

## 해저 지질구조내 CO<sub>2</sub> 저장기술의 연구개발 동향 및 향후 국내 실용화 방안

강성길<sup>†</sup> · 허 철

한국해양연구원 해양시스템안전연구소

### The Latest Progress on the Development of Technologies for CO<sub>2</sub> Storage in Marine Geological Structure and its Application in Republic of Korea

Seong-Gil Kang<sup>†</sup> and Cheol Huh

Maritime & Ocean Engineering Research Institute / Korea Ocean Research & Development Institute (MOERI/KORDI),  
P.O.Box 23, Yuseong-gu, Daejeon 305-600, Korea

#### 요 약

지구 온난화를 완화하기 위한 온실가스 대량 감축 기술의 하나로써 이산화탄소 포집 및 저장기술(Carbon dioxide Capture and Storage; CCS)이 최근 국제적으로 주목 받고 있다. 본 논문에서는 CCS 기술 중 대규모의 CO<sub>2</sub>를 해양의 퇴적층에 저장하고자 하는 CO<sub>2</sub> 해양지중저장기술을 중심으로 하여 국내외 관련 연구개발 동향을 분석하고 이를 토대로 향후 국내 실용화 방안을 제안하고자 한다. 해저 지질구조내 CO<sub>2</sub> 저장기술(혹은 CO<sub>2</sub> 해양지중저장기술)은 지구 온난화 주범인 CO<sub>2</sub>의 40% 가량이 배출되는 대규모 발전원(발전소 등)에서 포집된 CO<sub>2</sub>를 초임계상태나 액체 상태로 가압하여 파이프라인이나 선박 등을 통해 수송한 후, 최종적으로 해양의 퇴적층에 대규모로 수백~수천년 이상 장기간 저장 및 관리하는 기술을 말한다. CO<sub>2</sub> 해양지중저장 기술개발을 위해서는 저장후보지 탐색 및 저장공간내 CO<sub>2</sub> 거동 모니터링과 관련한 CO<sub>2</sub> 해양지중저장 기반기술, 포집된 CO<sub>2</sub>를 선박 또는 파이프라인으로 수송하여 저장지에 주입시키는데 요구되는 제반 플랜트 및 설비구축과 관련한 CO<sub>2</sub> 해양플랜트 설비기술, 그리고 주입과정 또는 사후에 발생할 수 있는 CO<sub>2</sub> 누출 가능성과 환경에의 잠재적 영향을 평가하여 환경안정성이 담보된 CO<sub>2</sub> 저장이 되도록 하는 CO<sub>2</sub> 해양환경평가기술 등 3개 세부분야에 대한 연구가 요구된다. 국내에서 CO<sub>2</sub> 저장기술은 2005년부터 해양수산부 연구사업으로 한국해양연구원이 본격적으로 연구개발을 추진하였으며, 본 사업에서는 2005년부터 2009년까지 핵심 기반기술을 개발하고, 2010년부터 2014년까지 1만톤급 파일럿 저장을 통한 개발기술의 실증을 목표로 하고 있다. 이를 토대로 2015년부터 발전소 또는 제철소 CO<sub>2</sub> 포집기술과 연계하여 민간주도로 동해가스전 등을 대상으로 하여 보급형 100만톤급 CO<sub>2</sub> 저장을 추진할 필요가 있다. 이를 통해 향후 2050년까지 연간 1억톤 CO<sub>2</sub>를 처리하여 매년 2조원 이상의 환경비용을 절감하는 국내 실용화 방안을 모색하고 있다.

**Abstract** – To mitigate the climate change and global warming, various technologies have been internationally proposed for reducing greenhouse gas emissions. Especially, in recent, carbon dioxide capture and storage (CCS) technology is regarded as one of the most promising emission reduction options that CO<sub>2</sub> be captured from major point sources (eg., power plant) and transported for storage into the marine geological structure such as deep sea saline aquifer. The purpose of this paper is to review the latest progress on the development of technologies for CO<sub>2</sub> storage in marine geological structure and its perspective in republic of Korea. To develop the technologies for CO<sub>2</sub> storage in marine geological structure, we carried out relevant R&D project, which cover the initial survey of potentially suitable marine geological structure for CO<sub>2</sub> storage site and monitoring of the stored CO<sub>2</sub> behavior, basic design for CO<sub>2</sub> transport and storage process including onshore/offshore plant and assessment of potential environmental risk related to CO<sub>2</sub> storage in geological structure in republic of Korea. By using the results of the present researches, we can contribute to understanding not only how commercial

<sup>†</sup>Corresponding author: kangsg@moeri.re.kr

scale (about 1 MtCO<sub>2</sub>) deployment of CO<sub>2</sub> storage in the marine geological structure of East Sea, Korea, is realized but also how more reliable and safe CCS is achieved. The present study also suggests that it is possible to reduce environmental cost (about 2 trillion Won per year) with developed technology for CO<sub>2</sub> storage in marine geological structure until 2050.

**Keywords:** Climate Change(기후변화), Carbon Dioxide(이산화탄소), Carbon dioxide Capture and Storage(CCS, 이산화탄소 포집 및 저장), CO<sub>2</sub> Storage in Marine Geological Structure(CO<sub>2</sub>해양지중저장)

## 1. 서 론

‘해저 지질구조내 CO<sub>2</sub>를 격리시키는 저장기술’이하 ‘CO<sub>2</sub> 해양 지중저장기술’로 약칭은 기후변화 및 교토의정서상의 온실가스 감축요구에 대응하기 위하여 발전소 및 제철소 등 대규모 발생원에서부터 포집한 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 파이프라인이나 선박 등을 통해 수송하여 이를 해양의 퇴적층(유가스전, 심부 대염수층, 석탄층 등)에 대규모로 수백-수천년 이상 장기간 저장 및 관리하는 기술을 말한다. 대표적인 온실가스인 이산화탄소의 대기 중 농도는 산업혁명 이전 280 ppm에서 산업혁명 이후 화석연료의 급속한 사용으로 인하여 현재 375 ppm으로 증가하였고(Gentzis[2000]), 지속적으로 증가하여 2100년까지 600-950 ppm에 이를 것으로 정부간기후변화 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC)은 예측하고 있다(IPCC[2005]). 이와 같은 대기 중 CO<sub>2</sub>의 급증으로 인하여 지구 온난화 및 기상이변 조래와 함께 해수면 상승, 해수 표층의 산성화, 해양환경 내 생물 종조성 및 생태계 변화, 영양염 순환구조 변화 등 다양한 해양환경 관련 문제가 야기되고 있다(IPCC[2005], Feely *et al.*[2004], Sabine *et al.*[2004]). 이에 지구 온난화를 완화하기 위하여 1992년 6월 기후변화협약이 채택되었고 본 협약상의 온실가스 감축의무를 규정하는 교토의정서(Kyoto Protocol)가 2005년 2월 공식 발효되었다. 교토의정서의 발효에 따라 영국, 일본, 유럽연합 등 교토의정서 부속서 1의 40개 국가들은 1차 공약기간(2008-2012) 중에 온실가스의 배출량을 1990년 기준으로 평균 5.2%를 감축해야만 한다. 우리나라의 경우 부속서 I 국가에서 제외되어 현재 온실가스 배출감축 의무를 부여받지 않았지만 최근 10년간 온실가스 배출량 증가속도가 OECD 국가 중 1위, 2003년 기준으로 배출총량(582 MtCO<sub>2</sub>) 세계 9위, 에너지소비 세계 10위(2002년)임을 감안할 때, 제2차 공약기간(2013-2017년) 중에는 의무감축 대상국으로 지정될 가능성이 매우 높다. 이에 국내에서도 지구온난화 문제에 적극 대처하고 교토의정서상의 온실가스 배출규제와 관련 산업 및 경제피해에 대응할 수 있는 다각적인 기술 및 정책 개발이 집중적으로 요구되고 있다(과학기술부[2006]).

최근 세계 각국은 CO<sub>2</sub>의 약 40% 가량을 배출하는 제철소 및 발전소 등과 같은 대량의 이산화탄소 발생원으로부터 CO<sub>2</sub>를 대량으로 분리, 포집 및 수송하여 저장용량이 매우 큰 해양/육상의 유가스전, 대수층, 석탄층 또는 심해에 안정적으로 장기간 저장시키는 이산화탄소 포집 및 저장기술(Carbon dioxide Capture and Storage; CCS)을 새로운 기술적 대안으로 제시하고, 관련기술의 개발 및 실용화 방안을 적극 논의하고 있다. 이는 기존에 기후변화 대응 방안

으로 주목 받았던 대체/청정에너지 기술, 에너지효율 개선기술, 비이산화탄소 제거기술 및 생물 흡수원 확대기술 등의 기술만으로는 기후변화를 완화하기 위해 요구되는 온실가스 배출 감축요구량에 부응할 수 없다는 사실에 기인하고 있다(IPCC[2005]). 특히 CCS 기술을 이용할 경우 기존 화석에너지 기반 산업구조의 큰 변경 없이 화석연료에 기반을 둔 에너지원의 지속적인 활용이 가능하고(박상도[2006]), 미래의 기술로 제시되고 있는 수소경제 및 수소에너지 기반 산업구조로 발전하기 위한 징검다리 역할을 할 수 있다는 장점이 있다(Simbeck[2004]). 또한, 현재의 대체/청정에너지 및 에너지 효율개선 기술수준을 감안할 경우 앞으로 최소 2050년까지는 소비 에너지의 70% 이상이 기존의 화석연료가 차지할 것으로 예상된다(IEA[2006]). 따라서, 기존의 화석에너지 기반 에너지 공급 및 산업구조를 유지하면서 CO<sub>2</sub> 배출감축 요구량을 의무감축 기간 내에 실현시킬 수 있는 대안으로써 CO<sub>2</sub> 포집 및 저장(CCS)기술의 중요성은 더욱 강조될 수 있다(과학기술부[2006], 박상도[2006], 한문화[2006]).

본 논문에서는 최근 국제적으로 기후변화 대응기술의 하나로서 크게 주목을 받고 있는 이산화탄소 포집 및 저장기술(CCS), 특히 대규모의 CO<sub>2</sub>를 해양의 퇴적층에 저장할 수 있는 CO<sub>2</sub> 해양지중저장기술을 중점으로 하여 국내외 관련 연구개발 동향을 분석하고 이를 토대로 향후 국내에서 적용 가능한 본 기술의 실용화 방안을 제안하고자 한다.

## 2. 이산화탄소 포집 및 저장(CCS) 기술 연구개발 동향

CCS 기술은 Fig. 1에 기술한 바와 같이 (1) 대규모의 CO<sub>2</sub>를 배출하는 발전소, 제철소 등 발생원에서 연소 후 탈산소화, 연소 전

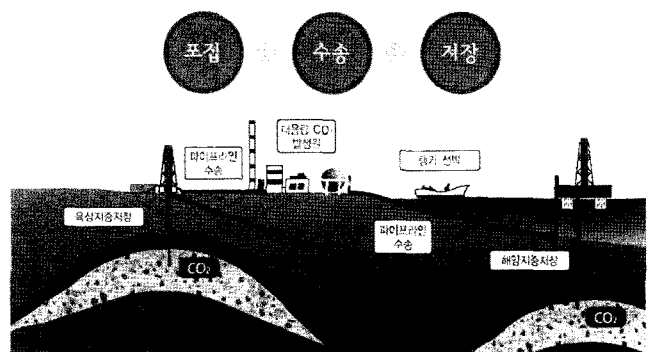


Fig. 1. Application concept of Carbon dioxide Capture and Storage (CCS) technology.

**Table 1.** Possible capacity and period of CO<sub>2</sub> storage according to target storage reservoir(IPCC[2005], Grimston *et al.*[2001])

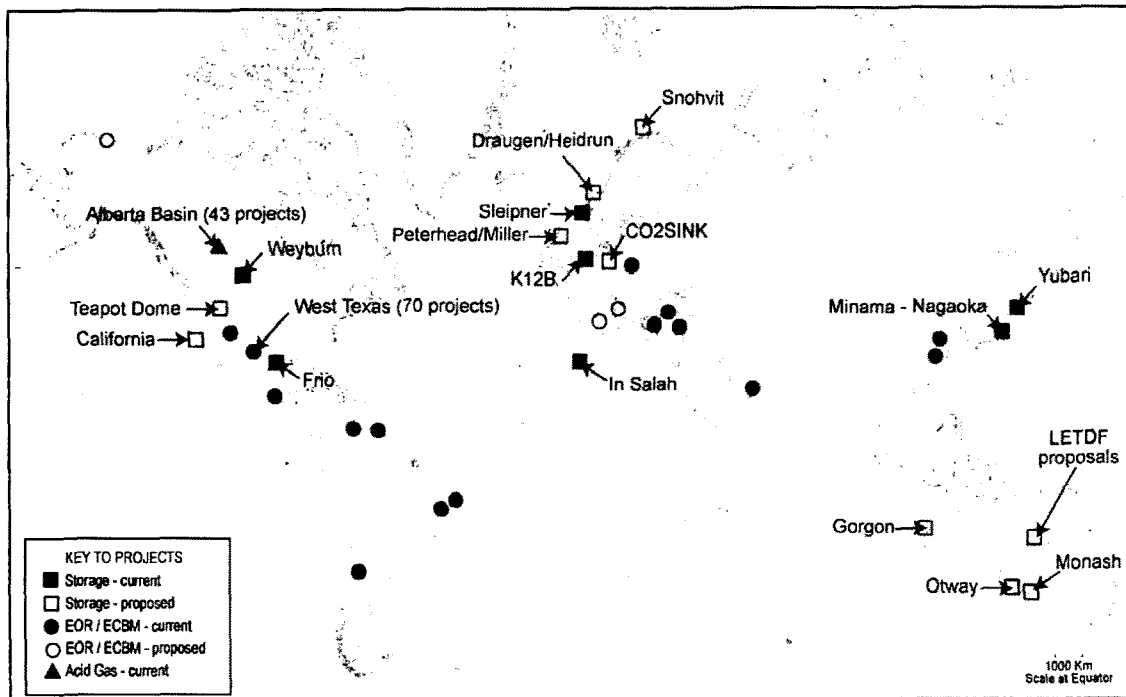
저장방식	용량 (GtCO <sub>2</sub> )	저장가능기간 (year)
유전 및 가스전(Oil and gas fields)	675-900	>100,000
심부염대수층(Deep saline formations)	1,000-10,000	>100,000
난채굴성석탄층(Unminable coal seams)	3-200	>100,000
해양(Oceans-분사, 저류식)	2,300-10,700	Up to 1,000

탈산소화 및 순산소 연소기술 등을 이용하여 CO<sub>2</sub>를 회수하는 ‘포집단계’, (2) 포집된 대용량의 CO<sub>2</sub>를 압축시켜 초임계상태 또는 가스/액체 형태로 파이프라인을 이용하거나 액화시켜 선박을 통해 운반하는 ‘수송단계’와 (3) 수송된 CO<sub>2</sub>를 해양/육상지중 및 심해에 장기간 안정적으로 주입하는 ‘저장단계’로 이루어진다(IPCC[2005]). CO<sub>2</sub> 저장용량 및 저장기간 관련하여 Table 1에 기술된 IPCC[2005] 등의 자료를 살펴보면, 막대한 양의 CO<sub>2</sub>를 해저/육상지중의 유가스전, 심부대수층 및 폐석탄층에 장기간 안정적으로 저장할 수 있는 것으로 나타났다. 참고로 지난 2002년 한해에 전 세계에서 배출된 CO<sub>2</sub>양이 대략 26 GtCO<sub>2</sub>임을 감안하면 저장에 의한 CO<sub>2</sub> 감축량의 잠재성은 상당하다 하겠다.

CO<sub>2</sub> 지중저장법은 육상이나 해양의 퇴적층에 CO<sub>2</sub>를 장기간 안정적으로 저장할 수 있는 기술로서 노르웨이, 미국, 캐나다, 호주 등 기술 선진국에서는 이미 실용화 단계에 진입하고 있는 기술인 반면에, 수심 2000 m 이하의 심층수 또는 해저에 CO<sub>2</sub>를 처리하는 해양분사저류 처리방법은 그 기술적 및 환경적 타당성 연구가 필요한 단계로서 아직 학술적 연구가 요구되는 상황이다. 지중에 대규모 석유 및 가스 등의 화석에너지 자원을 확보하고 있는 해외 선진국들은 이미 육상 및 해양퇴적층 공간을 이용하여 Fig. 2와 Table

2에 보이는 바와 같이 대규모의 CO<sub>2</sub> 저장 연구개발 사업을 진행하고 있다(IPCC[2005]). 주요 선진 국가들은 위와 같은 시범사업들을 통해서 CO<sub>2</sub> 저장의 기술적 가능성을 분석하고 앞으로 보다 실용화를 촉진하기 위한 상세기술을 개발하고 있다. 또한, 미국 주도로 2003년 6월 창립되어 현재 우리나라를 비롯해 21개국 가입한 Carbon Sequestration Leadership Forum(CSLF)은 포집된 CO<sub>2</sub>를 격리 및 저장시키는 기술을 국제적으로 공유하여 관련 기술의 실용화를 촉진하는 국제협력활동을 활발히 수행하고 있다. 지난 2005년 9월 24차 정부간기후변화패널(IPCC)회의에서는 CCS의 기술적 현황 및 실용화 가능성을 면밀히 검토한 특별보고서(IPCC[2005])를 발간하였으며, 동년 12월 11차 유엔기후변화협약당사국회의(UNFCCC) 이후부터는 본 기술을 청정개발체제(CDM)사업의 하나로 인정하는 방안을 논의하고 있다.

대규모의 CO<sub>2</sub>를 저장할 수 있는 기존의 화석에너지 자원 매장 공간과 육상공간이 부족한 우리나라는 일본, 노르웨이 등과 같이 해양 퇴적층(특히 염대수층)을 CO<sub>2</sub> 저장 공간으로 활용하는 CO<sub>2</sub> 해양지중저장기술을 실용화 하는 방향으로 정책목적을 설정하여 관련 연구를 중점적으로 수행하는 것이 필요하다. 특히, 2006년 11월 국제해사기구(International Maritime Organization; IMO)에서



**Fig. 2.** Worldwide sites where CO<sub>2</sub> storage are planned and under way(IPCC[2005]).

**Table 2.** Worldwide projects where CO<sub>2</sub> storage are planned and under way(IPCC[2005]).

Project name	Country	Injection start(year)	Approximate average daily injection rate (tCO <sub>2</sub> /day)	Total storage (planned, tCO <sub>2</sub> )	Storage reservoir type
Weyburn(C)	Canada	2000	3,000-5,000	20,000,000	EOR
In Salah(C)	Algeria	2004	3,000-4,000	17,000,000	Gas field
Sleipner(C)	Norway	1996	3,000	20,000,000	Saline formation
K12B(D)	Netherlands	2004	100-1,000(2006+)	8,000,000	Enhanced gas recovery
Frio(P)	USA	1997	177	1600	Saline formation
Fenn Big Valley(P)	Canada	2003	50	200	ECBM
Qinshui Basin(P)	China	2003	30	150	ECBM
Yubari(D)	Japan	2004	10	200	ECBM
Recopol(P)	Poland	2003	1	10	ECBM
Gorgon(Planned)(C)	Australia	2009	10,000	unknown	Saline formation
Snohvit(Planned)(C)	Norway	2006	2,000	unknown	Saline formation

C: commercial, D: demo, P: pilot

**Table 3.** Status of technology development and cost estimation of CCS component(IPCC[2005]).

CCS component	CCS technology	연구개발 단계	시범사업 단계	시장진입 단계	시장성숙 단계	비용 (US\$/tCO <sub>2</sub> )
Capture	Post-combustion			○		15-75
	Pre-combustion			○		
	Oxyfuel combustion		○			
	Industrial separation (natural gas processing, ammonia production)				○	5-55
Transportation	Pipeline				○	1-8
	Shipping			○		
Geological storage	Enhanced Oil Recovery (EOR)				○	0.5-8
	Gas or oil fields			○		
	Saline formations			○		
	Enhanced Coal Bed Methane recovery (ECBM)		○			
Ocean storage	Direct injection (dissolution type)	○				5-30
	Direct injection (lake type)	○				
Mineral carbonization	Natural silicate minerals	○				50-100
	Waste materials		○			
Industrial uses of CO <sub>2</sub>					○	

해양퇴적층을 대상으로 한 CO<sub>2</sub> 해양지중저장을 국제법적으로 허용하도록 런던협약96의정서를 개정하였고 이후 그에 따른 환경위해성 평가관리체계를 구축하고 있는 점은 ‘해양’을 매개로 한 CO<sub>2</sub> 저장의 실용화 가능성을 계속 높게 하고 있다(홍기훈 등[2005], IMO [2006], 강성길 등[2006]). 이와 같은 관점에서 우리나라도 CO<sub>2</sub> 해양지중저장기술을 매개로 하여 2013년 이후 Post-교토 체제하에서 기후변화 및 온실가스 감축에 대응하는 국가전략을 수립하여 실행할 수 있을 것이다. 우리나라 해양 저장후보지와 관련하여 한 가지 다행스러운 것은 2005년 Bradshaw와 Dance[2005]의 연구(Fig. 3)에 의한 바와 같이 CO<sub>2</sub>의 저장이 가능한 해양퇴적층이 우리나라의 해안에 폭 넓게 분포하고 있다는 점이다. 우리나라 저장후보지 선정과 관련하여 현재 기존의 해양 석유탐사 및 지질조사를 재해석하는 작업이 진행 중이므로 그 결과에 따라 우리나라 해양 대수층을 대상으로 한 CO<sub>2</sub> 저장이 어느 정도 가능할지가 구체적으로 밝혀질 것이다.

Table 3과 4는 이산화탄소의 포집, 수송 및 저장 등 CCS 기술 단계별, 세부 기술 종류별 기술현황 및 현재 비용수준을 보여준다. 국제적으로 CCS 기술은 일부 시장진입단계 및 또는 시장성숙단계에 진입해 있는 단계이다. CCS의 실용화 차원에서 중요한 항목 중의 하나는 경제성이다. 즉, 기술적으로 아무리 타당하다 할지라도 그 처리비용이 높아서 시장에서 그 기술을 채택하지 않을 경우 CCS의 실용화는 조기에 이루어지지 않을 것이다. Table 4는 노르웨이에서 수행된 대표적인 CO<sub>2</sub> 저장사업에서 소요되는 비용을 분석한 자료이다. IPCC에서 분석한 보고서를 보면, 전체적으로 포집 및 수송 부문에서 비용이 많이 소요되고 있으며 저장분야는 전체 CCS 기술 수목 구조에서 상대적으로 비용이 많이 들지 않음을 알 수 있다. 전체적으로 현재 CO<sub>2</sub> 톤당 처리비용이 평균적으로 60불 정도 소요되는데, 다른 온실가스 처리비용과 비교 시 CO<sub>2</sub> 톤당 처리비용을 약 30불 이하로 감축할 필요성이 있다(IPCC[2005]). 이를 위해서는 연구개발을 통해서 단계별 비용절감 또는 저비용 처리방식

**Table 4.** Cost analysis of Sleipner CCS project by Statoil(IPCC[2005]).

Project	Sleipner	Snohvit
Country	Norway	Norway
Start	1996	2006
Storage type	Aquifer	Aquifer
Annual CO <sub>2</sub> injection rate(MtCO <sub>2</sub> /yr)	1	0.7
Onshore/Offshore	Offshore	Offshore
Number of wells	1	1
Pipeline length (km)	0	160
Capital Investment Costs (US\$ million)		
Capture and Transport	79	143
Compression and dehydration	79	70
Pipeline	none	73
Storage	15	48
Drilling and well completion	15	25
Facilities	a	12
Other	a	11
Total capital investment costs (US\$ million)	94	191
Operating Costs (US\$ million)		
Fuel and CO <sub>2</sub> tax	7	
References	Torp and Brown, 2005	Kaarstad, 2002

a: No further breakdown figures are available. Subset of a larger system of capital and operating costs for several processes, mostly natural gas and condensate processing.

의 개발이 필요하다. 현재 전 세계적으로 그리고 국내에서도 관련 경제적으로도 타당한 CCS 기술개발을 목적으로 다양한 연구사업이 진행되고 있다. 특히 CCS 기술 분야 중에서 고비용이 요구되는 CO<sub>2</sub> 포집기술 분야는 연소공정을 수반하는 발전설비, 제철설비 등의 분야를 중심으로 하여 지난 10여년 전부터 많은 연구사업들이 진행되고 있다. 국내에서도 산업자원부 에너지관리공단의 '온실가스처리기술개발사업', 과학기술부의 '이산화탄소저감및처리(CDRS) 프론티어사업' 등에서 관련 기술개발을 추진하고 있는 바, 조기에 경제적으로도 유용한 CCS 기술의 개발이 이뤄질 것으로 예상된다.

비용 문제는 CO<sub>2</sub> 저장 관련한 처리방식에도 지대한 영향을 미친다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 단일 배관(파이프라인) 시스템에서 CO<sub>2</sub>의 수송량이 증가할수록 관련 비용이 급격히 적어지므로 포집된 CO<sub>2</sub>의 특성을 표준화하여 대용량으로 수송 및 저장이 가능하게끔 기반을 조성하는 것이 필요하다. 또한, CO<sub>2</sub> 압축스테이션을 포함한 수송시스템에 대한 지속적인 관심과 연구개발을 수행함으로써 전체 CCS 시스템의 비용절감을 기대할 수 있을 것이다.

국내에서 CO<sub>2</sub> 저장기술 분야는 포집분야보다 상대적으로 기술개발 수준이 낙후되어 있다. CO<sub>2</sub> 저장기술은 해양수산부에서 2005년부터 10개년 사업으로 'CO<sub>2</sub> 해양처리기술개발사업' 과제를 통해 본격적으로 연구 추진되기 시작하였다(강성길 등[2004]). 본 해양수산부 연구 사업에서는 해양연구원(주관)과 지질자원연구원(협동), 민간연구소인 (주)네오엔비즈 및 관련 대학(고려대, 한양대) 등의 해양학, 화학공학, 기계공학, 환경학, 지질학, 자원공학, 조선공

학, 생태학 등 다학제적 전문 연구팀이 참여하여 '해양'을 매개로 한 CO<sub>2</sub> 저장기술들을 개발하고 있다. 본 사업에서는 향후 CO<sub>2</sub> 저장지역을 선정함에 있어 육지공간이 부족하고 인구밀도가 높은 우리나라는 '해양 퇴적층'을 매개로 한 CO<sub>2</sub> 저장의 실용화 가능성이 높음에 주목하고 있다. 참고로 세계 최초로 온실가스를 감축하기 위하여 상업 및 산업 스케일의 규모로 수행되고 CO<sub>2</sub> 저장 사업으로서 Statoil 사의 Sleipner 사업도 Fig. 5에서 보는 바와 같이 해양의 염대수층을 대상으로 하고 있다. 또한, 일본의 경우도 육상 저장 공간이 빈약하고 인구밀도가 높기에 우리나라와 마찬가지로 '해양' 지역을 잠재 대상영역으로 강조하고 있다. Fig. 6은 일본의 CO<sub>2</sub> 지중 저장(염대수층) 후보지역을 보여주는데, 그 저장후보역이 대부분 해양지역임을 나타낸다(Ohsumi[2006]). 이와 같이 해양퇴적층을 대상으로 한 CO<sub>2</sub> 저장기술은 우리나라 뿐만 아니라 전 세계적으로도 많은 연구개발이 진행되고 있는바, 우리나라에서도 적절한 연구사업을 통해서 국내 실용화 가능성을 극대화 할 필요가 있다 하겠다.

### 3. 저장후보지 유형에 따른 CO<sub>2</sub> 해양지중기술 적용특성 분석

보통 이산화탄소의 지중저장이 가능한 지질 구조로는 생산층이거나 고갈된 유가스전, 심부 염대수층 및 석탄층 등이 검토 될 수 있다. 기술적으로 CO<sub>2</sub> 해양/육상지중저장의 기본적인 원리 및 주입방법은 큰 차이가 없을 수 있지만 우리나라에서의 활용성, 즉 지형학적으로 우리나라의 육상은 유가스전이 없는 특성과 육상 공간이 빈약하여 CO<sub>2</sub> 누출시 제반 환경 문제점을 야기 시킬 수 있다는 점을 감안할 때, 해양을 매개로 한, 특히 동해의 가스전이나 서해의 대수층 구조 등을 효율적으로 활용한 CO<sub>2</sub> 해양지중저장의 실현 가능성이 매우 높다고 하겠다(강성길 등[2006]). 지중저장의 경우 노르웨이, 유럽연합, 일본 및 호주 등은 '해양'을 매개로 한 지중저장이 활발하게 진행중이며 비교적 육상공간이 넓은 캐나다, 미국, 알제리 및 중국 등은 '육상'을 매개로 한 저장사업들을 추진하고 있다. 본 절에서는 향후 우리나라에서의 적용가능성이 높은 '해양'을 매개로 한 CO<sub>2</sub> 처리기술, 즉 CO<sub>2</sub> 해양지중저장이 유가스전, 심부 염대수층 및 석탄층 등 저장후보지별로 어떻게 적용되는지를 소개하고 각 방법의 국내 적용가능성을 간략히 분석한다.

#### 3.1 유가스전

유가스전(Oil and gas reservoirs)은 구조 지질학적으로 투수성이 높은 암석으로 형성되어 있고 그 상부는 불투수층인 덮개암(caprock)이 존재하여 오랜 지질시대 동안 가압된 오일과 가스를 저장할 수 있는 능력을 검증 받았다. 이러한 구조를 이용할 경우 장기간 안전하게 CO<sub>2</sub>를 저장할 수 있는데, 고갈된 유가스전은 이미 개발이 완료되어 지질학적 특성에 관한 많은 정보를 보유하고 있으며 기존의 생산설비 기술들을 효율적으로 활용하면 단기간 내에 가장 저렴한 비용으로 안전하게 CO<sub>2</sub>를 저장할 수 있는 장점이 있다. 이런 특성을 활용하여 과거부터 고갈된 유가스전은 가스 저

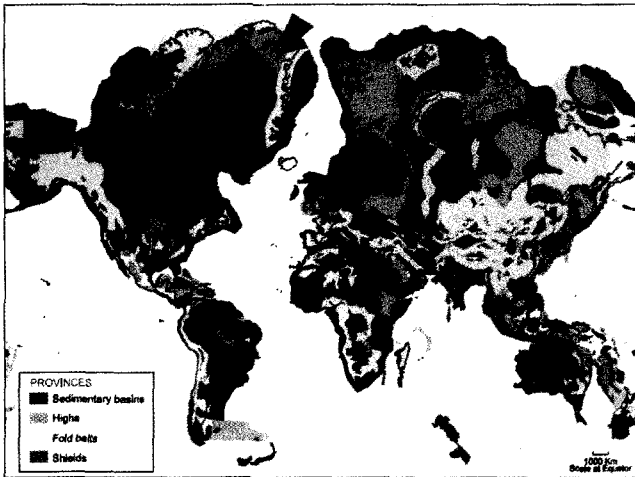


Fig. 3. Worldwide distribution of sedimentary basins where CO<sub>2</sub> can be stored(IPCC[2005], Bradshaw and Dance[2005]).

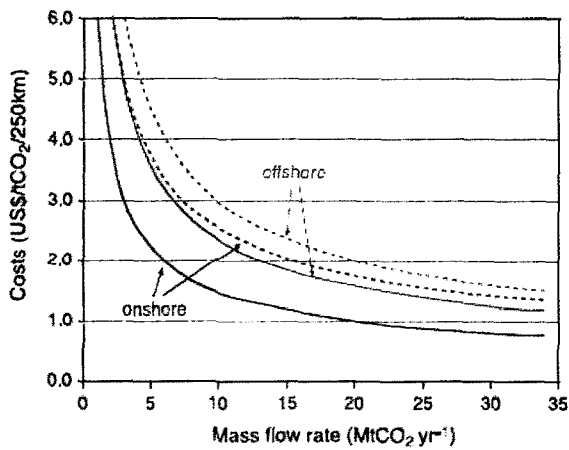


Fig. 4. CO<sub>2</sub> transport cost by pipeline system (per 250 km)(IPCC [2005]).

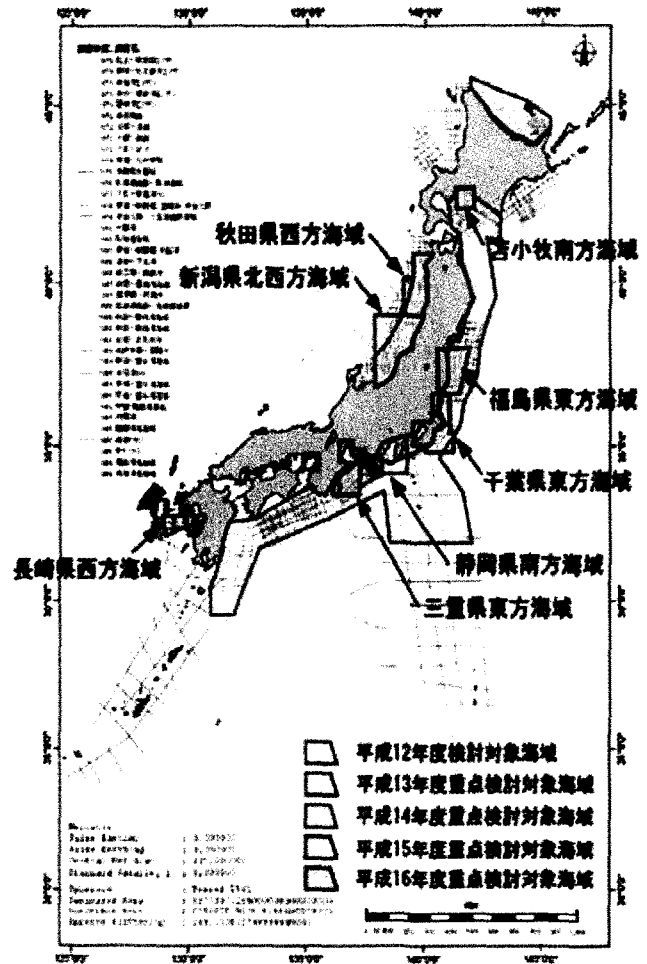


Fig. 6. Planned CO<sub>2</sub> storage sites in Japan. Most of them are located at marine geological structures such as saline aquifer. An estimated capacity of CO<sub>2</sub> storage is about 146 trillion ton(Ohsumi[2006]).

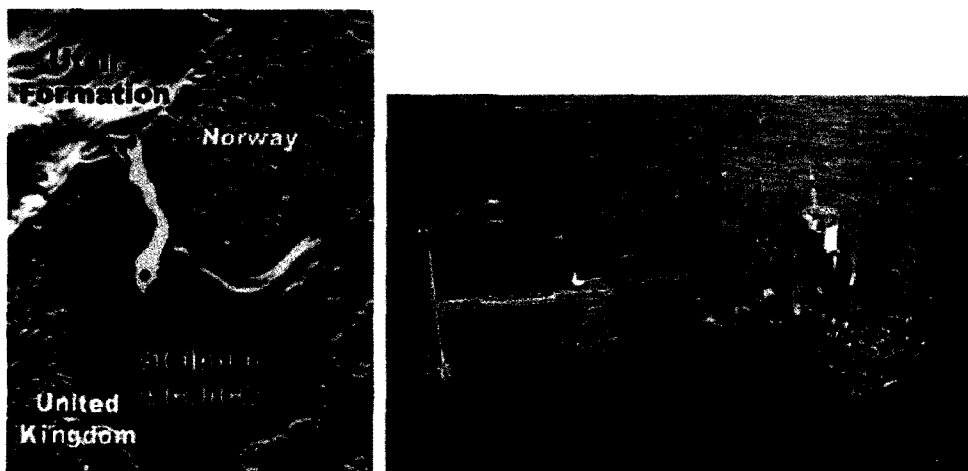


Fig. 5. Marine geological spaces and relevant facilities of Sleipner CO<sub>2</sub> storage project by Statoil, Norway (Chadwick[2007]).

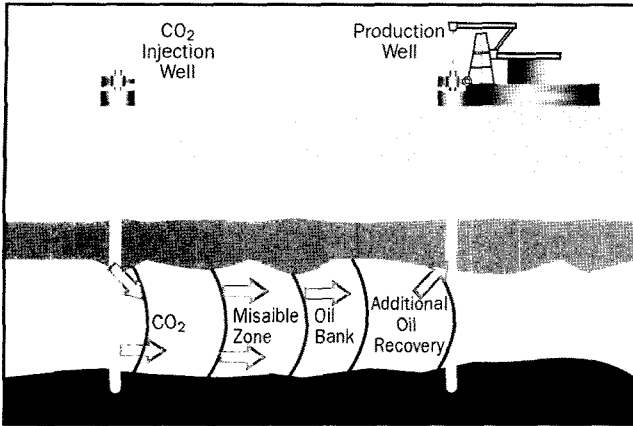


Fig. 7. CO<sub>2</sub> storage technology by Enhanced Oil Recovery(EOR) method (Source: IEA GHG R&D Programme).

장장소로 활용되어 왔으며 대표적으로 1915년 캐나다에서 성공적으로 천연가스를 지중에 주입한 첫 번째 프로젝트가 있다. 이러한 과거의 선행연구를 바탕으로 현재 북중미와 유럽 등 지역에서 CO<sub>2</sub>를 폐 유가스전에 저장하는 연구가 활발히 진행되고 있다(IEA[2002]).

기존 석유시추 과정에서도 생산효율을 증대시키기 위해서 유가스전에 CO<sub>2</sub>를 주입하는 공정방법도 있다. 즉, 유가스전에서 보통 유가스전에서 자연적인 압력차에 의한 원유의 1차 회수율은 약 5-40%이고, 추가적으로 물의 주입을 통한 2차 회수율은 약 10-20%이다. 이와 같이 낮은 회수율을 증대시키기 위해서 석유생산공정에서 3차 회수를 Fig. 7과 같이 생산중인 유전에 CO<sub>2</sub>를 주입하는 오일회수증진(Enhanced Oil Recovery; EOR)법을 활용하여 시도하는 방법도 사용되고 있다. 이 경우 매장량의 7-23%를 추가로 회수할 수 있다(박용찬 등[2005], Anderson and Newell[2003], Van Bergen *et al.*[2004], Damen *et al.*[2005]).

전세계적으로 2000년까지 84개의 오일회수증진(EOR)법을 이용한 프로젝트가 추진되었으며, 대표적인 사례로는 CO<sub>2</sub> 육상지중저장장의 경우 상업용인 캐나다의 Weyburn, CO<sub>2</sub> 해저지중저장은 연구개발 단계인 호주 남동쪽 연안에 위치한 Monash 프로젝트를 들 수 있다. 캐나다 Saskatchewan 유전에서 수행되는 Weyburn 프로젝트는 지난 2000년부터 미국 북 Dakota 지역의 Great Plains Synfuels 공장에서 포집된 CO<sub>2</sub>를 330 km 파이프를 통해 캐나다로 수송하여 육상지중에 연간 ~1 MtCO<sub>2</sub>를 주입하고 있다. 아울러 Monash 프로젝트는 호주 남동쪽 육상 연안에서 포집된 CO<sub>2</sub>를 파이프를 통해 인근 해역으로 수송하고 Halibut, Mackerel, Yellowtail 및 Kingfish 유전의 해저지중에 주입하여 오일을 회수한다.

가스전에서의 가스 회수율을 증진시키기 위해 CO<sub>2</sub>를 주입시키는 가스회수증진(EGR)법을 이용한 육상지중저장기술로는 2004년부터 알제리의 4개 가스 생산장에서 함유된 약 5-10% CO<sub>2</sub>를 아민(amine)으로 흡착하여 0.3%이하의 CO<sub>2</sub>로 감소시키고 포집된 CO<sub>2</sub>를 3개의 공으로 재주입(~1.2 MtCO<sub>2</sub>/yr)하여 천연가스의 생산을 향상시키는 상업용인 In Salah 프로젝트, 해저지중저장기술로는 육상으로부터 160 km 떨어진 노르웨이 Barents Sea의 수심 330 m

에 CO<sub>2</sub>를 수송 후 주입하는 Snohvit 프로젝트가 진행중이다. 국내의 경우 캐나다, 유럽 및 미국과 같이 대규모의 유가스전을 보유하고 있지 않지만 소규모의 천연가스를 생산하고 있는 동해-1 가스전(2004-2018년)을 활용하게 되면 향후 최대 약 1-2억톤의 CO<sub>2</sub>를 해저지중에 저장할 수 있을 것으로 예측되어진다(박용찬 등[2005]).

3.2 심부 염대수층

심부 염대수층(Dep saline aquifers)은 전세계적으로 대륙과 연안 해저 아래에 폭넓게 분포되어 있어 CO<sub>2</sub>의 주 배출원인 발전소로부터 접근성이 용이하며, 그 잠재적 저장용량은 지중저장소들 중에서 가장 큰 것으로 알려져 있다(Table 1). 장기간 안정적으로 CO<sub>2</sub>를 저장하기 위한 적합한 지질학적 구조는 많은 양의 CO<sub>2</sub>를 균일하게 주입할 수 있는 투수성이 높은 저장소와 상부에 주입된 CO<sub>2</sub>의 누출을 방지하는 불투성인 덮개암이 존재해야 하므로 기술적, 구조지질학적 측면에서 유가스전과 유사하다. CO<sub>2</sub> 저장이 가능한 심부 염대수층은 보통 해저면으로부터 약 800 m 심도 이상의 배사 구조를 가지되 상층에 불투과층이 발달된 지층들이다. 이 지층에 이산화탄소가 주입되면 높은 압력(7.38 MPa)과 온도(31.4 °C)에 의하여 높은 밀도로 저장이 가능한 초임계상태(supercritical state)에 도달하게 되어 CO<sub>2</sub>의 저장효율이 높아진다(IPCC[2005], 윤치호 [2001], Shafeen *et al.*[2004]). CO<sub>2</sub>를 염대수층으로 주입하면 물과 혼합되지 않고 용해되며 그 화학적 용존 속도는 가스 및 물의 경계면 크기 및 모양에 따라 달라진다. 즉 유체의 거동특성은 압력, 온도 및 염분과 같은 물의 물리적, 화학적인 인자에 의해 결정된다(IEA[2002]). 이러한 대수층 환경 하에 용해된 CO<sub>2</sub>는 주변 광물 또는 암석들과 서서히 상호작용을 통해 화학 반응을 일으켜 안정된 탄산염을 형성하기도 한다(Johnson[2000]).

심부 염대수층을 대상으로 한 CO<sub>2</sub> 해양저장의 대표적인 사례로 Statoil 회사가 1996년부터 추진하고 있는 노르웨이 북해에 위치한 상업용인 Sleipner 프로젝트가 있다. 본 사업은 노르웨이 정부에서 부과한 탄소세(2000년: \$38/tCO<sub>2</sub>)가 계기가 되어 천연가스 생산으로부터 발생된 CO<sub>2</sub>를 포집하여 해저지중 즉, ~1000 m 깊이의 염대수층(Utsira formation; 200m 두께)에 연간 ~1 MtCO<sub>2</sub>를 재주입

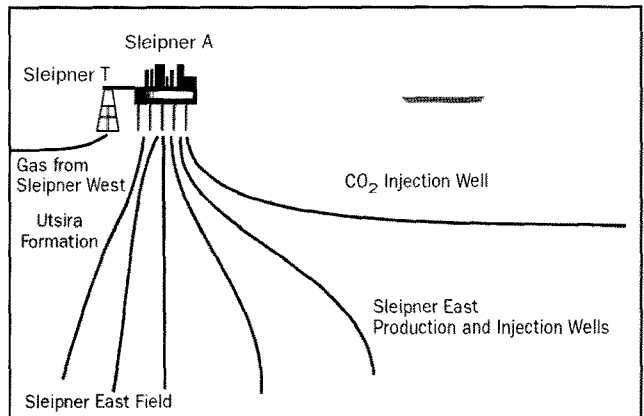


Fig. 8. CO<sub>2</sub> storage technology at saline aquifer(Source: Statoil).

하고 있다(Chadwick[2004], Torp and Gale[2004])(Fig. 8). 또한, 글로벌 석유 메이저 회사인 Exxon, Mobil 및 Pertamina 사가 유사한 사업을 계획하고 있으며 인도네시아에서는 남중국해 보르네오 연안의 Natuna 천연가스전에서 훨씬 큰 프로젝트를 추진 중에 있다(Anderson and Newell[2003]). 향후 국내에서는 한반도 주변 대륙붕을 탐사하여 보유하고 있는 기존의 물리탐사 및 시추자료를 재분석하고, 일부 CO<sub>2</sub> 저장후보지역을 대상으로 추가적인 정밀 탐사를 통해 유망 격리후보 지역을 선정하여 심부 염대수층을 활용한 CO<sub>2</sub> 해양지중저장을 추진할 가능성이 매우 높다.

3.3 석탄층

메탄을 함유한 석탄층(Coalbed methane; CBM)으로 주입정을 통해 CO<sub>2</sub>를 주입하면 석탄 표면에 흡착되어 있는 메탄을 CO<sub>2</sub>가 선택적으로 치환하여 메탄의 탈착이 촉진됨에 따라 생산정을 통하여 메탄의 생산성이 향상될 수 있다. 이러한 석탄층 메탄증진(Enhanced Coal-bed Methane; ECBM)법은 CO<sub>2</sub>를 지중에 저장함과 동시에 메탄을 생산하여 경제적인 효과를 발생시키는 점에서 유가스전 방법과 유사하지만 기술적인 측면에서는 지질학적 구조를 이용한 EOR-EGR 방법과 다르다(Fig. 9). 특히 2-3개의 이산화탄소 분자는 하나의 메탄 분자를 치환할 수 있는 높은 흡착력을 갖기 때문에 석탄 채광을 더 이상 하지 않는 폐석탄층일 경우 석탄층 메탄 증진법(ECBM)을 고려할 수 있다(Hamelinck *et al.*[2002]).

ECBM법을 이용한 첫 번째 상업적 규모의 기술개발은 미국 New Mexico, San Juan Basin에서 1996년부터 약 23,000 m<sup>3</sup>/d/well의 석탄층 메탄을 회수하는 Burlington Resources Allison Unit 파일럿 프로젝트를 들 수 있다. 그 결과에 의하면, ECMB의 전 과정 공정 후에 약 75%의 메탄 생산이 향상되었다. 또한 추가적인 ECBM 기술개발이 Alberta Research Council에 의해 캐나다 Alberta 지역의 균질한 석탄층(600-1000 m)에서 추진 중이다. 네덜란드 에너지 환경청(Netherlands Agency for Energy and the Environment; NOVEM)은 자국의 석탄층 메탄증진법에 관한 연구를 통하여 보고서를 발표하였으며(Hamelinck *et al.*[2002]), 최근에 네덜란드

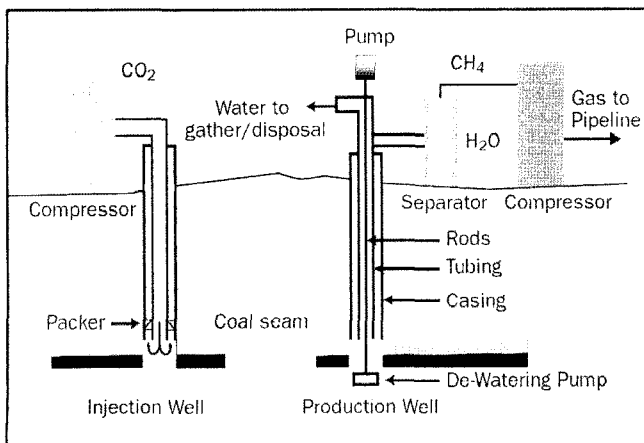


Fig. 9. CO<sub>2</sub> storage technology by Enhanced Coal-bed Methane(ECBM) method(Source: IEA GHG R&D programme).

Peel, Zuid Limburg, Achterhoek 및 Zeeland 지역의 잠재적인 저장용량과 그 기술적, 경제적 실현 가능성을 위한 구체적인 연구가 수행되었다(Hamelinck *et al.*[2002]). 국내의 경우 이미 육상 석탄 채광이 거의 개발되어 경제성이 없는 것으로 평가되고 있으나, 이에 대한 ECBM의 적용가능성을 면밀히 검토할 필요성이 있다. 아울러 향후 육상심부와 대륙연안의 해저지중에 추가적인 정밀 지질 탐사를 통하여 CO<sub>2</sub>를 저장할 수 있는 석탄층 존재 가능성을 지속적으로 조사할 필요가 있다.

4. 국내에서 추진하는 CO<sub>2</sub> 해양지중저장기술 연구현황

우리나라에서도 해양수산부의 지원 하에 지난 2005년부터 한국 해양연구원에서 CO<sub>2</sub> 해양지중저장기술의 국내 적용을 위한 제반 실용화 연구를 수행하고 있다. Fig. 10은 국내 CO<sub>2</sub> 해양지중저장 기술개발 방향 및 시나리오, Fig. 11은 CO<sub>2</sub> 해양지중처리 연구개발 로드맵 및 실증추진 로드맵을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 본 사업에서는 2005년부터 2009년까지 상기 연구 사업에서 요구되는 CO<sub>2</sub> 해양지중저장 핵심기반기술을 개발하고 이를 통하여 2010-2014년에는 1만톤급 파일럿 CO<sub>2</sub> 저장실험을 통해 개발 기술의 실증화를 꾀함과 동시에 실증저장 후보지 선정을 목표로 연구사업을 추진하고 있다. 이를 토대로 2015년부터 발전소 또는 제철소 CO<sub>2</sub> 포집기술과 연계하여 민간주도로 동해가스전 등을 대상으로 하여 보급형 100만톤급 CO<sub>2</sub> 저장을 추진하여 향후 2050년까지 연간 1억톤 CO<sub>2</sub>를 처리하여 매년 2조원 이상의 환경비용을 절감하는 국내 실용화 방안을 모색하고 있다. 아울러 국제적으로 CCS의 CDM화가 인정될 경우 중국 등을 매개로 하여 CCS의 CDM화 사업을 추진할 수 있을 것이다.

해양수산부과제로 한국해양연구원이 추진하고 있는 CO<sub>2</sub> 해양저장연구개발사업에서는 도출된 기술 로드맵에 기반하여 CO<sub>2</sub> 해저지중저장의 실용화를 위해서 (1) 국내 유망 저장해역 적지선정, 용

저장기술 개발 방향

- 방식 : 2050년까지 연간 1억톤 CO<sub>2</sub> 감축목표(2인)(국내:2천만톤, CDM:8천만톤)
- : 석유가스전 및 대수층 대상의 실용기술 개발 지향, 국내 실용화 기술 확보
- 단계 : '09년 까지 핵심기반기술 개발
- : '14년 까지 pilot 실증시스템(1만톤급) 구축 - Testbed site
- : '15년 이후 실용화/상용화 추진- 100만톤급 보급(동해가스전), (포집과 연계)
- : '50년까지 연간 1억톤 저장 구현, 국내 적용 및 국외 진출 확대

저장기술 개발 시나리오

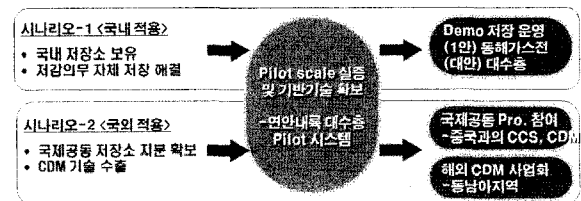


Fig. 10. Scenario of technology development and application for CO<sub>2</sub> marine geological storage(Kang *et al.*[2007]).



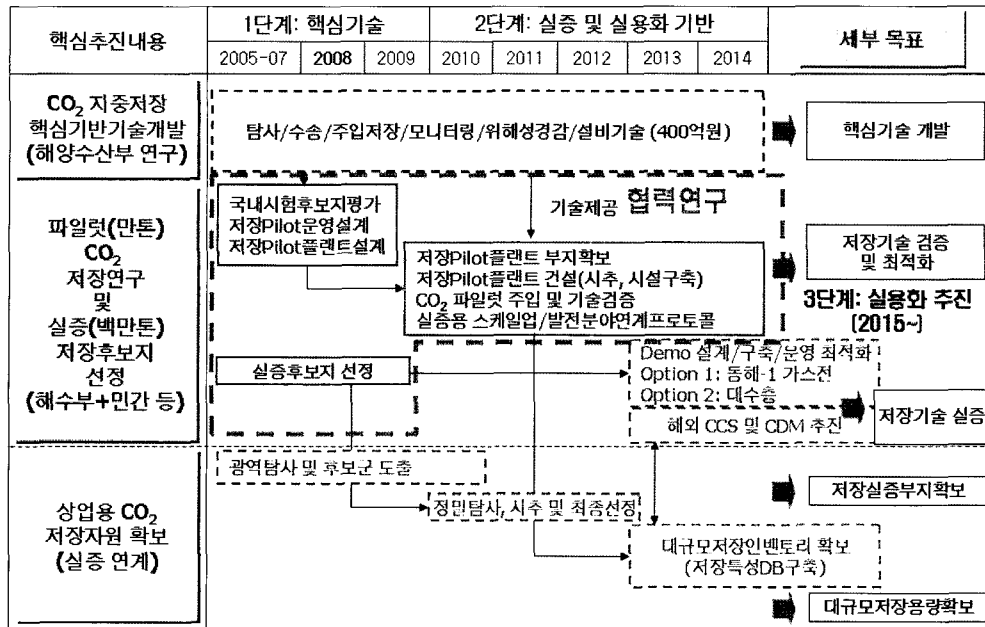


Fig. 11. Technology road map for CO<sub>2</sub> marine geological storage in Korea(Kang et al.[2007]).

량산정 및 정밀탐사, (2) CO<sub>2</sub> 하이드레이트를 포함한 상평형 거동 모델링과 유동해석, (3) CO<sub>2</sub> 수송/저장 플랜트 등 관련 설비 및 주입장비 설계기술 확보, (4) 해저퇴적층 내 CO<sub>2</sub> 거동해석 및 예측 모델 개발, (5) CO<sub>2</sub> 지중 모니터링 기술 및 안정성 평가모델 기반 구축, (6) 경제성 평가기술, (7) IMO, 일본 등과의 국제협력 및 국내 관련 법/제도 정비 등을 수행하고 있다. 위와 같은 연구범위 하에서 2007년도에 진행된 연구성과를 대략적으로 살펴보면, CO<sub>2</sub> 해양치리 기반기술로서 CCS 공정 개념설계를 수행하고 있으며 관련 CCS 전체 기초공정을 VR(Virtual Reality)로 제작하였다. 또한, CO<sub>2</sub> 수송 및 저장의 공정설계에 필수적인 물, CO<sub>2</sub> 및 질소를 포함하는 혼합가스의 상거동을 실험적으로 확인하고 하이드레이트를 포함하는 상평형 모델 및 확산모델을 고려대와 함께 개발하고 있다. CO<sub>2</sub> 처리설비 기반기술로 해상플랫폼 형식 비교분석과 초기 배치설계, 심해주입관 제원선정과 초기설계, 심해주입관의 3차원 거동 수치해석 프로그램 검증 연구, CO<sub>2</sub> 수송/방류선의 최적 설계 연구 등을 수행하고 있다. 한편 협동연구기관인 한국지질자원연구원과 공동으로 CO<sub>2</sub> 해양지중저장 후보지로 대륙붕 탐사자료 재해석을 위한 기존자료 사진조사 및 울릉분지 분석을 수행하고 있으며, CO<sub>2</sub> 지중저장자원 추정방법과 및 대륙붕 6-1광구 동해-1 가스전 적용 방안을 연구하고 있다. 또한, 파일럿 주입 시험을 위한 부지 자료 조사를 통해 1차 후보지역으로 경상계 3지역을 검토하였다. CO<sub>2</sub> 환경평가 기반기술로는 CO<sub>2</sub> 지중저장이 해수에 미칠 수 있는 영향 평가, 다양한 생물군별로 CO<sub>2</sub> 독성 영향 평가, 노출 조건에 따른 위해성 예측모델 개발, CO<sub>2</sub> 노출에 대한 해양생물 생리영향 평가기술, CO<sub>2</sub> 노출에 대한 생물검정방법 및 위해성 평가 기술 등을 개발하고 있다. 각 세부 연구 분야에 대한 구체적인 결과물들은 추후 별도의 연구논문으로 발표하고자 한다.

### 5. 향후 국내에서 적용 가능한 CO<sub>2</sub> 해양지중저장 실용화 방안

CO<sub>2</sub> 해양저장기술 실용화를 위한 연구개발을 추진함에 있어 언제, 어느 정도 규모의 CO<sub>2</sub>를 CCS로 처리하겠다는 기술상용화 전략설정이 중요하다. 물론 이 문제는 국가 전체적인 기후변화 대응전략과 맞물려서 결정되어야 하는데, 예를 들면 국가적으로 언제부터 어느 정도의 CO<sub>2</sub>를 어떤 기술들 또는 정책들에 의해 어느 업체/주체들이 감축할 것인가라는 ‘CO<sub>2</sub> 감축시간표’에 의거하여 CCS기술의 상용화 전략이 크게 달라질 수 있기에 앞으로 정부에서 관련 전문가들의 참여 하에 국가적인 CO<sub>2</sub> 감축전략을 구체화할 필요가 있다 하겠다. 참고로 CCS에 의해 과연 어느 정도의 CO<sub>2</sub>를 감축할 것인가라는 전략을 수립함에 있어 일본의 사례는 좋은 예이다. 일본의 경우 현재 CO<sub>2</sub>톤당 약 6,700엔 정도의 CCS 비용을 연구개발을 통해 2015년까지 3,000엔/CO<sub>2</sub>톤 이하로 감소시켜 2015년 연간 1백만톤의 CO<sub>2</sub> 주입사업을 시작으로 점차 많은 CO<sub>2</sub>를 해양의 심부대수층에 저장하는 계획을 수립하고 있다. 아울러 해외 개발도상국에게 온실가스를 감축시켜 자국 실적으로 인정받는 CDM을 활용하여 추가적으로 2015년 이후부터 최대 약 1억톤의 CO<sub>2</sub>를 추가적으로 감축할 계획이다(Ohsumi[2006]). 이를 토대로 최대 2050년까지 전체적으로 2.2억톤의 CO<sub>2</sub>를 매년 CCS에 의해 처리할 계획을 수립하였다.

우리나라의 경우 아직까지 국가 정책적인 차원에서 CCS를 활용한 CO<sub>2</sub> 감축계획이 구체화되지 않고 있다. 온실가스 배출량 세계9위로서 2013년 이후 교토의정서상의 온실가스 감축의무국가로 지정될 가능성이 높은 우리나라도 대략 2015년경에는 대략 연평균 약 5억톤 CO<sub>2</sub>를 감축(연평균 5% 증가율, 의무감축량을 2000년 수준으로 가정 시)해야 하는데, 세계적 기술동향과 다른 대응 방안의

**Table 5.** Estimated domestic CCS market and planned CO<sub>2</sub> reduction and storage in Korea(Kang et al.[2007])

		2010(파일럿)	2015(보급형)	2020(상용화)	2025	2030	2050
기술시장규모	국내(억달러)	1백만불	3백만불	1천만불	1억불	2억불	20억불
	국외(억달러)	1백만불	2억불	3억불	160억불	320억불	640억불
	국내(기술용량)	1만톤/년	10만톤/년	1백만톤/년	5백만톤/년	천만톤/년	1억톤/년
	국외(기술용량)	2백만톤/년	5백만톤/년	1천만톤/년	5천만톤/년	1억톤/년	2억톤/년
기술시장 점유율	국내(%)	50	100	100	100	100	100
	국외(%)	1	2	3	5	5	5
	국내(기술용량)	1만톤/년	10만톤/년	1백만톤/년	5백만톤/년	천만톤/년	1억톤/년
	국외(기술용량)	2백만톤/년	5백만톤/년	1천만톤/년	5천만톤/년	1억톤/년	2억톤/년

기술수준을 감안할 때 CCS의 활용이 필수적이며, 최소한 감축량의 20%인 연간 1억톤의 CO<sub>2</sub>를 CCS로 처리해야 할 것으로 예측된다. 이에 2015년까지는 국내에서도 CO<sub>2</sub> 저장 관련 국내 실용화를 위한 관련 핵심기술을 개발하여 1만톤급 파일럿 저장을 통해 개발기술의 실증을 수행한 다음, 2020년까지는 최소한 100만MWe 급 화력발전소, 100만톤 CO<sub>2</sub> 저장기술이 연계된 CCS의 실증을 추진해야 한다(Table 5). 아울러 경제성 있는 CCS를 위해서는 CCS 처리비용을 CO<sub>2</sub> 톤당 30불 이하로 감축시켜야 하는데 이를 위해서는 관련 핵심기술에 대한 지속적인 연구개발이 요구된다. 이와 같은 연구개발을 토대로 대략 2050년까지 대략 연간 1억톤의 CO<sub>2</sub>를 CCS에 의해 처리(국내-2천만톤, 해외-8천만톤 저장을 목표로 설정함)함을 최종적인 연구사업의 목표로 설정하고 있다.

CO<sub>2</sub> 해양저중 저장을 통한 온실가스 감축기술에 의한 사회경제적 편익은 CO<sub>2</sub> 톤당 처리비용을 20불로 가정할 때 1억톤 처리 시 20억불(2조원)에 이르는 것으로 예측된다(Table 5참조). 이러한 CO<sub>2</sub> 저장 기술을 30년 활용한다고 가정할 경우 부가가치는 600억불 정도로 추정될 수 있다. 즉, 2015년 이후 연간 1백만톤 CO<sub>2</sub>를 감축하고 2050년까지 연간 1억톤 CO<sub>2</sub>를 처리할 경우 매년 2조원 이상의 환경비용 절감이 가능하다. 대략적인 CO<sub>2</sub> 해양저중 저장처리에 의한 CCS 기술시장 추정치를 표 5에 제시하였다. CCS 기술비용 중에서 CO<sub>2</sub> 포집분야가 70% 비용부담, 저장 분야가 약 30%를 담당한다고 가정할 경우, CO<sub>2</sub> 저장분야의 순 사회경제적 편익은 2050년 대비 연간 6천 억원, 30년간 총합의 경우 18조원에 이르는 것으로 평가된다.

## 6. 결 론

최근 이산화탄소 급증으로 인한 지구온난화를 완화하기 위하여 다양한 기후변화 대응기술들의 연구가 추진되고 있다. 국제적으로 진행되고 있는 대체/정정에너지 및 에너지효율 개선 등의 기술수준을 고려할 경우, 기존의 CO<sub>2</sub> 기반 에너지 공급 및 산업구조를 당분간 유지하면서 CO<sub>2</sub> 배출감축 요구량을 의무감축 기간 내에 실현시킬 수 있는 CCS 기술이 중점 개발 되어야 한다. 특히 CCS 기술의 국제적인 연구개발 동향을 감안하면 향후 CO<sub>2</sub> 저장기술개발은 국내의 발전 및 화공 분야에서 연구되고 있는 CO<sub>2</sub> 포집분야의 기술과 연계하여 추진하는 방안이 요구된다. 앞으로 CCS에 의한

온실가스 감축 포텐셜이 매우 큼을 감안하여 기후변화 관련 국가 중점기술로서 CCS 연구개발이 추진되어야 하며, 특히 상대적으로 국내 연구가 부족한 CO<sub>2</sub> 저장 관련 기술개발을 위한 대폭적인 연구비 증액투자가 요구된다.

연구개발의 기본 방향으로는 이미 국제적으로 기술적 타당성을 인정받아 상용화 직전의 시장 진입기에 성공한 CO<sub>2</sub> 지중저장기술을 실용화 연구를 중점적으로 수행하고 있다. 특히 우리나라는 육상공간이 부족하므로 일본, 노르웨이 등과 마찬가지로 ‘해양퇴적층’을 대상으로 한 CO<sub>2</sub> 해양지중저장이 실용화 목적으로 연구가 추진될 필요가 있다 하겠다. 이러한 목적하에 한국해양연구원에서 해양수산부 연구사업으로 추진하고 있는 ‘CO<sub>2</sub> 해양처리기술개발사업’에서는 2005년부터 2009년까지 CO<sub>2</sub> 해양지중저장 핵심기반기술을 개발하고 2010-2014년에는 1만톤급 파일럿 CO<sub>2</sub> 저장실험을 통해 개발기술의 실증화, 2015년부터 발전소 또는 제철소 CO<sub>2</sub> 포집기술과 연계하여 민간주도로 동해가스전 등을 대상으로 하여 보급형 100만톤급 CO<sub>2</sub> 저장을 추진하여 향후 2050년까지 연간 1억 톤 CO<sub>2</sub>를 처리하고자 하는 연구개발을 추진하고 있다.

위와 같은 연구사업의 성공적인 추진과 연구효율 극대화를 위해서는 산학연 연구협력 체제구축을 통한 다학제적 접근이 요구된다. 참고로 현재 해양수산부 주도로 진행되고 있는 CO<sub>2</sub> 해양처리기술 개발사업은 해양환경공학, 해양물리, 해양화학, 해양생태, 해양공학, 화학공학, 기계공학, 조선공학, 자원공학, 해저지질학 등의 분야를 포괄하는 13개 연구팀이 구성되어 관련 세부기술을 연구개발하고 있다. 연구 목적 중요성 및 다학제적 연구특성을 감안할 때 효율적인 연구추진을 위해 범정부적인 CO<sub>2</sub> 저장 국가연구사업단 등과 같은 융복합화된 연구추진체계를 구축하는 것도 하나의 방안이다.

향후 CO<sub>2</sub> 해양지중저장기술의 국내 실용화를 위해서는 합리적인 해양환경 위해성 평가 및 관리체계가 구축되어야 한다. 이를 위해서는 IMO 및 관련 국제법 등에 의거하여 정부 차원에서 관계법 및 관리체계를 구축할 필요가 있다. 아울러 일본미국 등 기술선진국 관련 기관 및 전문가들과의 적극적인 교류와 국제공동연구를 통해 연구개발의 효율성을 극대화할 필요성이 있다. 특히 기후변화 당사국회의 및 국제해사기구, 국제탄소리더쉽포럼 등에서의 CCS의 실용화 관련 국제 논의동향을 파악하여 향후 국내 기술실용화를 추구할 필요가 있다.

## 후 기

본 논문은 해양수산부 연구개발 사업으로 한국해양연구원에서 추진 중인 'CO<sub>2</sub> 해양처리기술개발' 사업 연구결과의 일부입니다. 해양수산부의 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 강성길 외, 2004, "CO<sub>2</sub> 가스 해양격리시스템 연구개발 타당성 기획연구", 해양수산부.
- 강성길 외, 2006, "CO<sub>2</sub> 해양지중저장 실용화를 위한 위해성 평가 관리 체제", 이산화탄소 포집 및 저장기술 워크샵, pp. 115-140.
- 강성길 외, 2007, "CO<sub>2</sub> 해양처리기술개발사업(III) 최종보고회", 연구자료집, 해양수산부해양수산기술진흥원.
- 과학기술부, 2006, "기후변화협약 대응 연구개발 종합대책".
- 박상도, 2006, "CCS 기술의 현재와 미래", 이산화탄소 포집 및 저장기술 워크샵, pp. 23-39.
- 박용찬 외, 2005, "CO<sub>2</sub> 격리를 위한 해양퇴적층 활용기술", 한국 해양환경공학회, 추계학술대회논문집, pp. 188-193.
- 윤치호, 2001, "온실효과 감소를 위한 이산화탄소의 격리에 관한 연구", 한국자원공학회지, 제38권, pp. 316-321.
- 한문희, 2006, "기후변화협약대응 국가 R&D 전략", 이산화탄소 포집 및 저장기술 워크샵, pp. 3-20.
- 홍기훈, 박찬호, 김한준, 2005, "이산화탄소 해저 지질 구조 격리: 기술 현황과 제도 예비검토", 한국해양환경공학회지, 제8권, pp. 203-212.
- Anderson, S. and Newell, R., 2003, "Prospects for Carbon Capture and Storage Technologies", Discussion Paper, Resources for the Future, Washington.
- Bradshaw, J.B. and T. Dance, 2005, "Mapping geological storage prospectivity of CO<sub>2</sub> for the world sedimentary basins and regional source to sink matching", Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-7), Vol. I, pp. 583-592.
- Chadwick, R.A., Zweigel, P., Gregersen, U., Kirby, G.A., Holloway, S. and Johannessen, P.N., 2004, "Geological reservoir characterization of a CO<sub>2</sub> storage site: The Utsira Sand, Sleipner, northern North Sea", Energy, Vol. 29, pp. 1371-1381.
- Chadwick A., Arts, R., Bernstone, C., May, F., Thibeau, S. and Zweigel, P., 2007, "Best practice for the storage of CO<sub>2</sub> in saline aquifer: Observations and guidelines from the SACA and CO<sub>2</sub> STORE projects".
- Damen, K., Faaij, A., Van Bergen, F., Gale, J. and Lysen, E., 2005, "Identification of early opportunities for CO<sub>2</sub> sequestration-worldwide screening for CO<sub>2</sub>-EOR and CO<sub>2</sub>-ECBM projects", Energy, Vol. 30, pp. 1931-1952.
- Feely, R.A., Sabine, C.L., Kee, K., Berelson, W., Kleypas, J., Febry, V.J. and Millero, F.J., 2004, "Impact of anthropogenic CO<sub>2</sub> on the CaCO<sub>3</sub> system in the oceans", Science, Vol. 305, pp. 362-366.
- Gentzis, T., 2000, "Subsurface sequestration of carbon dioxide - an overview from an Alberta (Canada) perspective", International Journal of Coal Geology, Vol. 43, pp. 287-305.
- Grimston, M.C., Karakoussis, V., Fouquet, R., van der Vorst, R., Pearson, P. and Leach, M., 2001, "The European and global potential of carbon dioxide sequestration in tackling climate change", Climate Policy, Vol. 1, pp. 155-171.
- Hamelinck, C.N., Faaij, A.P.C., Turkenhurg, W.C., van Bergen, F., Pagnier, H.J.M., Barzandji, O.H.M., Wolf, K.H.A.A. and Ruijg, G.J., 2002, "CO<sub>2</sub> enhanced coalbed methane production in the Netherlands", Energy, Vol. 27, pp. 647-674.
- IEA, 2002, "Solutions for the 21st century: Zero emissions technologies for fossil fuels", Technology status report.
- IEA, 2006, "Energy technology perspectives".
- IMO, 2006, "Report of the meeting of the SG intersessional technical working group on CO<sub>2</sub> sequestration".
- IPCC, 2005, "IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage", Cambridge University Press(<http://www.ipcc.ch>).
- Johnson, J.W., 2000, "A solution for carbon dioxide overload", Science & Technology Review, December.
- Ohsumi, T., 2006, "일본의 지중저장 연구사례", 이산화탄소 포집 및 저장기술 워크샵, pp. 143~158.
- Sabine, C.L., Feely, R.A., Gruber, N., Key, R.M., Lee, K., Bullister, J.L., Wanninkhof, R., Wong, C.S., Wallace, D.W.R., Tilbrook, B., Millero, F.J., Peng, T.H., Kozyr, A., Ono, T. and Rios, A.F., 2004, "The oceanic sink for anthropogenic CO<sub>2</sub>", Science, Vol. 305, pp. 367-371.
- Shafeen, A., Croiset, E., Douglas, P.L. and Chatzis, I., 2004, "CO<sub>2</sub> sequestration in Ontario, Canada. Part I: storage evaluation of potential reservoirs", Energy Conversion and Management, Vol. 45, pp. 2645-2659.
- Simbeck, D.R., 2004, "CO<sub>2</sub> capture and storage - the essential bridge to the hydrogen economy", Energy, Vol. 29, pp. 1633-1641.
- Torp, T.A. and Gale, J., 2004, "Demonstrating storage of CO<sub>2</sub> in geological reservoirs: The Sleipner and SACS projects", Energy, Vol. 29, pp. 1361-1369.
- Van Bergen, F., Gale, J., Damen, K.J. and Wildenborg, A.F.B., 2004, "Worldwide selection of early opportunities for CO<sub>2</sub>-enhanced oil recovery and CO<sub>2</sub>-enhanced coal bed methane production", Energy, Vol. 29, pp. 1611-1621.

2007년 11월 26일 원고접수

2008년 2월 1일 수정본 채택