

## 6. 이산화탄소 저장 기술

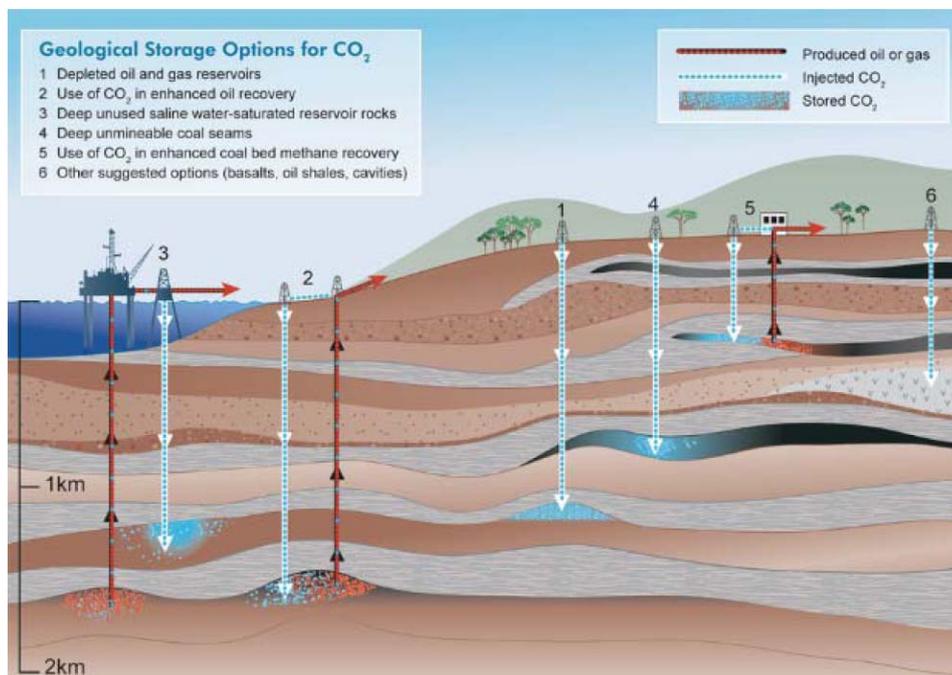
지금까지 이산화탄소의 회수기술에 대한 서술을 하였다. 본 고에서는 CCS사업 중 한 축을 담당하는 이산화탄소 저장에 관하여 서술하고자 한다. 일반적으로 이산화탄소는 회수공정을 통하여 회수된 후 순수한 이산화탄소로 분리하며 이를 가압시켜 농축하게 된다. 농축된 이산화탄소(액상)는 파이프라인이나 수송선을 통하여 저장조까지 이송된다. 저장조까지의 수송거리가 1,000km 미만까지는 파이프라인을 이용하는 것이 유리하며 그 이상일 경우나 장거리 해외수송의 경우 운반선을 이용하는 것이 경제적으로 알려져 있다. 수송된 이산화탄소는 해양, 지중, 지표에 저장될 수 있으나 해양저장은 해양 생태계 문제로 현재 보류중이며, 지표저장은 이산화탄소를 고착시킨 광물의 저장소 문제가 야기되어 아직은 기초 기술 단계이다. 그러나 지중저장은 많은 연구가 추진되고 있는 대표적 기술로 내륙 혹은 해저의 깊은 지층에 이산화탄소를 저장하게 된다(이산화탄소저감 및 회수기술개발사업단, [www.cdrs.re.kr](http://www.cdrs.re.kr)).

지중저장 방법은 이산화탄소를 특정한 지질구조를 가지는 지중에 강제적으로 주입하여 오랜 기간 동안 누출되지 않도록 가두어 두는 방법이다. 이러한 방법은 이산화탄소의 처리 및 저감을 위한 목적이 아니라 석유의 점성도를 낮추어 유정의 효율을 증가시키기 위한 목적으로 개발되어 왔다. 현재까지 발견된 지중저장 사이트의 이산화탄소 저장 용량은 약 800Gt 으로 평가되며, 모든 지중에 저장할 수 있는 용량은 2,000Gt으로 추정된다(유동근 등, 한국지구시스템공학회지, 44(6), 572-585, 2007). 지중저장에서 이산화탄소를 저장하는 가장 적당한 곳은 심부염수층(대수층), 유전/가스전 저장, 석탄층저장 등을 들 수 있으며 이를 세분하여 살펴보면 다음과 같다.

### 6-1. 고갈된 유전 및 가스전 저장 (Depleted oil and gas reservoir)

이산화탄소의 다양한 지중저장은 다음 [그림 6]과 같이 나타낼 수 있으며 고갈된 유전 및 가스전 저장은 그림 중 ①과 같다. 이산화탄소 저장용량은 저장소로부터 회수된 탄화수소의 양만큼 가능하며, 이러한 공정은 수십년 전부터 석유회사에서 사용되던 완성된 기술이다. 고갈된 유전이라는 말은 비어있다는 의미로 쓰이지만, 상당량의 석유가 종종 존재하고 있으며, 이러한 석유의 회수를 위해 이산화탄소를 주입하여 준다. 고갈된 탄화수소 저장소의 저장용량은 부피, 다공성, 침투도, 온도

및 압력과 같은 다양한 인자에 영향을 받는다. 이산화탄소의 저장을 위해서는 최소한 800m 깊이 이상, 저장소 압력 7.38MPa 이상인 조건이어야 한다. 고갈된 저장소는 가압상태의 닫힌 저장소와 물로 채워진 저장소의 두 종류로 구분된다. 이산화탄소는 액상 및 초임계상으로 주입이 가능하며, 물이 채워진 저장소의 경우는 이산화탄소의 밀도, 점도가 낮은 경우 단지 2-4%의 적은양의 이산화탄소만이 저장될 것으로 예상된다(윤상준, ETIS 분석지, 26, 111-118, 2005).



[그림 6] 이산화탄소 지중 저장 개략도 (IPCC Special Report on CCS, 2005).

## 6-2. 원유회수 증진 저장 (Enhanced Oil Recovery: EOR)

유전에 액체 이산화탄소를 주입하여 석유의 회수를 증진시키는 방법은 세계적으로 널리 적용되는 확인된 기술이다 (그림 6의 ②). 이는 이산화탄소의 회수 및 저장에 사용되는 비용 중 일부를 원유의 회수 증진을 통하여 상쇄시킬 수 있다는 장점이 있다. 주입된 이산화탄소는 원유의 점성을 낮추어 원유회수를 증진시킨다. 소량의 이산화탄소가 원유의 회수시 대기중으로 유출되기는 하나 대부분의 이산화탄소는 유전에 남아있게 된다. 이러한 방법을 통하여 약 73 ~ 238 Gt의 이산화탄소를 저장할 수 있다고 평가된다. 가장 대표적인 연구는 캐나다의 Weyburn CO<sub>2</sub>-EOR 사업이다. 이 사업은 미국의 Dakota에서 포집한 이산화탄소를 파이프라인을 통하여 캐나다의 Weyburn에 저장하는 사업으로 18개국의 연구자들이 참여하고 있다.

### 6-3. 심부염수층(대수층) 저장 (Deep saline formation)

심부염수층은 해수보다 더 높은 염분농도로 채워진 다공질의 암석으로서 전세계 대부분의 지역에 존재하기 때문에 이산화탄소 저장을 위한 아주 큰 공간을 가지고 있다. 심수대수층의 구조들은 주로 배사구조나 혹은 이와 유사한 형태를 가지며 구조의 상부에는 불투성의 덮개암이 존재하여 가스의 방출을 억제하거나 어렵게 함으로서 오랜 기간 이산화탄소를 저장할 수 있는 공간 구조를 의미한다. 이산화탄소를 저장하기 위한 대수층의 물리화학적 특성은 다음과 같다.

- 대수층의 깊이가 약 800m 이어야 한다. (이 깊이 이상에서는 이산화탄소의 수력학적 압력이 임계압이상으로 초임계상태로 존재하며 물보다 높은 밀도를 갖는다.)
- 대수층은 반대수층(aquitard)로 덮여있어서 식수와 표층수의 공급으로부터 대수층이 수문학적으로 분리되어 있어야 한다.
- 대수층은 이산화탄소 주입부 근방에서 충분한 다공성 및 침투성을 갖고 있어야 한다.
- 지역적인 침투성이 낮아 대수층에서의 이산화탄소의 체류기간이 높아야 한다.

상기기술은 이산화탄소저장 기술 중 가장 경제성있는 기술로 평가되며, 미국의 Frio, 노르웨이 북해의 Sleipner, 알제리아의 In Salah, 일본의 Nagaoka 등에서 연구가 수행되고 있다. 노르웨이에서는 연간 1 Mt의 이산화탄소를 Sleipner 지역의 대수층에 저장하고 있다. 우리나라와 같이 이산화탄소 저장장소로 활용될 만한 유전/가스전이 없는 경우에는 이러한 대수층에 관한 연구가 진행될 필요가 있다(유동근 등, 한국지구시스템공학회지, 44(6), 572-585, 2007).

### 6-4. 석탄층 저장 (Enhanced coal bed methane recovery)

석탄층에 이산화탄소를 주입하여 석탄층내 메탄가스를 회수하는 방법은 경제적인 이점을 갖고 있어 오래 전부터 사용되어온 기술이다(그림6의 ⑤). 석탄층의 내부 석탄면은 약 5 nm 이하의 미세 공극으로 구성되어 있으며 생성된 메탄가스의 저장소 역할을 한다. 흡착되어 있는 메탄가스를 이산화탄소로 대체함으로써 메탄가스의 회수를 증진시키고 이산화탄소를 저장하는 것이 이 방법의 핵심이다. 이 방법에 대한 연구는 캐나다, 중국, 일본, 폴란드, 네덜란드 등에서 주로 수행하고 있으며 캐나다 서부 석탄층의 경우 300 Gt, 네덜란드는 4개 지역에서 54 Mt에서 9 Gt까지 이산화탄소 저장이 가능할 것으로 예측하고 있다.

### 6-5. 한반도 주변 해양 지중저장 가능 지역

국내의 경우 지질학적 특성상 지중저장에 필요한 대수층이 존재하지 않는 것으로

알려져 있다(IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture & Storage, 2005). 이는 지질학적 특성뿐 아니라 국내지역의 시추시도가 낮아 지층 지형에 대한 정확한 자료 해석이 되지 않았기 때문으로 사료된다. 한국지질자원연구원의 석유가스개발연구실 허대기 박사팀(<http://petro.kigam.re.kr/>) 자료와 상기 연구팀에서 출판된 논문을 근거로 한 국내 해양 지층저장 가능지역을 살펴보면 다음과 같다.

- 동해 울릉분지 주변 지역: 동해의 남부에 위치한 울릉분지는 최대 수심이 2,200m 이며, 퇴적층 하부의 기반암은 주로 화산암류로 구성되어 있다. 울릉분지 중앙의 경우 퇴적물의 두께가 약 4 ~ 5km이며 지각의 두께는 14 ~ 15km 정도 되는 것으로 예측되고 있다. 울릉분지의 시추는 한국석유공사에서 돌고래 10개 공, 고래 13개 공 및 그 외 1개 공으로 총 24개 공을 시추하였다. 시추된 깊이는 약 2,000m 에서 4,700m까지 이며 암상은 사암, 셰일, 실트스톤 등이 협재되어 나타났으며, 이 구간 중에서 사암이 주로 존재하는 구간이 이산화탄소를 저장할 수 있는 구간이다.
- 남해지역: 남해지역의 퇴적분지는 도미분지 및 제주 분지로서 남해 동부해역과 동중국해 북동해역에 위치하고 있다. 이 지역은 석유탐사를 위해 실시한 7개의 시추공이 있으며, 시추자료를 토대로 보면 사암을 협재하는 실트암과 이암들이 주로 나타나있다. 남해지역의 경우 지금까지 연구된 탄성파 및 시추자료가 부족하기 때문에 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.
- 황해지역: 황해지역에는 크게 두 개의 퇴적분지가 발달되어 있다. 북쪽에는 군산분지(황해 중부분지)가 위치하며, 남쪽에는 흑산분지(황해 남부분지)가 위치하고 있다. 군산분지는 대륙붕 제 I, II 광구를 점하고 있으며 흑산분지는 대륙붕 제 III 광구에 발달되어 있다. 군산분지의 시추자료 분석결과 심도 2021 ~ 2017m 구간과 1,596 ~ 1,587m 구간에서는 하천환경에서 주로 형성되는 사암으로 구성되어 있어 잠재적인 이산화탄소 저장지역으로 평가되고 있다.

#### 6-6. 이산화탄소 모니터링 기술

이산화탄소의 저장 후에는 이의 정기적인 모니터링이 필요하다. 저장된 이산화탄소는 지하내부의 단층이나 암석의 틈을 통하여 상부로 이동하면서 지하수를 오염시키거나 대기 혹은 해수속으로 누출되어 생태계에 영향을 끼칠 수 있다. 즉 이산화탄소가 저장되면 주입정(well)은 잘 봉합하고 저장된 이산화탄소가 유출되는지를 직접적인 방법 혹은 다른 물리적인 방법을 이용하여 이산화탄소의 이동추적, 예측, 누

출 초기 진단 등 다양한 모니터링을 해야 한다. 노르웨이 Sleipner에서는 1999년에 230만톤, 2001년에 440만톤의 이산화탄소를 주입한 후 탄성파 탐사를 실시하여 이산화탄소를 주입하지 않았던 1994년도의 자료와 비교하여 이산화탄소 주입 후 이산화탄소의 거동이 존재함을 증명하였다. 따라서 국내에서도 이산화탄소 주입 후 거동에 대한 연구가 선행되어 실제 이산화탄소를 저장한 시점에 적용할 수 있는 기술을 확보하는 것이 중요하다.

이산화탄소 회수 및 저장에 관한 기술 연구 중 국내 연구는 주로 이산화탄소 회수에 집중되어 있다. 고정원에서 배출되는 이산화탄소 회수가 1차적인 목표이긴 하나 회수된 이산화탄소를 저장할 공간이 확보되지 못하면 무용지물이 될 수 밖에 없다. 이산화탄소 저장에 있어 해양저장은 생태계에 영향을 주기 때문에 지중저장이 더 타당한 방법으로 여겨지고 있다. 국내의 경우 지질학적 특성 및 국내의 여러 여건상 지중저장과 광물탄산염화 저장이 가장 적합한 기술로 인식되고 있다. 그러나 지중저장 위치를 선정하기 위한 시추 혹은 탐사파 분석 자료가 극히 부족한 상태로 이에 대한 정부의 지원이 절실히 요구되고 있는 실정이다.