

CO₂ 지중저장 기술

박 용 찬 · 한국지질자원연구원, 선임연구원

_e-mail : ycpark@kigam.re.kr

이 글에서는 기후변화 대응 기술로서 최근 관심의 대상이 되고 있는 이산화탄소 저장기술의 개요와 국제적 동향, 국내에서의 사업화 가능성에 대하여 소개하고자 한다.

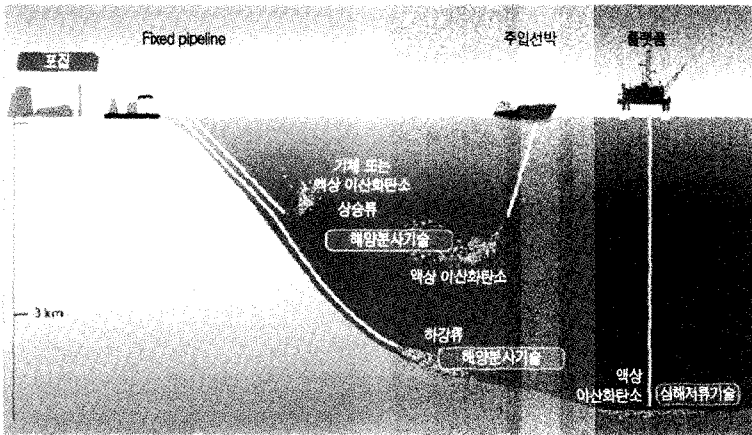
지난 해 독일에서 열린 선진8개국(G8) 정상회의에서는 2050년까지 온실가스 배출량을 1990년 대비 50% 수준으로 감축하는 문제를 진지하게 검토하기로 합의했다. 노르웨이는 이에 더 하여 2030년까지 30%를 감축하고 2050년까지는 '탄소중립(Carbon Neutral)'을 이룩하겠다고 발표한 바 있다. 하지만 에너지효율 제고 또는 신재생에너지 사용만으로 이러한 목표를 달성하는 것은 불가능하다는 것이 전문가들의 진단이다. 국제에너지기구(IEA)는 2050년을 기준으로 전체 감축량의 19% 정도가 '탄소 포집 및 저장기술(CCS; Carbon Capture and Storage)'에 의해 처리될 것으로 전망하고 있다.

해양처리 기술의 한계

CCS에 의한 온실가스 감축량 20%는 연간 64억 톤(IEA보고서, 2050년 기준)으로 그 규모가 피부에 와 닿지 않기 때문에 우리의 현실에 적용해 보기 위해 일본의 사례를 원용해 보았다. 아직 국내 배출량 감축 목표가 없기 때문에 일본의 목표량과 비교해 보도록 하겠다. 한국의 약 2배의 온실가스를 배출하고 있는 일본은 2050년경 약 2억 톤 가량을 CCS 기술에 의해 감축하겠다는 계획을 갖고 있으므로 우리는 1억 톤 가량의 온실가스를 줄여야 한다고 가정할 수 있다. 이 양은 하루에 약 30만 톤 정도의 이산화탄소를 처리해야 하는 수준으로 우리나라 전체 자동차가

하루에 내 뿜는 이산화탄소 배출량인 약 20만 톤의 1.5배에 이른다.

이렇듯 어마어마한 온실가스를 어떻게 처리할 수 있을까? CCS의 개념은 1990년경 고정배출원에서 CO₂를 회수하여 해양에 용해 처리한다는 아이디어에서 시작되었다. 이러한 해양처리 방안은 CO₂를 해양에 분사시켜 용해시키는 해양분사(dissolution type) 기술과 액체 상태로 심해에 처리하는 심해저류(Lake type) 기술로 구분된다. 수심 2,500m의 온도/압력 조건에서 이산화탄소와 해수의 밀도 역전이 일어나는데 이산화탄소의 밀도가 낮은 천부에서는 주입된 CO₂가 떠 오르며 용해되고 반대로 심부에서는 밀도가 큰 CO₂가

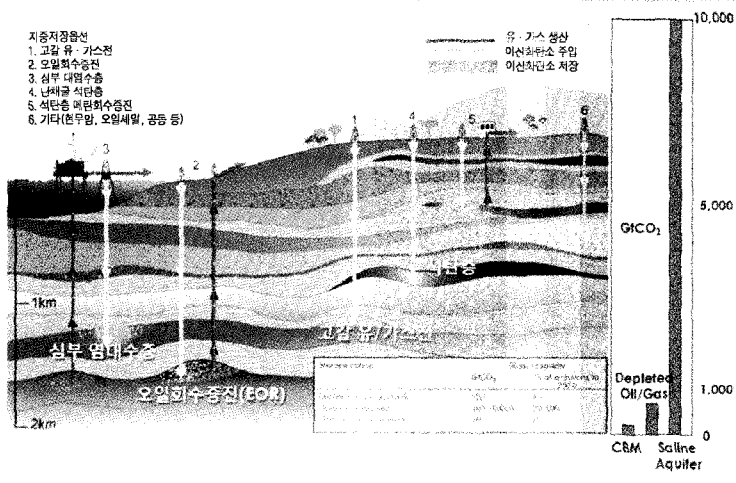


CO₂의 해양분사/심해저류기술의 개념도(IPCC)

(Enhanced Oil Recovery; 회수증진기술)과 천연가스 지하저장 기술을 응용할 수 있어 매우 실용적으로 평가되고 있다. 저장소를 결정할 때 가장 중요한 조건으로는 적어도 800m 이상 심부 지역이어야 하며 저류암은 공극률이 크고 상부에는 지상으로 누출되지 않는 불투수층이 존재하는 안정적 조건을 들 수 있다. 이들에 대해 간단히 살펴보면 다음과 같다.

유전이나 가스전(oil and gas fields)은 장기간 가압된 유체를 저장하는 능력을 검증받은 상태이기 때문에 가장 확실한 온실가스 저장소라 할 수 있다. 특히 이산화탄소를 주입함으로써 유전이나 가스전에 남아있던 잔류원유와 천연가스를 추가 생산할 수 있다는 점에서 매우 경제적인 이점이 있다. 전 세계적으로 유전이나 가스전에 저장할 수 있는 온실가스의 규모는 대략 1,000Gt 정도로 추정되고 있다.

유전이나 가스전은 지역적으로 편중되어 있어 우리의 경우 적용이 힘들다는 문제점이 있는데 비해 심부 염대수층(Deep saline reservoirs)은 비교적 널리 분포되어 있기 때문에 적용 가능성이 훨씬 높은 방법으로 저장 잠재력은 400에서 최대 1만 Gt 이상으로 평가되고 있다. 다만, 유·가스전과 달리 대수층에 온실가스를 저장하기 위해서는 안정적인 구조를 확인하는 추가 작업이 필요하다.



온실가스 지중저장방법 및 추정용량(IPCC)

바닥에 가라앉고 해수와의 접촉면에 얼음 알갱이(hydrate)가 형성되면서 안정적인 격리가 가능하다는 개념이다. 그러나 해양처리(분사/저류) 기술은 해양생태계에 미치는 부정적 영향을 우려한 환경단체의 반대에 부딪혀 2000년 이후에는 연구가 거의 중단된 상태이다. 국내에서도 2007년 관련 연구가 중단된 바 있다.

온실가스 지중저장

최근 실질적인 CO₂ 감축수단으로 인식되고 있는 지중저장 기술은 포집된 CO₂를 육상 또는 해저 지하의 지질구조에 반영구적으로 저장시키는 기술로 지질학적 환경에 따라 유·가스전, 대수층, 석탄층 등이 적용대상이다. CO₂의 지중저장은 기본적으로 석유개발기술을 기반으로 EOR

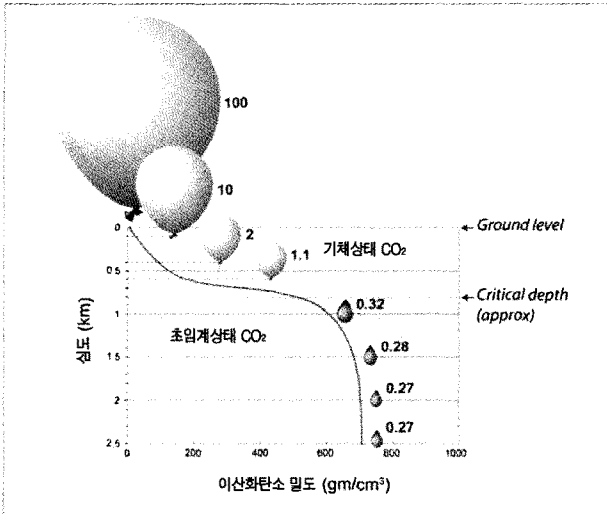


그림 3 심도에 따른 이산화탄소의 밀도 변화

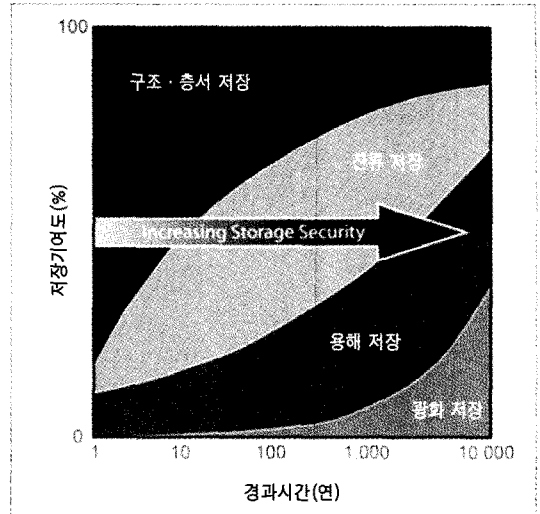


그림 4 지중저장 메커니즘 및 안정성(IPCC)

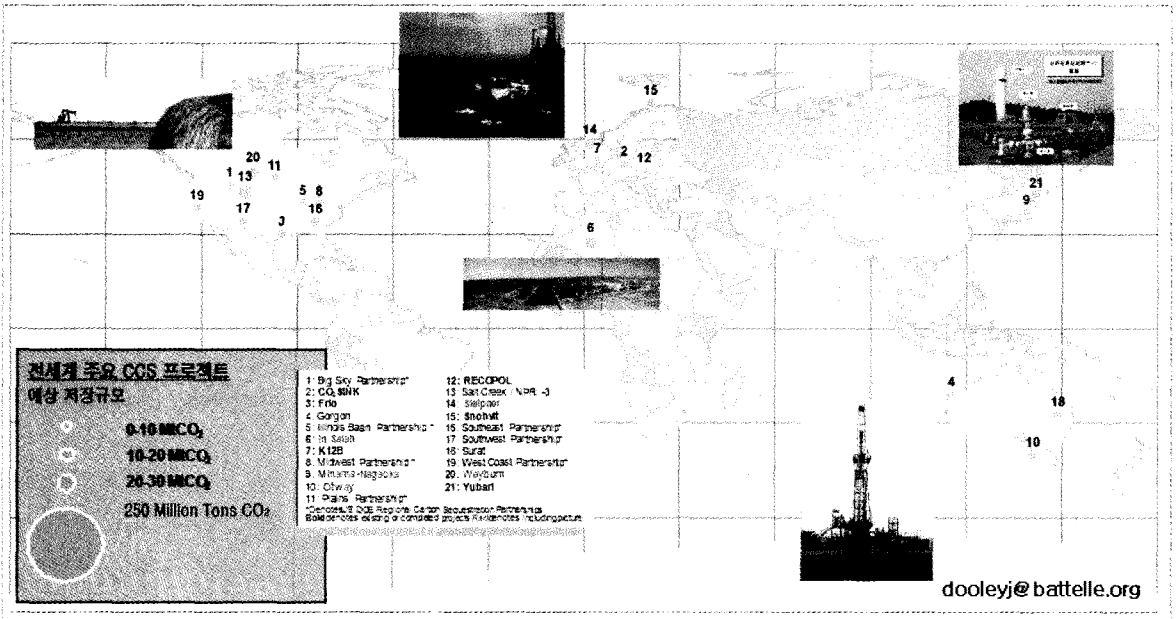


그림 5 전 세계 주요 지중저장 프로젝트 현황

유·가스전과 대수층의 온실가스 저장원리는 기본적으로 동일하다. 그림 3과 같이 대기 중에서 기체로 존재하는 이산화탄소는 지하 800m 근처의 초임계(75기압, 31°C) 상태에서는 부피

가 1/300 이하로 줄어든다. 또한 상부 불투수층 하부의 구조 트래핑(structural & stratigraphic trapping)에 의해 갇혀 있던 이산화탄소는 공극의 모세관압에 의한 잔류 트래핑(residual

trapping), 지층수에 용해되는 용해 트래핑(solubility trapping), 마지막으로 암석화가 진행되는 광화트래핑(mineral trapping) 순으로 진행되며 안정적인 형태로 변해간다.

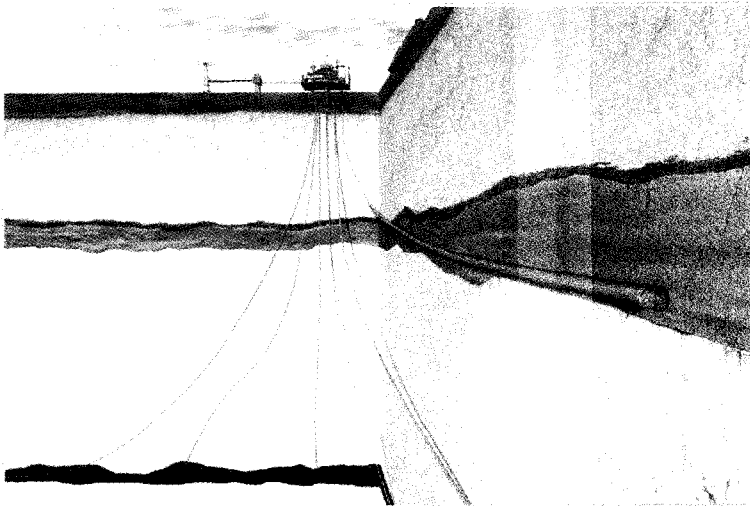


그림 6 노르웨이 슬라이프너(Sleipner) 프로젝트 모식도

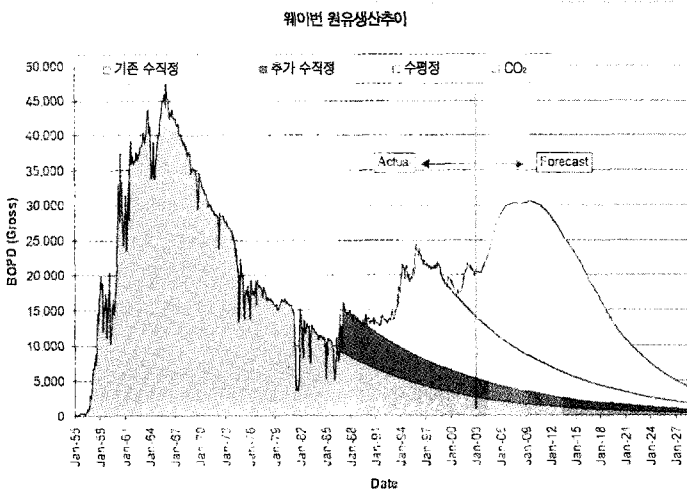


그림 7 CO₂ 주입에 의한 회수율 증진(웨이번 사례). (BOPD: 하루 오일 생산량, 배럴)

마지막 지질학적 저장대상인 석탄층 온실가스 저장은 석탄층에 이산화탄소를 흡착형태로 저장하는 것이다. 한편 기존의 석탄층에 메탄가스가 존재하는 경우에는 이산화탄소를 석탄층에 주입함으로써 메탄가스를 생산(Enhanced Coal-bed Methane)할 수 있는 일

거양득의 효과를 얻을 수 있다.

전 세계적인 지중저장 기술개발 경쟁

앞에서 언급한 것과 같이 온실가스 지중저장의 잠재력 때문에 1990년대 중반을 시작으로 전 세계적으로 많은 CO₂ 지중저장

실증 프로젝트들이 진행 또는 추진되고 있다. 노르웨이 슬라이프너(Sleipner)와 스노비트(Snohvit), 미국의 발전소와 캐나다의 유전을 연계한 웨이번(Weyburn), 알제리의 인살라(In Salah) 등의 상업용 프로젝트가 있으며, 안정성을 검증하기 위한 소규모의 연구용 프로젝트로는 미국의 프리오(Frio), 일본의 나가오카(Nagaoka), EU의 CO₂ SINK과 호주의 오토웨이(Otway) 프로젝트 등이 있다.

심부 염대수층을 이용한 대표적인 CO₂ 저장사업의 성공사례로 꼽히는 슬라이프너 프로젝트는 탄소세를 회피하기 위해 추진되었다. 슬라이프너는 노르웨이 해상의 대규모 가스전으로 생산된 천연가스에 포함된 약 10%의 이산화탄소를 분리/회수하여 상부 약 1,000m 부근 대수층에 주입하는 세계 최초의 CO₂ 지중저장 프로젝트이다. 현재 연 100만 톤 규모로 지금까지 1,000만 톤 이상 주입되었다. 이산화탄소의 분리에는 아민흡착법이 사용되었으며 이로 인해 회피되는 탄소세(약 40유로/톤)와 처리비용은 거의 비슷한 것으로 알려져 있다. 최근에는 스노비트(Snohvit) LNG 단지의 이산화탄소 회수 및 지중저장 프로젝트 가동이 시작된 바 있다.

또 하나의 대표적인 CCS 사례인 캐나다 웨이번 프로젝트는 320km 떨어져 있는 미국 노스

다코다 주에 있는 합성가스생산 업체에서 배출되는 이산화탄소를 공급받아 웨이번 유전에 주입함으로써 원유를 생산하고 있다. 2000년부터 시작되었으며 연 100만 톤의 이산화탄소 주입으로 원유 생산량을 60% 정도 늘리고 생산기간도 2035년까지 연장될 것으로 기대하고 있다.

앞에서 설명한 두 사례는 노르웨이 정부의 탄소세 또는 원유의 추가적 생산을 통해 경제성을 갖게 되었지만 일반적인 CCS 사업화에는 아직 장애물이 존재한다. CCS 기술이 UN에 의해 온실가스 감축수단으로 인정받지 못하고 있기 때문이다. 2006년 11월 기후변화 당사국 회의에서 CCS를 CDM으로 인정할 것인지에 대한 논의를 시작한 이래 EU에서는 CCS를 배출권 거래대상으로 인정하는 문제를 진지하게 검토하고 있는 등 향후 CCS 사업화의 가능성은 매우 높은 실정이다. 6월 초 일본에서 열린 우리나라를 포함한 G8+3 에너지 장관회의에서 'CCS가 기후변화 및 에너지안보에 결정적 역할을 할 것이며 2010년까지 20개의 대규모 CCS 실증 프로젝트 실행이 필요하다'는 의견에 대한 지지 선언이 채택된 바 있다.

CCS사업이 경제성을 확보하는 문제와 함께 기술적인 안전성에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 즉, 주입 이후의 이산화탄소 누출위험을 방지하기 위해 이산

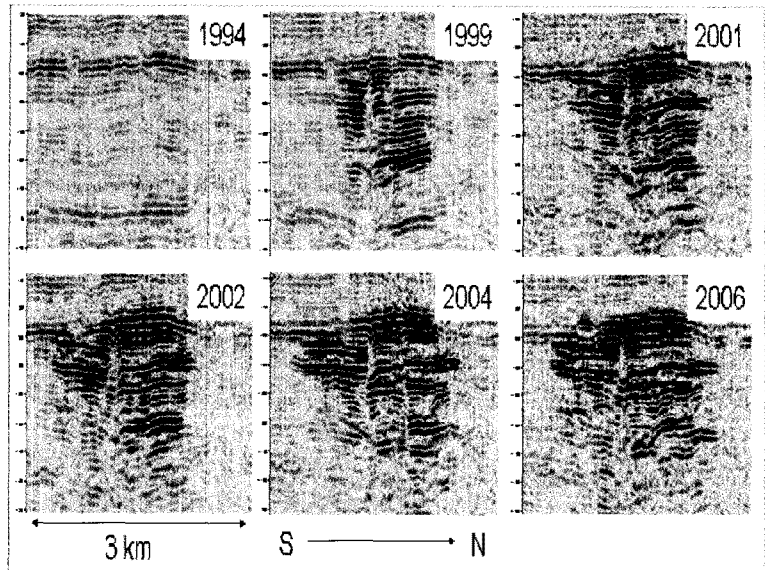


그림 8 탄성파탐사에 의한 이산화탄소 거동 모니터링(슬라이프너)

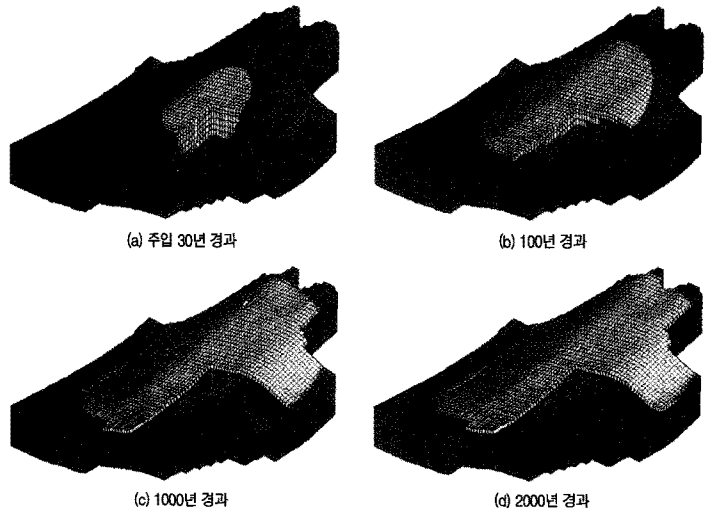
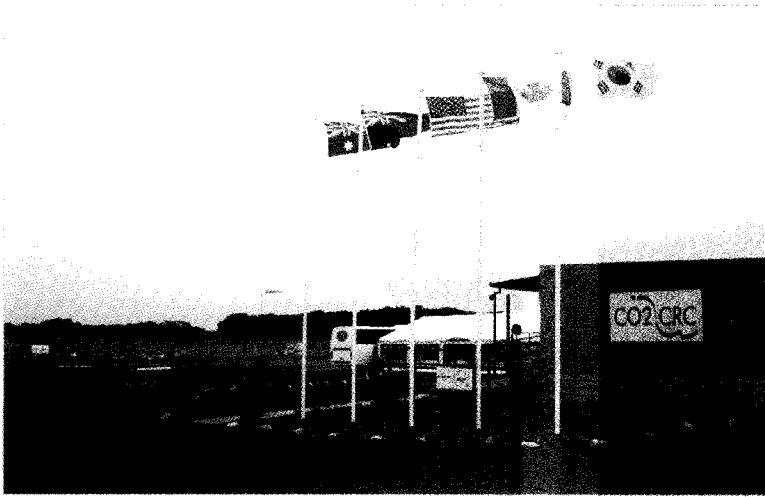


그림 9 동해-1 가스전 CO2 저장 시뮬레이션 사례

화탄소의 움직임을 모니터링하고 검증할 수 있는 방법에 대한 연구를 중심으로 진행되고 있다. 현재 거론되고 있는 가장 기본적인 모니터링 수단은 탄성파를 이용하는 것이다. 그림 8은 노르웨이 슬라이프너의 사례로 주입 이전

인 1994년의 베이스라인과 이후 2006년까지 시간에 따른 4차원 탄성파 탐사에 의한 이산화탄소 분포를 보여주고 있다.

모니터링 수단과 함께 주입된 CO₂의 장기적 거동을 예측하기 위한 시뮬레이션 기술개발 연구



호주 오프웨이 파일럿 저장실험 현장

도 활발히 진행되고 있다. 또한 탐사, 수송, 주입·저장, 모니터링 및 확인 등 전 부분의 핵심기술 검증에 위한 여러 개의 소규모 주입실험이 진행 또는 추진되고 있다. 미국의 텍사스에서 에너지지성(DOE; Department of Energy) 주도로 수행된 프리오(Frio) 프로젝트, 주입 도중 진도 6.7의 강진이 일어났던 일본의 나가오카 프로젝트, EU 지원으로 수행되고 있는 독일의 CO₂SINK 프로젝트, CSLF(Carbon Sequestration Leadership Forum) 국제공동연구의 하나이며 한국지질자원연구원이 참여기관으로 공동연구를 수행하고 있는 호주의 오프웨이(Otway) 파일럿 저장실험 등이 그 예다.

우리의 현실

CCS 사업의 열쇠는 경제적인 대용량 저장자원의 확보와 배출

원과의 연계에 있다. G8을 포함한 대부분의 선진국은 산유국으로 지중저장에 유리한 유·가스전을 확보하고 있으나 우리의 경우 울릉분지 6-1광구의 동해-1 가스전이 유일하다. 그렇다면 국내에서의 CCS 사업화 가능성은 어떠한가? 외국에 비해 유전이나 가스전과 같은 확실한 저장소는 드문 상태이나 석유자원 탐사과정에서 확보된 탐사 및 시추자료를 활용할 경우 대용량 저장자원의 확보가 가능할 것으로 기대된다.

우리가 취할 수 있는 접근방법을 분지에 따라 살펴보면 다음과 같다. 먼저 2004년부터 양질의 천연가스를 생산 중인 동해-1 가스전이 포함된 울릉분지이다. 동해-1 가스전의 가채 매장량은 LNG 환산 약 400만 톤 규모이나 하부 대수층을 고려한 고래V 구조 전체의 저장잠재량은 1억 5,000만 톤 이상으로 추정된다. 또한 반경 100km 내에 연간

7,000만 톤(포항, 광양 합산 규모)에 가까운 이산화탄소를 배출하는 POSCO가 있기 때문에 배출원과의 연계성도 비교적 좋은 편이다. 현재 생산 중인 가스전 이외에도 가스층은 발견되었으나 경제성 문제로 포기한 기타 구조를 활용하는 방안도 검토 대상이다.

그러나 가장 확실한 저장부지로 꼽히는 울릉분지는 CCS 기술이 적용될 수 있는 첫 번째 대상인 석탄화력발전소와의 거리가 적어도 200km 이상으로 수송비용을 고려할 때 경제성이 높지 않은 편이다. 석탄화력발전 분야에서 배출되는 온실가스의 양은 연간 1억 1,000만 톤 이상으로 군산, 흑산 및 제주분지와 가까운 서해안 및 삼천포 부근에 단지를 이루고 있다. 이들 3개 분지의 경우 아직 유·가스층을 발견하지 못한 상태이나 '80년대 이후 수행된 물리탐사와 시추작업 자료를 활용하여 상부 불투수층이 확인된 저류층 확보 가능성은 충분하다고 판단된다.

우리나라 GDP에서 에너지 소비가 많은 제조업 및 중화학공업이 차지하는 비율은 다른 선진국에 비해 매우 높은 수준이며 국내 에너지 수요를 점차 신재생에너지로 전환하는 것이 필요하지만 비용을 차치하더라도 단시일 내에 에너지원 전환은 불가능한 실정이다. CCS 기술은 화석에너지 기반사회와 저탄소 청정에너지 사회 또는 수소경제사회를 이

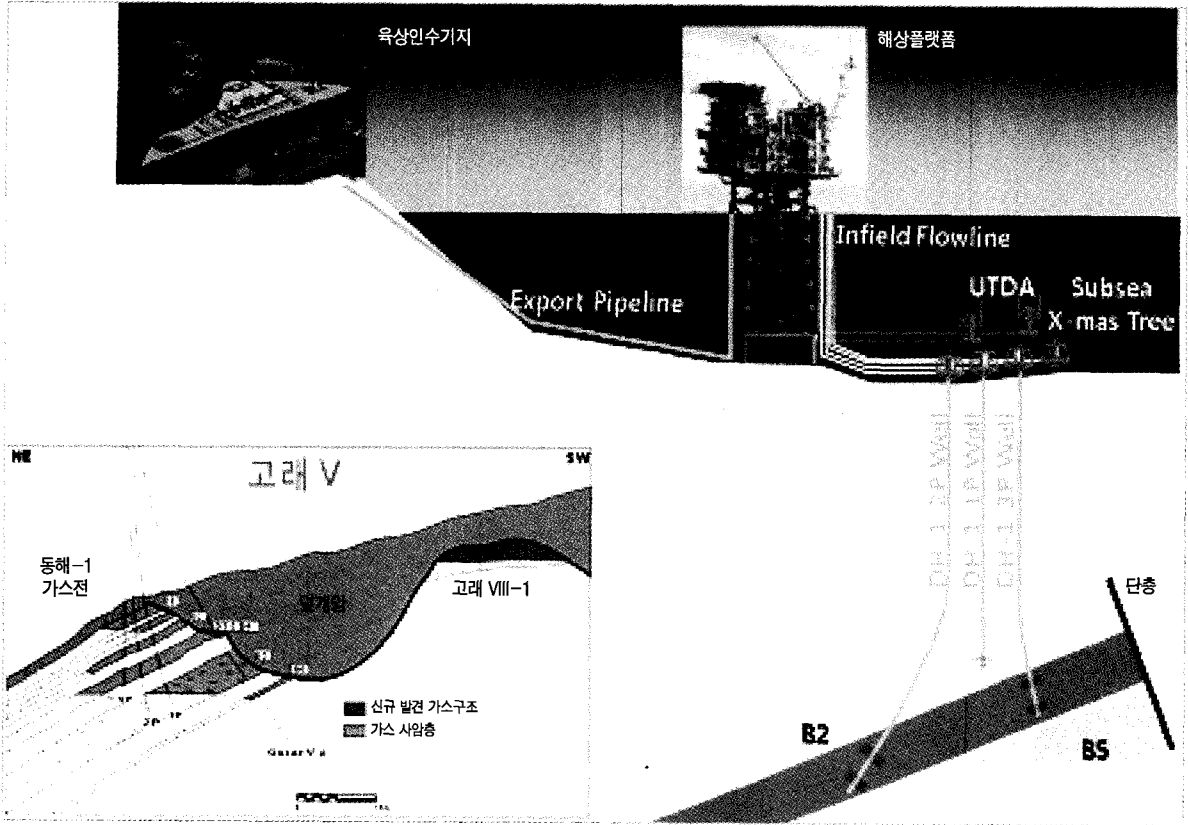


그림 11 동해-1 가스전 개발 모식도

어주는 브리징 기술(bridging technology)로 기후변화에 신음하는 지구에 숨을 터주고 온실가스 감축으로 인한 우리산업에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 수단이기도 하다. 2005년부터 본격 추진되고 있는 국내 온실가스 지중저장 관련 연구의 기술수준은 아직 걸음마 단계이며 이산화탄소 포집·회수분야와 비교해도 한참 뒤쳐져 있다. 더 이상 관련분야 연구개발 및 실용화에 투자를 늦추지 말아야 하며 포집·회수 분야와 공동보조를 취해 나아가야 한다.

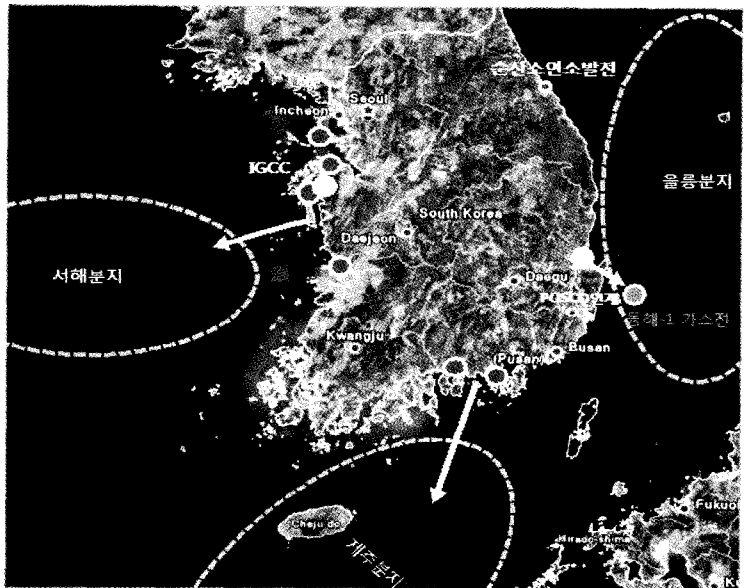


그림 12 국내 대규모 배출원 위치 및 대륙붕 분지