

CCU 기술 국내외 연구동향

김학민 · 나인욱[†]

한국과학기술연구원 환경복지연구센터
02792 서울 성북구 화랑로 14길 5
(2019년 2월 28일 접수, 2019년 4월 24일 수정본 접수, 2019년 5월 4일 채택)

Brief Review on Carbon Dioxide Capture and Utilization Technology

Hak Min Kim and In Wook Nah[†]

*Korea Institute of Science and Technology, Environment, Health and Welfare Research Center,
5, Hwarang-ro 14-gil, Seongbuk-gu, Seoul, 02792, Korea*

(Received 28 February 2019; Received in revised form 24 April 2019; accepted 4 May 2019)

요 약

“파리 협정”을 통해 출범된 신기후체제에 따라 세계 각국에서 온실가스를 감축하기 위한 정책과 연구가 수행되고 있으며, 우리나라에서도 온실가스 감축을 위한 대책 마련이 시급한 실정이다. IEA 보고서에 따르면 에너지 부분의 CO₂ 배출량이 전체 배출량의 2/3에 해당하기 때문에 온실가스 감축을 위해서는 단기적으로는 화석연료 사용을 대체할 수 있는 신재생에너지의 생산과 적용 기술 개발과 에너지효율개선 기술 도입이 최선이며, 장기적인 관점에서는 온실가스를 포집하고 활용하는 온실가스 포집 및 활용(CCUS, Carbon Capture Utilization and Storage) 기술 개발이 필수적이다. CCUS 기술은 온실가스를 직접적으로 감축시키는 기술로 활발하게 연구되고 있는 기술이다. 본 논문에서는 다양한 CCUS 기술 개요 및 연구 현황과 향후 전망에 대해서 살펴보았다.

Abstract – The policies and researches for the reduction of greenhouses gases have been performed according to “Paris Agreement”. Because South Korea is the 6th biggest greenhouses gas emitter in the world, the Korea government has prepared the strategies for the reduction of greenhouse gases. The development of CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage) technology is necessary to reduce greenhouse gases. Therefore, the CCUS has been studied by many countries in the world. In this work, the trends of CCUS technologies R&D has been shortly investigated.

Key words: Greenhouse gases, Carbon capture Utilization, Carbon capture storage

1. 서 론

한국은 세계 6위의 온실가스 배출국으로 신기후체제(파리협정)의 출범에 따라 적극적인 국가적 전략 수립이 시급한 실정이지만 온실가스를 대량으로 발생시키는 국내 발전 철강 등 산업에 적용이 가능한 기술 확보가 미흡한 실정이다. 온실가스의 감축을 위해서 신재생에너지의 생산 및 적용 기술에 대한 관심이 증대되고 있으나, 2030년까지 신재생에너지의 획기적 보급 및 확대가 어려운 상황에서 온실가스의 추가 감축은 발전 원가 및 전기요금 인상을 초래하여 산업 활동을 위축시킬 수 있다. 따라서 온실가스의 감축을 위한 Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

CCUS 기술은 화력발전, 철강, 정유, 시멘트와 같은 배출원에서 발생하는 CO₂를 다양한 기술을 통해서 포집하고(Carbon Capture and Storage, 포집기술), 포집된 CO₂를 산업적 목적으로 직접 사용 또는 전환 과정(Carbon Capture Utilization, 활용기술)을 거쳐서 대기로부터 오랜기간 동안 안정적으로 격리하는 기술이다. 따라서 CCUS 기술은 CO₂를 직접적으로 감축시킬 뿐만아니라 유용한 화학 물질을 합성할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다[1-3].

현재 온실가스 감축을 위한 다양한 CO₂ 포집기술 및 활용기술 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 국내외에서 진행 중인 주요 CO₂ 포집 및 활용 기술에 대한 개요와 연구 동향에 대해 소개하고자한다.

2. 본 론

2-1. CCUS 기술 개요

CCUS 기술은 크게 CO₂를 포집하는 기술과 포집된 CO₂를 활용

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: niw@kist.re.kr

‡이 논문은 연세대학교 설용건 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

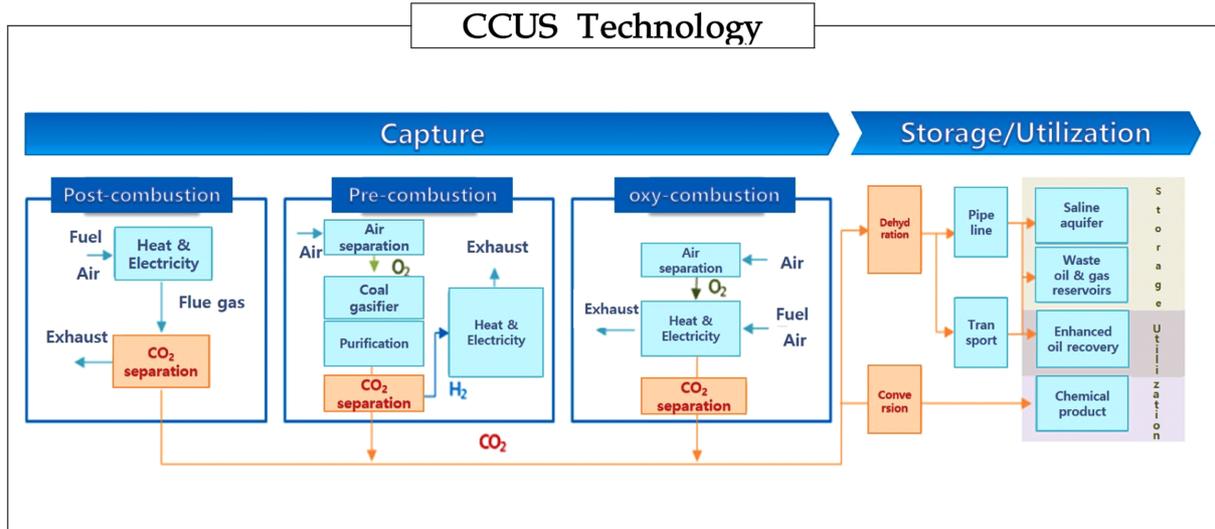


Fig. 1. The technologies of carbon capture Utilization and Storage.

하는 기술로 구분할 수 있다. 포집기술에는 흡착, 흡수, 막분리법 등 다양한 기술이 있으며, 연소기술의 방법에 따라 연소전, 연소중 및 연소후 포집기술로 구분된다. CO₂ 활용기술에는 압축 정제된 CO₂를 직접 이용하는 기술(비전환)과 화학적 혹은 생물학적 전환과정(전환)을 거쳐 활용하는 기술이 있다. 화학적 전환은 주로 공정축매 및 광전기화학축매 방식 등을 통해 CO₂를 자원화하는 기술로 CO₂를 저장하는 동시에 다양한 고부가 화합물로 전환하여 제품화하는 기술이다. 생물학적 전환의 경우, 효소 또는 광전기 공정에 식물모방(인공) 광합성 등을 이용하여 CO₂를 바이오 자원화하는 기술이다. 비전환의 경우, 포집한 CO₂를 별도의 전환없이 그대로 활용하는 기술로, CO₂ 가스 판매, 용접가스 활용, 농작물 주입 등으로 이용이 가능하다.

2-1-1. CO₂ 포집기술

CO₂ 흡착은 다양한 흡착제를 통해서 수행되며 흡착제의 종류는 크게 물리적 흡착제, 화학적 흡착제로 나뉜다.

물리적 흡착제로는 다공성의 표면적이 넓은 활성탄, 탄소나노튜브, 제올라이트, 메조 세공 구조의 실리카, Metal-organic framework (MOFs)가 연구되었다. 활성탄은 낮은 비용, 높은 열적 안정성, 수분에 대한 민감도가 낮은 장점이 있지만 고압 조건에서는 한계가 있다. 압력을 감소시키기 위해서는 50~120 °C의 반응온도가 필요하고 해당 조건에서는 선택도가 상대적으로 낮다[4-6]. 따라서 최근 연구는 CO₂ 흡착량과 선택도를 높이는 두 가지의 방향에 초점을 맞춰서 수행되고 있다. 제올라이트의 CO₂ 흡착 효율은 크기, 전자 밀도, 양이온의 조성 등에 영향을 받는다고 보고되었다[7-10]. 대부분의 제올라이트 연구는 결정 구조, 높은 표면적, 입체 세공 구조 등에 초점을 맞추었으며, 일부 연구에서는 알칼리 혹은 알칼리토 양이온으로 이온 교환하여 제올라이트의 CO₂ 흡착 능력을 증가시켰다[9]. 메조 세공 구조의 실리카는 높은 표면적과 세공 부피, 균일한 세공 크기, 높은 열적 안정성 및 기계적 안정성으로 CO₂ 흡착에 유망한 후보물질이지만 CO₂ 흡착 능력이 낮은 것으로 나타났다. MOF의 경우 최근에 주목받고 있는 물질로 높은 표면적과 제어가 가능한 세공구조의 장점을 가지고 있다[11-13]. MOF는 연구실 규모의 연구에서는 높은

CO₂ 흡착 능력이 보고되었으나, 더 많은 연구가 필요한 실정이다.

화학적 흡착제는 아민계 물질을 다공성 물질에 첨가한 흡착제와 알칼리금속 및 알칼리토금속 산화물 흡착제가 연구되었다. 아민계 물질을 첨가한 흡착제의 경우 낮은 온도에서 재생이 가능하다는 장점을 가지고 있으나, CO₂ 흡착량이 낮고 경제성이 떨어져서 상용화하기 어려운 단점을 가지고 있다. 따라서 진행되는 연구는 다공성 물질에 아민계 물질의 담지량을 높이는 방법, N 원자가 많은 아민계 물질을 사용하는 방법, 아민계 물질을 효과적으로 첨가하는 방법 등이 주로 연구되고 있다[14-17]. 알칼리금속 및 알칼리토금속 산화물의 경우 알칼리성 물질이기 때문에 산성가스인 CO₂ 포집에 용이하여 연구되고 있다[18-21]. 대표적으로 리튬, 칼슘, 마그네슘 산화물 등이 연구되고 있다.

대표적인 CO₂ 흡수기술은 Monoethanolamine (MEA)을 활용하여 “wet scrubbing” 방식으로 CO₂를 carbamate 형태로 포집하고 100~140 °C에서 재생하는 기술이다. 이 방법은 다양한 공정에 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있으나, 용매의 회수와 배연가스 중의 잔류 산소로 인한 부식, 불순물(SO₂, NO_x 등)으로 인한 용매의 화학적 분해로 인한 효율 저하의 문제점을 가지고 있다. 추가적으로 Diethanolamine (DEA)와 같은 이차 아민을 사용하면 반응열이 MEA보다 낮기 때문에 낮은 온도에서 재생이 가능한 장점을 가지고 있으나, 포집 효율이 MEA에 떨어져서 실제 공정 적용에서는 일차 및 이차 아민을 혼합하여 사용한다[22].

막을 활용하는 방법은 가스 분리가 쉽고 열에너지 소모가 적은 장점이 있어 검토되었다. 분자체, 금속산화물 형태의 무기물 막, 폴리이미드, 폴리 실론의 고분자 막, 섬유 물질 등의 다양한 분리막이 CO₂ 포집에서 연구되었다[23,24]. 그러나 막을 활용하는 방법은 높은 압력이 요구되기 때문에 이를 위한 에너지 소모가 큰 단점을 가지고 있다.

2-1-2. CO₂ 활용기술

대표적인 CO₂ 비전환 활용기술은 포집된 CO₂를 활용하여 석유, 천연가스 등의 탄화수소가 갇혀있는 지층에 주입하여 추가적인 화석연료 자원을 시추하는 기술이다[25-27]. 이 기술은 화석연료가 저

장된 지층의 특성에 크게 영향을 받기 때문에 고려할 부분이 많지만 CO₂를 활용하여 화석연료를 확보할 수 있기 때문에 효율을 증진시키는 연구가 꾸준히 진행 중이다.

CO₂의 화학적 전환기술은 최종 목표 물질의 용도에 따라서 연료 전환기술, 화학물질 전환기술로 나눌 수 있다. CO₂를 전환시켜 합성할 수 있는 연료로는 메탄, 메탄올, 합성가스 등이 있다. CO₂를 연료로 전환시키는 대표적인 기술은 CO₂ 수소화, 이산화탄소 개질 방법이 있다[28-32]. CO₂의 수소화 반응의 경우 수소화 반응에 필요한 수소를 화석연료로부터 생산할 경우 CO₂ 배출량이 감소한다고 볼 수 없기 때문에 태양열, 태양광, 풍력, 바이오매스 등의 재생에너지를 통한 수소생산으로 이를 해결하는 연구가 수행되었다 [33]. 이산화탄소 개질 반응에서는 Pt, Pd, Ir 등의 다양한 귀금속 촉매 개발되었고, 경제적인 관점에서 Ni계 촉매 연구가 활발히 진행되었다. 이산화탄소 개질 방법의 경우 메탄과 이산화탄소가 매우 안정적인 물질이며, 강한 흡열반응이기 때문에 높은 반응열을 필요로 한다. 이에 따라서, 활성물질인 Ni의 소결과 메탄의 직접분해에 의한 탄소침적으로 촉매의 비활성화가 쉽게 발생하는 문제점 있다. 이를 극복하기 위해서 다양한 연구가 수행 중이다. 탄소침적 저항성을 증진시키기 위해서 조촉매로 알칼리금속, 알칼리토금속을 추가한 연구가 수행되었고, 이들은 촉매의 염기도를 높여서 이산화탄소의 흡착 및 해리 능력을 높여 탄소침적을 억제하는 산소 원자의 공급을 높인다고 알려졌다. 또한 산소 저장능력이 뛰어난 CeO₂를 첨가하여 탄소침적을 억제하는 연구도 수행되었다. Ni과 강한 상호작용을 하는 MgO, Al₂O₃와 같은 담체 및 조촉매를 활용한 연구가 수행되어 Ni의 소결 및 탄소침적 저항성을 증진시킨 연구가 수행되었다. 이외에도 탄소침적을 억제하기 위해서 소량의 수증기를 공급하는 연구가 수행되었다. 수증기는 이산화탄소에 비해서 쉽게 분해, 해리되므로 수증기로부터 생성된 산소 원자가 탄소침적을 억제한다. 또한, Ni 촉매의 활성점 중 일부를 황으로 전처리하여 탄소침적 반응을 억제하는 SPARG (Sulfur Passivated Reforming) 연구도 수행되었다.

CO₂를 원료물질로하여 다양한 화학물질의 합성이 가능하며 대표적으로 우레아(160 Mt/year), 무기탄소화합물(60 Mt/year), 폴리우레탄(18 Mt/year), 아크릴 산 및 아크릴 레이트(10 Mt/year), 폴리탄산염(4 Mt/year) 등이 생산되고 있다. 포집된 이산화탄소로 생산이 가능한 유기탄소화합물(dimethyl carbonate, diallyl carbonate, diethyl carbonate, ethylene carbonate, propylene carbonate, styrene carbonate 등)의 경우 농약, 고분자, 윤활제, 코팅 등에 사용될 수 있는 화학원료물질이다[34,35]. 이와 같이 에폭사이드와 이산화탄소를 활용한 고리형 카보네이트 합성 반응 연구에서는 좀 더 경제적인 조건에서 반응이 진행될 수 있도록 촉매 개발에 초점을 맞추고 있다. 촉매 개발과 더불어 유기용매를 사용하지 않으면서 반응계 내에서 이산화탄소의 용해도를 높이기 위한 연구들도 수행되고 있다. 고리형 카보네이트 합성촉매는 균일계 촉매, 비균일계 촉매로 나뉜다. 균일계 촉매인 금속할로겐염은 주로 산업적으로 고리형 카보네이트를 합성할 때 이용되고 있다. 금속 할로겐염은 반응 후에 고리형 카보네이트에 용해되어 정제과정 중 석출되지 않기 때문에 촉매의 재활용이 용이하다. Sn, Ni, Na, Ca, Zn, Cu, Ru, Pd 등의 금속들을 포함한 금속할로겐염 촉매를 사용할 경우, 효율을 증진시키기 위하여 암모늄염, 포스포늄염과 결합하여 사용하기도 한다. 또 다른 균일계 촉매인 4급 암모늄염의 경우, 다양한 에폭사이드를 고리형 카보네이트로 전환시키는데 탁월하다고 보고되었다. 대표적으로 tetrabutylammonium

bromide는 친핵성을 가지고 있기 때문에 에폭사이드의 개환 반응에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 음이온의 친핵성이 클수록 반응은 높은 활성을 나타내는데 브롬 음이온에 의해서 에폭사이드가 개환되고, 암모늄 양이온이 산소의 비공유 전자쌍과 결합하여 고리화반응이 용이하게 진행되는 것으로 예측된다. 프탈로시아닌, 살렌 복합체들 또한 대표적인 고리형 카보네이트 합성용 균일계 합성 촉매이다. 반응성을 높이기 위해서 금속할로겐염과 함께 사용하며 이 경우에는 반응성이 매우 높은 알루미늄과 크롬을 이용한다. Metallophthalocyanine이 고리형 카보네이트 및 폴리카보네이트 합성 촉매로서 연구되고 있다. 또한 대칭성을 가지는 살론 리간드들은 다양한 금속 이온을 수용할 수 있는 공간을 가지기 때문에 Cr, Co, Al 금속이온과 결합하여 촉매로 이용하고 있다. 비균일계 촉매는 균일계 촉매와 비교하였을 때, 촉매 재사용을 위해서 여과 과정만 필요하기 때문에 친환경적인 요소를 지닌다. 또한 공정적으로도 촉매의 안정성이 높고 반응기 설계가 용이한 장점을 가진다. 그러나 고압 및 고온의 반응 조건, 낮은 반응 선택도와 같이 개선해야 할 부분이 남아 있다. 대표적인 비균일계 촉매인 금속 산화물 촉매의 경우 MgO, CaO, ZnO, ZrO₂, La₂O₃, CeO₂ 등이 고리형 카보네이트 합성 반응에 활성을 나타내었다고 보고되었고, 이들 촉매의 제조는 경제적이고 간단하다는 장점을 가진다. 그러나 높은 효율을 위해서는 산점과 염기점 간의 균형이 중요하여 MgO, SmOCl와 같은 양친매성 metal oxide는 높은 활성을 나타내었다. 금속 산화물 촉매 이외에도 고정화분자촉매가 사용되고 있다. 고정화 분자촉매란 촉매 반응에 활성을 나타내는 분자를 다공물질이나 특정한 특성이 강화된 고체상에 결합 또는 부착시킨 촉매를 말하며, 고리형 카보네이트 합성 반응에서 선택도를 높이고 연속식 공정에 유용한 촉매가 될 수 있다. 주로 고체 실리카에 활성분자를 고정화하는 방법이 이용된다. 최근에는 이온성 액체를 카보네이트 합성 반응에 촉매로 적용한 연구도 수행되고 있다. 이온성 액체의 경우, 유기 음이온과 무기 양이온의 염으로 구성한다. 이온성 액체의 가장 큰 장점은 휘발성과 독성이 없기 때문에 친환경적이고 수많은 양이온과 음이온의 조합을 통해서 다양한 응용이 가능하다는 점에 있다.

CO₂를 생물학적으로 전환은 자연계 물질순환의 원리를 이용하는 친환경적인 방법이며, 상온과 상압에서 이루어지기 때문에 에너지 소요가 화학적 전환에 비해 낮다는 장점을 가지고 있다. 또한 미세조류를 활용할 경우, 요구되는 부지의 면적이 작고, 투자비용과 운전 비용이 화학적 전환에 비해 상대적으로 적다. 다만, 생물학적 전환은 화학적 전환보다 효율이 낮고 처리속도가 느리기 때문에 CO₂를 단기간에 대량 처리하기 어려운 문제가 있다[36].

2-2. CCUS 시장 분석

각 국이 온실가스 감축목표를 충실히 이행할 경우, 30년 온실가스의 배출량 규모는 전세계 56,700 Mt, 한국 851 Mt이 될 것으로 추정된다(출처: UNFCC 종합보고서 2015). CCU 기술을 이용한 온실가스 감축효과는 전 세계 온실가스 배출량의 10%에 해당하는 연간 3,700 Mt로 추정된다. CCUS 기술 시장은 전 세계적으로 시장이 형성되는 단계로써, CO₂ 배출권 시장의 확대와 더불어 CCUS 기술 시장도 성장이 지속될 것으로 전망되고 있다. CCUS 기술 관련 세계 시장 규모는 20년 약 330억달러에서 25년 약 727억달러 규모로 증가할 것으로 예측되며, CCUS 기술을 이용한 CO₂ 저감량을 77~2,200 Mt으로 예상하고 있다. CCUS 기술 국내시장 규모는 20년에 44억달러

에서 연평균 17.1% 성장하여 25년에는 97억달러가 될 것으로 전망되고 있다. 또한 국내 CO₂ 배출량은 연평균 1.33% 증가하여 20년 782백만톤, 30년 851만톤에 이를 것으로 예상되기 때문에 CCUS 시장의 성장 또한 가속화 될 것으로 전망된다.

2.3. CCUS 연구 개발 동향

2-3-1. 해외 연구 개발 동향

현재 운영중인 CO₂ 포집·저장 대형 통합 프로젝트는 미국, 캐나다, 브라질, 유럽 등에서 총 13개 실증단계 진행 중이며, 주로 원유 회수 목적 및 지중 CO₂ 저장 방식이다. CO₂ 전환기술은 미국, 독일에서 연구개발에 많은 투자를 하고 있다. 특히, 독일에서 정부의 지원과 함께 CO₂ 활용기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, Bayer, Cyno Biofuels, BASF사에서 CO₂ 전환시켜 다양한 연료를 생산하는 프로젝트를 진행 중이다. 미국 또한 Department of Energy (DOE)의 지원을 통해 이산화탄소를 연료 및 화학제품으로 전환시키는 프로젝트가 수행되고 있다. 이외에 영국, 호주, 일본, 중국에서도 이산화탄소 활용 연구가 진행 중이다.

CO₂의 활용 연구는 크게 전환 연구와 비전환 연구로 구분하며, 탄산광물화, 화학물질(폴리머, 메탄올, 개미산) 생산, 미세조류 배양하는 연구가 전환 기술의 대표적인 연구이다. 탄산광물화 연구는 천연 광물 혹은 산업폐기물을 이용하여 CO₂를 포집하고 이를 건축 재료, 미세조류 배양 공급원 등으로 활용하는 연구이다. 미국 Calera社에서 석탄재를 알칼리원으로 활용하여, CO₂를 흡수시킨 시멘트계 재료를 성공적으로 생산 중이다. 미국 Skyonic社는 산업용 폐기물을 이용하여 시멘트공장 배기가스로부터 연간 75,000 톤의 CO₂를 포집하고 143,000톤의 중중(탄산수소나트륨) 생산을 추진 중이며, 이를 미세조류 배양 공급원으로 활용할 예정이다. 미국, 아이슬란드,

캐나다 등에서 CO₂를 화학적 전환과정을 통해서 고부가가치의 화학물질(폴리머, 메탄올, 개미산)을 생산하는 연구를 수행하고 있으며, 메탄올의 경우 공정 개발에 성공하여 현재 생산중에 있다. 고부가가치의 의약품 원료용 미세조류 기술은 최종 제품의 경제성이 높아 개발에 대한 기대치가 높지만 바이오연료 등은 화석연료에 비해 경제성이 뒤져있는 실정이다. 비전환연구인 원유 회수 증진법은 CO₂를 유전에 주입하여 오일의 점도를 감소시켜 오일 회수를 유리하게 만드는 방법으로 미국 및 캐나다 등 주로 북미에서 활용되고 있는 방법으로 총 22개 회사에서 99개의 사업이 운영되고 있다.

2-3-2. 국내 연구 개발 동향

한국전력공사, 포항산업과학기술원 등에서 주요 배출원인 발전과 철강 분야를 중심으로 단계적 연구과정을 거쳐 10 MW급 Pilot plant 연구까지 수행중이며, 연소후 흡식/건식 기술은 세계적 경쟁력 확보를 위한 Track-record 확보 차원의 기술 최적화 및 장기 운전 연구가 수행되고 있다.

국내 CO₂ 활용기술은 전기화학, 광물화, 고분자, 생물전환 등 미래부 추진 기초원천연구가 중점적으로 진행되고 있으며, 산업부 및 기업을 중심으로 고분자 및 연료 생산관련 실증 연구가 추진 중이다.

CO₂ 활용기술은 저장기술에서 요구되는 대규모 저장소가 필요하지 않고 경제적으로 이익이 발생하기 때문에 국내에서 다양한 규모의 사업화 노력이 진행되고 있다. 극동화학/대우건설은 하루 10톤의 CO₂를 처리하는 DECO2 통합공정을 설계하여 인천 서구 청라 소각장 배출가스를 대상으로 실증화 단계에서 공정을 수행하고 있다. 또한, Korea CCS 2020 사업을 중심으로 많은 연구팀에서 CO₂를 고부가가치 화합물로 전환시키는 연구를 활발히 수행하고 있다.

Table 1. State of the art of conversion technologies for carbon dioxide in the world

Nation	Organizers	Reserch results
Germany	Bayer	Polyurethane foam pilot-test using CO ₂ was developed by German government program, Dream Production (2015).
	Cyano Biofuels	Cyanobacteria(blue-green algae) for production of the bio-ethanol using CO ₂ and solar light was developed. The Dow's facility in Texas produces 100,000 gallons of ethanol per years.
	BASF	'Solar2Fuel' project for production of methanol through photocatalytic reaction using CO ₂ and H ₂ O as reactants has been performed.
USA	Sandia National Lab.	'Sunshine to Petrol (S2P)' project to make the liquid hydrocarbon fuel from H ₂ O and CO ₂ using Solar energy has been carried out.
	Lawrence Berkeley National Lab.	Joint Center for Artificial Photosynthesis (JCAP) were established by Berkeley Lab. JCAP has stuided carbon dioxide into fuels and alcohols by the photosynthesis.
	Albemarle & Novomer	Large-scale manufacturing of polypropylene carbonate from CO ₂ and epoxide was established at the first in the world. The weight of CO ₂ is higher than 40% in the polymers.
United Kingdom	Novacem	The technology for the production of cement using CO ₂ has been developed and comercialized with Rio Tinto and Laing O'ourke.
	Newcastle University	The catalyst for the production of ethylene carbonate from CO ₂ and oxirane has been developed. The reaction temperature was 60 °C.
Austrailia	Global CCS Institute	'Calera mineralisation' project is manufacturing cement and aggregate by the utilization of CO ₂ from Yallourn power plant.
Japan	Mitsui Chemicals	The technology for the production of methanol using H ₂ and CO ₂ from petro-chemical plant was developed. For large amount of H ₂ , Artificial photosynthesis technology has been stuided.
	Asahi Chemicals	The process without phosgene for the production of isocyanate which is resource for the synthesis of polyurethane was developed.
China	Chang Chun Institute of Applied Chemistry	The catalyst which is included rare-earth metal for the production of polymers was developed.
	Shanghai Institute of Organic Chemistry	New process which synthesizes the methanol and ethylene glycol from CO ₂ using Ru based catalysts was developed.

Table 2. State of the art of capture technology for carbon dioxide in Korea

Tehcnology	Methods	Results	Remarks
Wet scrubbing	Technology importation ('00~'06)	0.1 MW CO ₂ capture test bed (technology importation)	Seoul power station (Gas)
	Reverse engineering ('08~'11)	0.1 MW CO ₂ capture test bed (install and operation)	
	Open innovation ('10~'14)	10 MW CO ₂ capture technology (development)	Boryeong power station Unit 8 (Coal)
	Commercial package ('14~'17)	Commercial pakage of 10 MW CO ₂ capture (development)	
Dry scrubbing	Original technique ('02~'11)	0.5 MW CO ₂ capture test bed (install)	Hadong power station Unit 3 (Coal)
	Open innovation ('10~'14)	10 MW CO ₂ capture technology (development)	
	Commercial package ('14~'17)	Commercial pakage of 10 MW CO ₂ capture (development)	Hadong power station Unit 8 (Coal)

Table 3. State of the art of convert technologies for carbon dioxide in Korea

Oganizer	State of the art
Korea Institute of Science and Technology	The 'CAMERE(Carbon dioxide hydrogenation to form methanol via a reverse water-gas shift reaction)' process was developed. This process has been applied to the manufacturing of DME.
Korea Research of Chemical Technology	The synthesis of acetic acid using CO produced from CO ₂ reforming reaction The development of catalysts and processes for the production of methanol from syngas and CO ₂ (10 ton/day)
Korea Southern Power Co., LTD	Integrated system for the production of biomass and biodiesel using CO ₂ and thermal effluents from power plant
Korea Institute of Ocean Science and Technology	The production of biofuels such as biodiesel bioethanol from algae
Ajou University	The production of eco-plastics using CO ₂ and propylene oxide
Kyung Hee University	The production of isocyanate which is resource for the synthesis of polyurethane without phosgene
Korea Advanced Institute Science and Technology	The production of biodiesel from CO ₂ using micro-algae such as chlorella
Korea University	The development of reactor and cultivation process for the micro-algae which reduces CO ₂ emission and produces high valued products
Yonsei University	The production of bio-hydrogen and bio-ethanol from wastewater using micorwave
Pohang University of Science and Technology	The large scale production of carbon anhydrase using enzyme of Neisseria gonorrhoeae

Table 4. The project of convert technology for carbon dioxide in Korea

Technology	Periods	Fund (Billion won)	Research goal
NCCU tehnolgy development [KEWPC]	'13.06-'16.03	19	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂ capture and the production of chemicals (Na₂CO₃, H₂, Cl₂) • High efficiency process of CO₂ carbonation and brine electrolysis • 0.5~1.0 MWth CO₂ conversion of pilot plant
CO ₂ mineralization [KEPC]	'13.05-'15.04	3.1	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂ carbonation using electrolysis and enzyme • Carbonic anhydrase for the process of CO₂ absorption
Syngas production [KWP]	'14.06-'17.05	14.6	<ul style="list-style-type: none"> • The production of syngas(CO+H₂) using electrolysis of CO₂ and steam • Metal-supported electrolytic cell
Plastic production [SK Innovation]	'08~	NA	• The production of polymers using CO ₂ , PO as resources (CO ₂ content: 44 wt%)
Formic acid production [KSP]	'14.12-'18.09	108	• The production formic acid by CO ₂ electrolysis

2-4. 기술개발 이슈

발전소, 철강산업 등에서 배출되는 CO₂ 포집기술은 일본과 미국, 유럽 등 선진국에서 많은 연구개발 투자를 진행해왔으나, 현재까지 경제성을 확보한 포집제 개발 및 포집 공정의 상용화는 성공하지 못하고 있는 실정이다. 포집 공정의 경제성은 흡수제의 종류 및 성능(흡수제 질량당 이산화탄소 흡수량, 흡수속도, 흡수제 재생 용이성)에 좌우되기 때문에 경제적이면서 성능이 높은 흡수제 개발이 중요하다. 특히 전체 포집 공정중 사용되는 에너지의 약 70% 이상이 흡수제 재생과정에 소비되고 있으므로 흡수제 재생 에너지를 저감하는 연구 또한 진행 중이다. 탄산광물화 전환기술의 경우 상온과 상 앞에서 높은 수율 및 고순도 광물을 얻기 위한 연구가 추가적으로 필요하다. 폴리머 생산기술은 현재 기술개발 초기단계에 머무르고 있고 기존의 폴리머와의 가격 및 품질경쟁력을 높여야하는 실정이다. 메탄올 생산 기술에는 CO₂ 외에 수소가 원료로 요구되는데, 고

가의 수소로 인해 낮은 경제성을 보이고 있어 저렴한 수소 생산 기술 또는 CO₂와 수소 반응에서 고온이 아닌 반응조건에서도 반응이 진행될 수 있는 핵심 촉매 개발이 필요하다.

3. 결 론

온실가스 감축을 위해서 국내외의 다양한 CCUS 기술 연구가 진행되고 있다. 세계 각국에서 온실가스 감축을 위한 CCUS 기술 개발에 많이 투자하고 있는 실정이다. 많은 투자와 지원에도 불구하고 포집 기술의 경우에는 공정의 상용화를 위해서 흡수제의 성능을 향상시키는 연구가 추가적으로 요구되고 있고, 활용 기술의 경우 기존의 방식으로 제조한 제품과의 가격 경쟁력 확보가 중요하다. 국내에서도 투자 확대에 논문 및 특허에 대한 양적 연구성과는 증가하고 있으나, 현 시점에서 낮은 탄소가격과 기존 기술과의 경제적 경쟁력을

갖추기에는 시기상조인 상황이다. 또한, 국내에서도 다양한 CCUS 과제가 추진되고 있으나, 국가의 공동의 목표설정이 부족하고 부처 간의 협력도 미흡하다. 따라서, 온실가스 감축을 위한 단기적, 장기적 전략과 R&D 계획 수립에 대한 검토가 필요한 시점으로 판단된다. 추가적으로 CCUS 기술 개발의 목적상 기존 제품 대비 가격 경쟁력이 떨어지기 때문에 CO₂ 활용을 통한 CO₂ 감축 효과의 정량화가 매우 중요하다. 따라서 감축 효과를 산정하기 위한 분석 방법의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

References

- Jensen, M. D., Peng, P., Snyder, A. C., Heebink, L. V., Botnen, L. S., Gorecki, C. D., Steadman, E. N. and Harju, J.A., "Methodology for Phased Development of a Hypothetical Pipeline Network for CO₂ Transport during Carbon Capture, Utilization, and Storage," *Energy & Fuels*, **27**(8), 4175-4182(2013).
- Bruhn, T., Naims, H. and Olfe-Kräutlein, B., "Separating the Debate on CO₂ Utilisation from Carbon Capture and Storage," *Environ. Sci. Policy*, **60**, 38-43(2016).
- Xie, H., Li, X., Fang, Z., Wang, Y., Li, Q., Shi, L., Bai, B., Wei, N. and Hou, Z., "Carbon Geological Utilization and Storage in China: Current Status and Perspectives," *Acta Geotech.*, **9**(1), 7-27(2014).
- Plaza, M. G., Rubiera, G. F., Pis, J. J. and Pevida, C., "Post-combustion CO₂ Capture with a Commercial Activated Carbon: Comparison of Different Regeneration Strategies," *Chem. Eng. J.*, **163**(1-2), 41-47(2010).
- Dantas, T. L. P., Amorim, S. M., Luna, F. M. T., Silva, I. J., Azevedo, D. C. S., Rodrigues, A. E. and Moreira, R. F. P. M., "Adsorption of Carbon Dioxide onto Activated Carbon and Nitrogen-Enriched Activated Carbon: Surface Changes, Equilibrium and Modeling Fixed-bed Adsorption," *Sep. Purif. Technol.*, **45**, 73-84(2010).
- Himeno, S., Komatsu, T. and Fujita, S., "High-pressure Adsorption Equilibria of Methane and Carbon Dioxide on Several Activated Carbons," *J. Chem. Eng. Data*, **50**, 369-376(2005).
- Banerjee, R., Phan, A., Wang, B., Knobler, C., Furukawa, H., O'Keeffe, M. and Yaghi, O. M., "High-Throughput Synthesis of Zeolitic Imidazolate Frameworks and Application to CO₂ Capture," *Science* **319**(5865), 939-943(2008).
- Banerjee, R., Furukawa, H., Britt, D., Knobler, C., O'Keeffe, M. and Yaghi, O. M., "Control of Pore Size and Functionality in Isoreticular Zeolitic Imidazolate Frameworks and their Carbon Dioxide Selective Capture Properties," *J. Am. Chem. Soc.*, **131**(11), 3875-3877(2009).
- Zhao, D., Cleare, K., Oliver, C., Ingram, C., Cook, D., Szostak, R. and Keva, L., "Characteristics of the Synthetic Heulandite-clinoptilolite Family of Zeolites," *Microporous Mesoporous Mater.*, **21**(4-6), 371-379(1998).
- Wang, Q., Luo, Z., Zhong, Z. and Borgna, A., "CO₂ Capture by Solid Adsorbents and Their Applications: Current Status and New Trends," *Energy Environ. Sci.*, **4**, 42-55(2011).
- Li, J. R., Kuppler, R. J. and Zhou, H. C., "Selective Gas Adsorption and Separation in Metal-Organic Frameworks," *Chem. Soc. Rev.*, **38**, 1477-1504(2009).
- Li, J. R., Ma, Y., McCarthy, M. C., Sculley, J., Yu, J., Jeong, H. K., Balbuena, P. B. and Zhou, H. C., "Carbon Dioxide Capture-related Gas Adsorption and Separation in Metal-organic Frameworks," *Coord. Chem. Rev.*, **255**(15-16), 1791-1823(2011).
- Kuppler, R. J., Timmons, D. J., Fang, Q.-R., Li, J.-R., Makal, T. A., Young, M. D., Yuan, D., Zhao, D., Zhuang, W. and Zhou, H.-C., "Potential Applications of Metal-organic Frameworks," *Coord. Chem. Rev.*, **253**(23-24), 3042-3066(2009).
- Xu, X., Song, C., Andresen, J. M., Miller, B. G. and Scaroni, A. W., "Novel Polyethylenimine-Modified Mesoporous Molecular Sieve of MCM-41 Type as High-Capacity Adsorbent for CO₂ Capture," *Energy Fuels*, **16**(6), 1463-1469(2002).
- Xu, X., Song, C., Miller, B. G. and Scaroni, A. W., "Influence of Moisture on CO₂ Separation from Gas Mixture by a Nanoporous Adsorbent Based on Polyethylenimine-Modified Molecular Sieve MCM-41," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **44**(21), 8113-8119(2005).
- Ma, X., Wang, X. and Sog, C., "Molecular Basket Sorbents for Separation of CO₂ and H₂S from Various Gas Streams," *J. Am. Chem. Soc.*, **131**(16), 5777-5783(2009).
- Wang, D., Sentorun-Shalaby, C., Ma, X. and Song, C., "High-Capacity and Low-Cost Carbon-Based "Molecular Basket" Sorbent for CO₂ Capture from Flue Gas," *Energy Fuels*, **25**(1), 456-458(2011).
- Kato, M., Yoshikawa, S. and Nakagawa, K., "Carbon Dioxide Adsorption by Lithium Orthosilicate in a Wide Range of Temperature and Carbon Dioxide Concentrations," *J. Mater. Sci. Lett.*, **21**(6), 475-487(2002).
- Xiong, R., Ida, J. and Lin, Y. S., "Kinetics of Carbon Dioxide Sorption on Potassium-doped Lithium Zirconate," *Chem. Eng. Sci.*, **58**(19), 4377-4385(2003).
- Venegas, M. J., Fregoso-Israel, E., Escamilla, R. and Pfeiffer, H., "Kinetic and Reaction Mechanism of CO₂ Sorption on Li₄SiO₄: Study of the Particle Size Effect," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **46**(8), 2407-2412(2007).
- Iwan, A., Stephenson, H., Ketchie, W. C. and Lapkin, A. A., "High Temperature Sequestration of CO₂ Using Lithium Zirconates," *Chem. Eng. J.*, **146**(2), 249-258(2009).
- Li, Z. S., Cai, N. S. and Huang, Y. Y., "Effect of Preparation Temperature on Cyclic CO₂ Capture and Multiple Carbonation-Calcination Cycles for a New Ca-Based CO₂ Sorbent," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **45**(6), 1911-1917(2006).
- Powell, C. E. and Qiao, G. G., "Polymeric CO₂/N₂ Gas Separation Membranes for the Capture Carbon Dioxide from Power Plant Flue Gases," *J. Membr. Sci.*, **279**(1-2), 1-49(2006).
- Che, T. L., Ahmad, A. L. and Bhatia, S., "Ordered Mesoporous Silica (OMS) as an Adsorbent and Membrane for Separation of Carbon Dioxide (CO₂)," *Adv. Colloid Interface Sci.*, **153**(1-2), 43-57(2010).
- Tunio, S. Q., Mehran, H. T., Ghirano, N. A. and Adawy, Z. M. El, "Comparison of Different Enhanced Oil Recovery Techniques for Better Oil Productivity," *Int. J. Appl. Sci. Technol.*, **1**, 143-153(2011).
- Perera, M., Gamage, R., Rathnaweera, T., Ranathunga, A., Koay, A. and Choi, X., "A Review of CO₂-Enhanced Oil Recovery with a Simulated Sensitivity Analysis," *Energies*, **9**(7), 481-502.
- Gozalpour, F., Ren, S. R. and Tohidi, B., "CO₂ Eor and Storage in Oil Reservoir," *Oil Gas Sci. Technol.*, **60**(3), 537-546(2005).
- Jang, W.-J., Shim, J.-O., Kim, H.-M., Yoo, S.-Y. and Roh, H.-S.,

- “A Review on Dry Reforming of Methane in Aspect of Catalytic Properties,” *Catal. Today*, **324**, 15-26(2019).
29. Fan, M. S., Abdullah, A. Z. and Bhaia, S., “Catalytic Technology for Carbon Dioxide Reforming of Methane to Synthesis Gas,” *ChemCatChem* **1**(2), 192-208(2009).
30. Aresta, M. and Dibenedetto, A., “Utilisation of CO₂ as a Chemical Feedstock: Opportunities and Challenges,” *Dalton Trans.*, **36**(28), 2975-2992(2007).
31. Song, C., “Global Challenges and Strategies for Control, Conversion and Utilization of CO₂ for Sustainable Development Involving Energy, Catalysis, Adsorption and Chemical Processing,” *Catal. Today*, **115**(1-4), 2-32(2006).
32. Matsubu, J. C., Yang, V. N. and Christopher, P., “Isolated Metal Active Site Concentration and Stability Control Catalytic CO₂ Reduction Selectivity,” *J. Am. Chem. Soc.*, **137**(8), 3076-3084 (2015).
33. Markewitz, P., Kuckshinrichs, W., Leitner, W., Linssen, J., Zapp, P., Bongartz, R., Schreiber, A. and Müller, T. E., “Worldwide Innovations in the Development of Carbon Capture Technologies and the Utilization of CO₂,” *Energy Environ. Sci.*, **5**(6), 7281-7305(2012).
34. Lee, J. H., Lee, D. W., Jang, S. G., Kwak, N. S., Lee, I. Y., Jang, K. R., Choi, J. S. and Shim, J. G., “Economic Evaluations for the Carbon Dioxide-involved Production of High-value Chemicals,” *Korean J. Chem. Eng.*, **52**(3), 347-354(2014).
35. Boot-Handford, M. E., Abanades, J. C., Anthony, E. J., Blunt, M. J., Brandani, S., Dowell, N. M., Fernández, J. R., Ferrari, M.-C., Gross, R., Hallett, J. P., Haszeldine, R. S., Heptonstall, P., Lyngfelt, A., Makuch, Z., Mangano, E., Porter, R. T., Pourkashanian, M., Rochelle, G. T., Shah, N., Yao, J. G. and Fennell, P. S., “Carbon Capture and Storage Update,” *Energy Environ. Sci.*, **7**(1), 130-189(2014).
36. Goli, A., Shamiri, A., Talaiekhosani, A., Eshtiaghi, N., Aghamohammadi, N. and Aroua, M. K., “An Overview of Biological Processes and Their Potential for CO₂ Capture,” *J. Environ. Mang.*, **183**(1), 41-58(2016).