

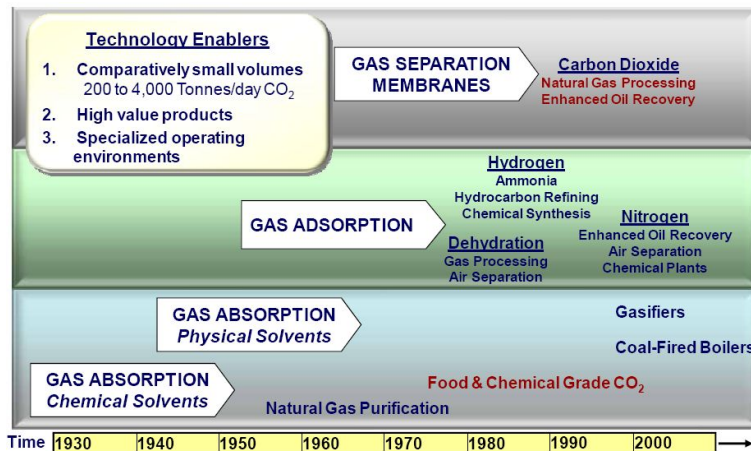
2. CCS 현황 및 도전 과제

CCS 기술은 배가스에 포함된 CO₂를 포집(+압축¹)-수송-저장하는 일련의 과정으로 구성되어 있다. 본 절에서는 이러한 단위 공정을 간단히 살펴보고 CCS 기술이 상용화되기 위한 도전과제에 대하여 언급하겠다.

1) CO₂ 포집 (CO₂ Capture)

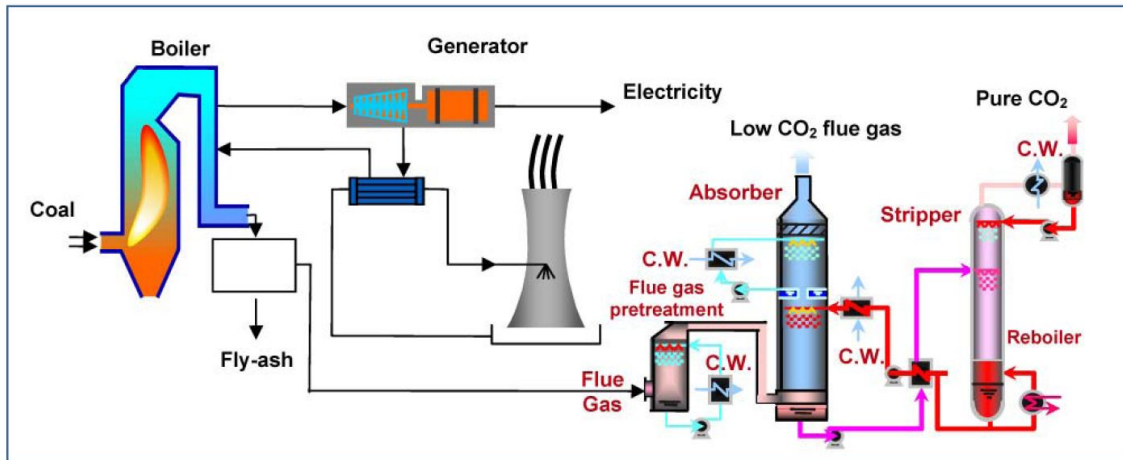
CO₂ 포집은 공정이 적용되는 위치에 따라 연소전(Pre-combustion), 연소중 혹은 순산소(Oxy-fuel combustion), 연소후(Post-combustion)으로 분류할 수 있다. 각각의 연소 조건이 다르기 때문에 CO₂ 포집공정도 각 공정에 따라 적용되는 기술이 다르다. 본 절에서는 상용화에 가장 근접해있고 기존 공정의 개량(retrofit)을 통하여 쉽게 적용이 가능한 연소후 공정에 국한하여 기술하겠다.

화석연료의 연소에 의해 배출되는 배가스 중에는 약 3 ~ 25%의 이산화탄소가 포함되어 있다. 온실가스를 가장 많이 배출하는 석탄화력발전소 배출 배가스(약 15% 전후의 이산화탄소 포함)에 이산화탄소를 포집하는 기술이 설치되어 있지는 않지만, 이산화탄소 포집기술은 이미 1930년대부터 천연가스 정제, 식품 및 화학공정에 사용되어 온 오래된 기술이다. 1940년대에 고압(약 1,500 Psia)에서 이산화탄소를 분리하기 위한 물리흡수제가 개발되었으며, 1970년대와 1980년대에 이산화탄소 분리를 위한 가스분리막이 개발되었다. 그러나 이러한 공정은 환경적 측면보다는 제품의 순도를 높이는 의미에서 개발되었다. 따라서 작은 규모로 개발되어 운전 중이며, 대규모의 온실가스를 처리해야만 되는 현실에서는 비용, scale-up 문제가 대두되어 있는 상태이다.



[그림 2-1] 이산화탄소 포집 공정 개발 연혁²⁾.

1) 포집공정은 (CO₂ 포집공정 + 흡수제 재생공정 + 분리된 CO₂ 압축공정)을 모두 포함함.



[그림 2-2] 연소후 이산화탄소 포집 공정³⁾

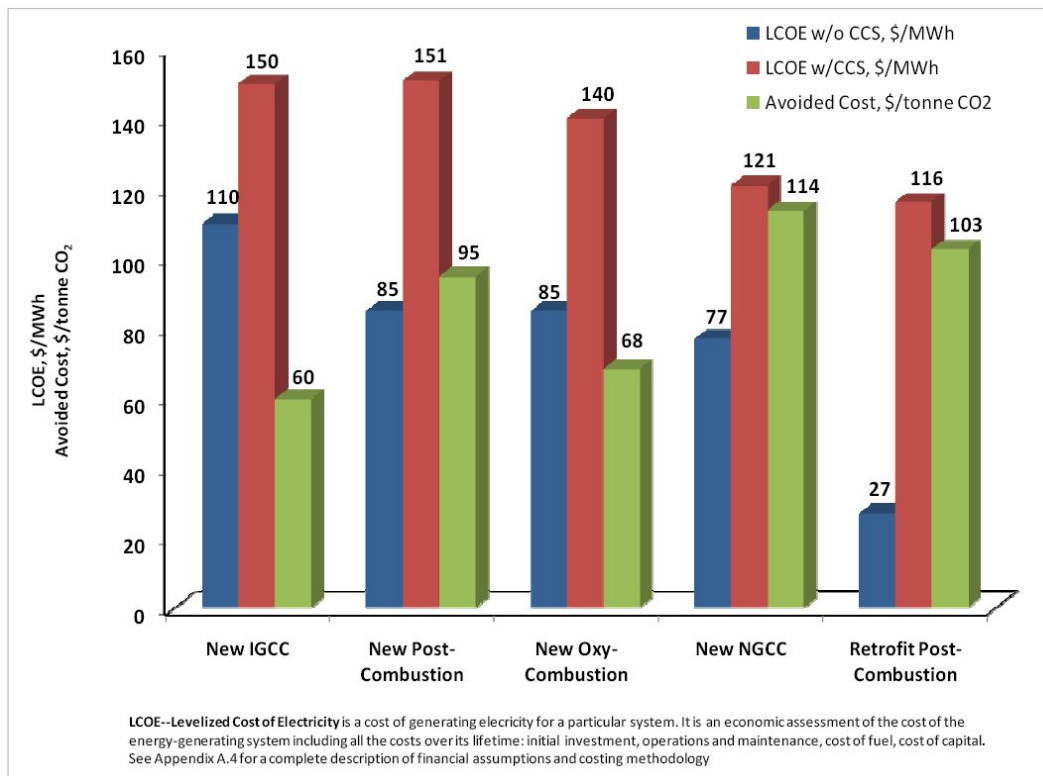
화석연료 연소에 의한 배가스에는 낮은 농도(3 ~ 25 vol.%)를 포함하고 있어 압축시 분리가 필요 없는 가스(대부분 질소) 때문에 불필요한 추가 동력이 막대하게 소모된다. 따라서 낮은 농도의 이산화탄소를 고순도로 포집하여 압축에 소요되는 에너지를 작게 하는 것이 이산화탄소 포집공정의 기본 개념이다. 연소 후 포집공정은 배가스 중에 포함된 이산화탄소를 흡수탑(absorber)에 있는 흡수제(아민, 암모니아, K_2CO_3 등, 흡수온도 : 40~60°C)를 이용하여 포집하며, 이산화탄소를 포집한 흡수제는 재생탑(stripper)으로 이송되어 열(steam)에 의하여 재생(약 120°C)된다. 재생된 흡수제는 흡수탑으로 순환되어 지속적으로 사용되며, 분리된 이산화탄소(>99% CO_2)는 압축기로 이송되어 수송을 위하여 초임계상태로 압축된다. 전체 CCS 비용 중 70%는 이산화탄소 포집공정에 소요되며, 이산화탄소 포집공정 중 재생공정이 약 70%를 차지한다. 즉 재생비용이 전체 CCS 비용의 절반을 차지하지 때문에 국내외 많은 연구기관에서는 재생에너지를 낮출 수 있는 흡수제 개발에 주력하고 있다. 이산화탄소 포집에 가장 오래전부터 사용된 MEA (mono-ethanol-amine)의 재생에너지는 약 4.0GJ/t- CO_2 소요되며, 이를 2.5GJ/t- CO_2 로 감소시키기 위한 많은 연구가 진행 중이다. 현재 개발된 흡수제중 일본 미츠비시 중공업의 KS-1 흡수제가 약 3.0GJ/t- CO_2 을 보이며, 한국에너지기술연구원의 윤여일 박사팀이 개발한 KIERSOL의 경우 약 2.7GJ/t- CO_2 의 값을 보여 세계 최고 수준의 흡수제를 개발한 것으로 보고되고 있다.

공정규모를 격상하는 문제의 불확실성이 존재하기만 가장 큰 문제는 이산화탄소 포집-재생-압축하는 공정에 필요한 에너지(스팀과 전기)가 막대하기 때문에 제품 단가(예: 전기 값)의 인상이 불가피하다는 것이다. 또한 건설비용도 막대하게 소요되는 단점이 있다. 현

2) DOE, Report of the interagency task force on carbon capture and storage, (2010).

3) Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization

재까지 개발된 기술을 550MW 석탄화력발전소에서 배출되는 이산화탄소를 제거하기 위하여 적용할 경우 포집공정 건설비용은 약 4천만달러로 발전소 건설비용의 80%를 상회하며, 운영비용도 1톤의 CO₂를 처리하기 위해서는 약 70~100달러이상의 비용이 소요될 것으로 예측되고 있다⁴⁾. (대략 1톤의 석탄을 연소할 경우 2톤의 이산화탄소가 배출되며, 550MW 석탄화력발전소의 경우 연간 330만톤의 이산화탄소를 배출함). 현재까지 개발된 기술을 사용할 경우 전기를 만들기 위해 사용되는 석탄가격보다 이산화탄소를 제거하기 위해 필요한 비용이 훨씬 큰 주객이 전도된 상황을 맞는 것이 불가피하다. 우리나라에서는 이산화탄소 포집 비용을 \$30/t-CO₂ 이하로 크게 낮춘 3세대 흡수제 및 공정을 개발하기 위한 Korea CCS R&D Center가 교육과학부의 지원을 받아 2011년 11월부터 발족할 예정으로 전 세계 CCS 시장을 선점할 수 있는 새로운 기술 개발이 기대된다.



[그림 2-3] 석탄화력발전소의 발전단가 비교.⁵⁾

2) CO₂ 수송 (CO₂ Transport)

이산화탄소 수송 공정은 기존의 천연가스 수송(배 혹은 파이프라인)에 대한 많은

4) IEA, Cost and Performance of Carbon Dioxide Capture from Power Generation (2011).

5) DOE, Report of the interagency task force on carbon capture and storage, (2010).

know-how가 있기 때문에 큰 기술적 난관이 없을 것으로 예측되고 있다. 향후 추가 기술 개발 분야는 기존 천연가스 파이프라인과 유사하게 파이프, 밸브, 펌프의 재질, 이송거리 간 station 설치, 유출 탐지 등이다. 파이프라인을 이용할 경우 초기 투자비는 많이 필요하지만 일단 건설이 되면 석유가 인상과 같은 주위환경에 의한 변화가 작기 때문에 가장 유용한 수단으로 인식되고 있다. 미국에서 가장 오래된 이산화탄소 수송관은 EOR (Enhanced Oil Recovery)를 위해 1972년 텍사스에 건설된 140마일 규모의 Canyon Reef Carriers Pipeline이다. 현재 미국에서는 총 3,600마일 정도의 파이프라인을 통하여 연간 5천만톤 정도의 이산화탄소를 수송하고 있는 것으로 알려졌다. 500만톤의 이산화탄소를 100km 수송할 경우 약 \$1~3/t-CO₂가 소요될 것으로 예측하고 있다⁶⁾. 그러나 가격의 절대적인 비용은 이산화탄소 배출원과 저장장소간의 거리, 건설지역의 토지비용, 인건비용에 의해 크게 좌우된다.

우리나라의 경우 저장장소의 한계로 인하여 파이프라인뿐 아니라 배를 통한 이산화탄소 수송을 고려하여야 한다. 외국에서 천연가스를 수송선을 통해 도입한 후 국내에서 배출된 이산화탄소를 다시 수송선에 실어 외국으로 반출한 후, 천연가스 회수 증진에 사용하는 방법도 고려해 볼 만 하다. 현재 국내 각 조선사에서는 세계 1위의 조선강국 기술을 바탕으로 이산화탄소 수송선에 대한 연구 개발을 진행 중이다.

3) CO₂ 저장 (CO₂ Storage)

CCS 공정의 종결은 포집된 이산화탄소를 안정되게 저장하는 것이다. 기존 연구가 수행되었던 심해저장은 생태계 혼란의 우려로 런던협약(해양투기금지법)에 의해 금지된 상태로 더 이상 연구가 진행되지 않고 있다. 현재는 지중저장 혹은 해양지중저장(바다 밑 지중에 저장)에 대한 연구개발이 활발히 진행 중이며 다음과 같은 5가지 기본 조건이 충족되어야 한다.

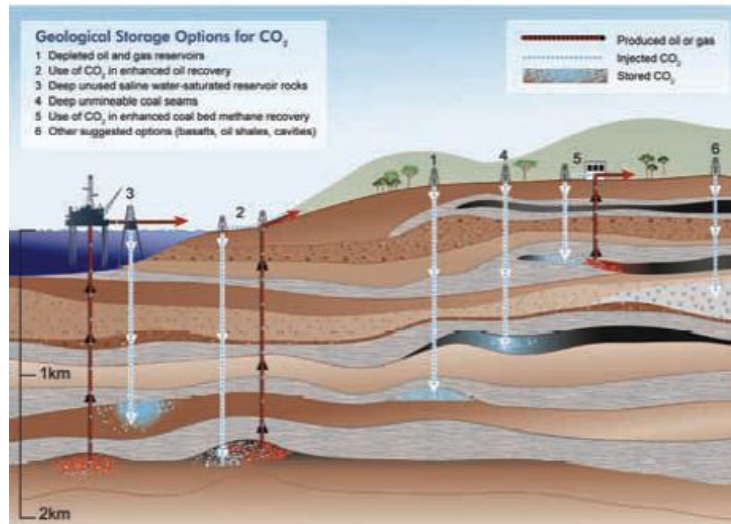
- ① 수백 년 또는 수천 년 동안 저장이 가능하여야 함.
- ② 수송비용을 포함하여 저장비용이 최소화되어야 함.
- ③ CO₂ 누출 사고의 위험이 없어야 함.
- ④ 환경영향이 최소화되어야 함.
- ⑤ 저장방법이 국가 또는 국제적 법규에 위배되지 않아야 함

지중저장은 다음 그림과 같이 deep saline⁷⁾ formations (대염수층저장), 폐유전/가스전

6) Sean T. McCoy, "The economic of CO₂ trasport by pipeline and storage in saline aquifers and oil reservoirs" (2008).

7) 기수나 염수로 포화되어 있는 심부 지하의 다공질 저장암

저장, 석유증진추출(enhanced oil recovery), 석탄층저장(unminable coal seams, recovery of coal bed methane)등 다양한 옵션이 존재한다.



[그림 2-4] 이산화탄소 지중저장 가능 영역.⁸⁾

지중저장은 포획되어 압축된 이산화탄소(액체상태와 유사)를 약 800 ~ 1,000m 주입하면 불투수성의 피압층(덮개암) 하부에 포획되거나, 저장 지층의 공극 내부에 침투되어 안정되게 저장되거나, 원래 지층내의 유체에 용해 혹은 석탄, 셰일내의 유기물에 흡착된다. 추가적으로 저장 지층과 덮개암의 광물에 존재하는 양이온과 결합하여 탄산염 광물로 전환되어 저장될 수 있다.

이산화탄소를 저장할 수 있는 저장용량에 대한 평가는 많은 불확실성이 존재하지만 범지구적 관점에서 보면 막대한 것으로 보고되고 있다. 고갈된 석유와 가스 저류암은 675 ~ 900 Gton의 저장용량을 갖는 것으로 평가되고 있으며 일부의 연구는 이보다 한층 더 큰 규모를 갖는다고 제시하였다. 심부 대염수층들은 적어도 1,000 Gton의 저장용량을 가지는 것으로 평가되고 있다. 석탄층의 저장용량은 3 ~ 200 Gton의 넓은 범위로 추산되어 불확실성이 높은 것으로 나타났다. 그러한 이러한 저장용량의 평가는 추가적인 연구를 통해서만이 정확성이 높은 값을 얻을 수 있을 것이다.

세계 최초의 상업용 CCS 프로젝트는 1996년부터 시작된 북해의 천연가스 생산 플랜트에 적용한 노르웨이의 Sleipner 프로젝트로 매년 1백만톤의 CO₂를 저장하고 있다. Statoil사에 의하여 운영되고 있으며, 노르웨이 정부의 CO₂ metric ton당 50US\$ 규모의 탄소세(현재는 10유로대로 낮아짐)에 대응하기 위하여 착수되었으며 탄소세만을 감안하여

8) CO2CRC (2009)

도 1년반만에 투자비를 회수하였다. LNG 생산과정에서 분출되는 CO₂를 분리포집하여 다시 LNG 생산 공에 주입하는 방식으로 이루어지며 노르웨이 해안에서 250km 떨어진 북해에 위치해 있다. 그 외 미국을 중심으로 다양한 지중저장 프로그램을 운영하고 있다.



[그림 2-5] 세계최초 상업규모 CCS 프로젝트인 노르웨이 Sleipner 프로젝트⁹⁾.

우리나라 국토에서의 CO₂ 지중저장 잠재량은 육상퇴적분지에 약 10.8억톤, 해저퇴적분지에는 육상퇴적분지의 CO₂ 저장용량 이상이 가능할 것으로 평가되고 있으나, 이에 대한 연구개발이 미흡하여 불확실성이 높은 것으로 알려져 있다. 따라서 국내 CCS 완성을 위하여 적절한 자원이 투입하여 지중저장이 가능한 장소와 용량에 대한 정확한 평가가 이루어져야 한다.

상기에서 언급한 것과 같이 CCS 공정을 상용화하기 위해 가장 큰 문제는 이산화탄소 포집 공정의 초기투자비와 운영비용을 낮추는 방법과 공정 규모 격상에 대한 신뢰성을 확보하는 일이다. 또한 국내의 경우 지중저장에 장소 및 용량에 대한 평가와 포집-수송-저장에 대한 전 공정을 integration한 통합공정 연구가 이루어져야 한다.

또 다른 하나의 중요한 문제는 CCS에 대한 사회적 수용성 (public acceptance)이다. 많은 시민들이 이산화탄소가 지구온난화의 주범이고 이로 인한 많은 문제점이 있다는 것을 인식하고 있지만 이산화탄소에 대한 정확한 이해와 CCS 공정에 대한 인식은 부족한 편이다.¹⁰⁾ 지구온난화가 방지된다고 하더라도 CCS의 설치로 야기된 물가의 인상에 대해서는 대부분 반대하는 편이다. 특히 파이프라인이 지나가는 지역이나 지

9) www.statoil.com

10) L. Wallquist, Environ Sci. Technol, 44, 6557-6562 (2010).

중저장지역에서는 기존 혐오시설에 대한 NIMBY 현상과 같은 NUMBY (Not Under My Back Yard) 현상이 벌어지고 있다. 따라서 CCS 기술의 확대 보급을 위해서는 다양한 기술개발 뿐 아니라 홍보 및 교육을 통하여 사회적 수용성을 증대시키는 것이 매우 중요한 사항이다.

CCS 기술의 높은 경제적 부담을 줄이며, 포집된 이산화탄소를 단순히 땅속에 저장하는 것이 아닌 유용한 물질을 제조하는 원료(feedstock)로 사용한다면 지구온난화 방지 뿐 아니라 경제적으로도 큰 기여를 할 수 있다. 다음 장에서부터 언급할 이산화탄소 전환기술이 기술적 개발 가능성은 낮고, 개발에 많은 시간이 소요되나 미래 기술로 각광받고 있는 이유이다.