionKotraBoardDetail.do?SITE_NO=3&MENU_ID=410&CONTENTS_NO=1&bbsSn=242&pNttSn=101209, October(2021).
24. MIT university Carbon & Sequestration Technologies, http://sequestration.mit.edu/tools/projects/century_plant.html, December(2022).
25. MIT university Carbon & Sequestration Technologies, http://sequestration.mit.edu/tools/projects/enid_fertilizer.html, December(2022).
26. MIT university Carbon & Sequestration Technologies, http://sequestration.mit.edu/tools/projects/lula.html, December(2022).
27. MIT university Carbon & Sequestration Technologies, https://sequestration.mit.edu/tools/projects/lula.html, December(2022).
28. M. H. Go, Ministry of environment, Korea environmental industry and technology institute, pp. 3-11(2014).
29. J. Y. Lee, The field of carbon dioxide capture, Ministry of Trade, Industry and Energy Get 'the Advanced Technology- Product Certificate Home page, http://www.epj.co.kr/news/articleView.html?idxno=25235, October(2021).
30. World Food and Agriculture Organization(FAO), https://hemiliar.tistory.com/396#:~:text=*FAO%EC%9D%98%202020%EB%85%84%20%EB%B0%9C%ED%91%9C,1%ED%97%A5%ED%83%80%EB%A5%B4%EB%8B%B9%20%EC%95%BD%203024, December(2022).
31. E. J. Park, S. H. Jwa, Quantification of CO2 uptake by urban trees and greenspace management for C sequestration, Gyeonggi research institute, 1(1), (2009).
32. A review of CO2 storage capacity and overseas business potential in the Korean Peninsula and surrounding waters, https://gscaltexmediahub.com/energy/column-co2-storage-capacity/, October(2021).
33. B. M. Kim, T. S. Choi, J. S. Lee, Y. G. Park, S. G. Kang, E. C. Jeon, Evaluation system of environmental safety on marine geological sequestration of captured carbon dioxide, Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy, 16(1), 42-52(2013).
34. K. S. Park, J. Y. Lee, German law on carbon dioxide capture and storage, European Constitutional Research, 16(1), 339-376(2014).

35. K. S. Park, J. Y. Lee, German law on carbon dioxide capture and storage, European Constitutional Research, 16(1), 339-376 (2014).
36. G. S. Kim, Legal foundations and improvements for CCS demonstration and CCUS commercialization, Journal of corporation and innovation, 44(2), 91-109(2021).
37. Seoul National University Industry-Academic Cooperation Foundation, study on legislations and technological standards of CCS for its implementation in korea, Seoul, Korea, (2011).
38. J. M. Cha, K. A. Lee, EU Legal Framework for the geological storage of carbon dioxide and its challenges, Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 53(4), 348-363(2016).
39. H. S. Yim, Applicability and utility of the precautionary principle in developing measures for CCS risk management, Journal of Environmental Policy, 13(1), 3-23(2014).
40. A. Amrut Pawar, A. Karthic, S. Lee, S. Pandit, S.P. Jung, Microbial electrolysis cells for electromethanogenesis: Materials, configurations and operations, Environmental Engineering Research, 27(1), 200484(2022).
41. M. Quraishi, K. Wani, S. Pandit, P. K. Gupta, A. K. Rai, D. Lahiri, D. A. Jadhav, R. R. Ray, S.P . Jung, V. K. Thakur, R. Prasad, Valorisation of CO2 into value-added products via microbial electrosynthesis (MES) and electro-fermentation technology, Fermentation, 7(4), 291(2021).
42. S. Jung, Impedance Analysis of Geobacter sulfurreducens PCA, shewanella oneidensis MR-1, and their coculture in bioeletrochemical systems, International Journal of Electrochemical Science, 7(11), 11091-11100(2012).
43. H. Kang, E. Kim, S.P. Jung, Influence of flowrates to a reverse electro-dialysis (RED) stack on performance and electrochemistry of a microbial reverse electrodialysis cell (MRC), International Journal of Hydrogen Energy, 42(45), 27685-27692(2017).
44. N. Savla, M. Guin, S. Pandit, H. Malik, S. Khilari, A. S. Mathuriya, P. K. Gupta, B. S. Thapa, R. Bobba, S. P. Jung, Recent advancements in the cathodic catalyst for the hydrogen evolution reaction in a microbial electrolysis cells, International Journal of Hydrogen Energy, (2022).
45. S. Son, B. Koo, H. Chai, H. V. H. Tran, S. Pandit, S.P. Jung, Comparison of hydrogen production and system performance in a microbial electrolysis cell containing cathodes made of non-platinum catalysts and binders, Journal of Water Process Engineering, 40, 101844(2021).
46. INNOPOLIS, Global market trend report(Carbon capture/utilize/storage market), Seoul, Korea, pp. 6-7(2021).
47. K. Choi, The 30 trillion market has opened… SK Lotte Hyundai heavy Industries is on the move, https://www.mk.co.kr/news/stock/10178299, August(2021).
48. H. Lee, "By 2030, mark 14 products that are collected and used for delivery"… 6.3 million ton target, https://www.dongascience.com/news.php?idx=47283, June(2021).
49. Y. Kwon, CCUS industry promotion and low carbon power development strategy, Gongju university, (2020).
50. Money Today, "Buy CO2 from the Donghae Gas Field"… 12 million tons in total over 30 years, https://news[.mt.co.kr/mtview.php?no=2021111809404918183, November(2021).
51. A new era of CCUS Home Page, https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions/a-new-era-for-ccus, November (2021).
52. N. Savla, S. Pandit, N. Khanna, A. S. Mathuriya, S. P. Jung, Microbially powered electrochemical systems coupled with membrane-based technology for sustainable desalination and efficient wastewater treatment, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 42(7), 360-380(2020).
53. B. Koo, S.P. Jung, Characterization of impedance and polarization of carbon-felt bioanodes and activated-carbon cathodes in a continuous-flow microbial fuel cell, Journal of the Korean Society of Urban Environment, 18(2), 177-191(2018).
54. B. Koo, H. Kang, T. Nam, E. Kim, S. Son, S.P. Jung, Performance enhancement of a microbial fuel cell by physico-chemical treatments of activated-carbon catalyst of an air cathode, Journal of the Korean Society of Urban Environment, 16(4), 431-439 (2016).
55. B. Koo, S.P. Jung, Recent trends of oxygen reduction catalysts in microbial fuel cells: a review, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 41(11), 657-675(2019).

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors and Contribution Statement

Sanghyeok Lee

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, student, ORCID 0000-0002-8763-270X: Writing – original draft.

Mugung Lee

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, student, ORCID 0000-0002-8768-2280: Writing – original draft.

Woong Jeon

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, student, ORCID 0000-0002-6593-4352: Writing – original draft.

Minseok Son

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, student, ORCID 0000-0003-3293-9015: Writing – original draft.

Sokhee P. Jung

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Associate Professor, ORCID 0000-0002-3566-5649: Funding acquisition, Project administration, Resources, Supervision, Writing – review and editing.