

이산화탄소의 해양지중저장과 환경 안전성 평가 방안

김병모^{1,2} · 최태섭¹ · 이정석^{1,†} · 박영규³ · 강성길⁴ · 전의찬⁵

¹네오엔비즈 환경안전연구소

²세종대학교 지구환경과학과

³한국해양과학기술원 해양기후환경연구본부

⁴한국해양과학기술원 선박해양플랜트연구소 해양CCS연구단

⁵세종대학교 환경에너지융합학과

Evaluation System of Environmental Safety on Marine Geological Sequestration of Captured Carbon Dioxide

Byeong-Mo Gim^{1,2}, Tae Seob Choi¹, Jung-Suk Lee^{1,†}, Young-Gyu Park³,

Seong-Gil Kang⁴, and Ei-Chan Jeon⁵

¹*Institute of Environmental Protection and Safety, NeoEnBiz Co. Daewoo Technopark A-1306, Dodangdong, Bucheon, Kyeonggi-do 420-806, Korea*

²*Department of Earth & Environmental Sciences, Sejong University, 209 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul 143-747, Korea*

³*Ocean Circulation and Climate Research Division, Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST), 787 Haeam-ro, Sangnok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do 426-744, Korea*

⁴*Offshore CCS Research Unit, Maritime and Ocean Engineering Research Institute, Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST), 32 1312beon-gil, Yuseong-daero, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea*

⁵*Department of Environment & Energy, Sejong University, 209 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul 143-747, Korea*

요 약

이산화탄소 포집 및 저장기술(CCS)은 기후변화에 대응하는 효과적인 온실가스 저감기술로서 평가받고 있다. 국내에서는 이산화탄소 포집 및 해양지중저장사업이 2020년 실증화를 목표로 빠르게 진행되고 있다. 하지만 CCS 기술을 실제 환경에 적용하는 과정에서는 수송, 저장과정에서의 CO₂ 누출 문제나 영구적인 격리에 대한 불확실성 등의 환경 안전성 관리를 위한 제도적 기반은 마련되어있지 않은 실정이다. 이로 인하여 CCS 사업시행 과정에서 주민이나 이해당사자의 사업 거부 및 이로 인한 사업의 지연 등의 문제가 발생할 수 있다. 원활한 사업 진행에 필요한 사회적 수용성을 강화하기 위해서는 환경 안전성에 대한 국가 차원의 관리 체계 마련이 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 환경 안전성 관리 체계의 가장 기본적인 제도라 할 수 있는 환경영향평가와 환경위해성평가 등의 국내외 관련 제도 및 규정 등을 살펴 보고, 선진국에서 수행되고 있는 CCS 사업에 대한 환경영향평가기술과 사례를 조사하여, 국내의 제도개선 방향과 기술개발 및 관리방안에 대해 제안하고자 하였다.

Abstract – Carbon Capture and Storage (CCS) is a mitigation technology essential in tackling global climate change. In Korea, many research projects are aimed to commercialize CCS business around 2020. Public acceptance can be a key factor to affect the successful proceeds of CCS near future. Therefore this paper provides a concise insight into the application of environmental impact assessment and risk assessment procedures to support the sustainable CCS projects. Furthermore, bottlenecks regarding the environmental impacts assessment and related domestic and foreign legislation are revised. Finally, suggestions to overcome these bottlenecks and recommendations for future research are made in conclusion.

Keywords: CO₂(이산화탄소), CCS(이산화탄소 포집 및 저장), geological storage(지중저장), environmental impact assessment(환경영향평가), environmental risk assessment(환경위해성평가)

[†]Corresponding author: jslee@neoenbiz.com

1. 서론 및 배경

1.1 이산화탄소 포집 및 저장 개요

이산화탄소 포집 및 저장(carbon capture and storage, CCS)기술은 석유화학공장, 화력발전소, 시멘트공장, 제철소 등 화석연료를 주 에너지원으로 사용하는 CO₂ 대량 배출원에서 발생하는 이산화탄소를 대기로 배출되기 전에 포집한 후, 파이프라인과 선박 등을 이용하여 수송하고, 다시 이를 영구적으로 격리하는 기술이다(Fig. 1). 전 세계적으로 영구적인 격리를 위해서 여러 방안이 제시되고 있는데, 그 중에서 육상 및 해저 지층 구조에 CO₂를 주입하여 저장하는 기술이 가장 활발하게 시도되고 있다(IEA[2012]).

기후변화정부간위원회(IPCC; Intergovernmental Panel on Climate Change)에서는 지구온난화 문제 해결을 위한 효과적인 수단의 하나로 CCS 기술을 제시한 바 있다(IPCC[2005]). 또한, 국제에너지기구(IEA; International Energy Agency)는 세계 평균온도 상승을 2 °C 이하로 제한하기 위한 온실가스 감축목표를 달성하기 위해서 에너지 관련 탄소 배출을 획기적으로 감축해야 할 것으로 평가했는데, 이 목표를 달성하기 위한 최저비용 시나리오에서 2050년의 총 42Gt 배출 감축량 중에서 7Gt을 CCS를 통하여 감축할 수 있을 것으로 예상하고 있다(IEA[2012]). 이와 같이 에너지 부문과 기타 사업모두에서 이산화탄소 배출을 현저하게 감축시킬 수 있기 때문에 점점 더 많은 관련 기구나 기관에서 CCS를 저탄소 기술의 핵심요소로서 평가하고 있다(IEA[2003]; NETL[2010a]; CCST [2011]).

1.2 국내외 해양지중저장 사업 현황

전 세계적으로 여러 대형 CCS 프로젝트가 시범적으로 운영 중에 있거나 시작되고 있다(GCCSI[2012]). 현재 운영 중인 8개의 프로젝트를 통해 연간 약 2,300만 톤의 CO₂를 저장하고 있으며, 대표적인 프로젝트로는 미국의 Cetrury plant(연간 500만 톤)와 알제리의 In Salah(연간 100만 톤), 노르웨이의 Snøhvit(연간 70만 톤) 등을 들 수 있다. 또한, 8개의 건설 중인 프로젝트를 통해 2015년까지 연간 3,600만 톤 이상으로 저장량이 증가할 것을 기대하고 있다. 이 중에는 2015년 본격적인 운영을 목표로 하는 호주의 Gorgon project(연간 340만~410만 톤)가 있으며(NETL[2010b]), 이미 활발하게 운영 중인 미국의 Illinois project(연간 100만 톤)가 있다.

국내에서는 2010년 7월, 녹색성장위원회에서 발표한 국가 CCS

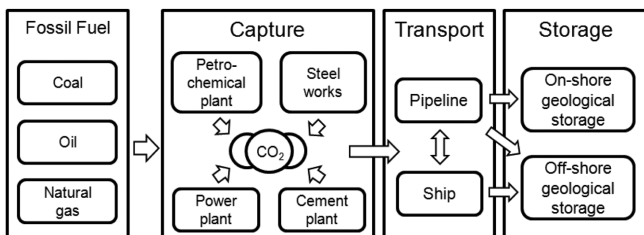


Fig. 1. Process flow diagram of Carbon Capture and Storage (CCS).

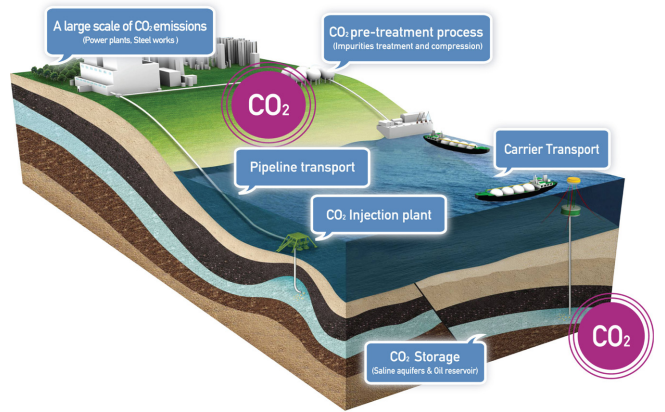


Fig. 2. Schematic illustration of the concept of geological storage of CO₂ (Source: KIOST).

종합추진계획에 따라, 정부와 민간이 공동 투자하여 2020년까지 이산화탄소 100만 톤급 저장 실증사업을 추진기로 하고, 정부부처별로 역할을 분담하여 진행 중에 있다(PCGG[2010]). 포집과 저장 기술 관련해서는 교육과학기술부에서 기초원천기술개발을 목적으로 0.5MW 이하 소규모 실증사업을 수행하고, 지식경제부와 국토해양부는 상용화를 위한 핵심기술개발 및 실증사업을 담당하는 것으로 하였다. 저장지의 탐사와 관리 관련해서는 CO₂ 누출방지, 모니터링 위해성평가기술개발 및 시설 실증을 위하여, 환경부는 육상 지중저장 부분, 국토해양부는 해양 지중저장 부분에 대해 기술개발 역할을 담당하고 있다(Fig. 2).

지형학적으로 우리나라의 육상 환경 조건은 유가스전이 없고, 지표 공간이 부족하여 인구 밀도가 높은 특성이 있다. 따라서 육상에서는 대량의 저장 공간 확보가 어려울 뿐만 아니라 만약의 경우 CO₂가 누출되면 심각한 민원을 야기시킬 수 있다는 점이 우려된다. 이에 따라 보다 많은 비용을 필요로 한다는 단점에도 불구하고, 해양을 매개로 동해의 가스전이나 서해의 대수층 구조 등을 효율적으로 활용한 CO₂ 해양지중저장의 실현 가능성이 상대적으로 더 높을 것으로 평가되고 있다(MLTM[2010]). 이에 국토해양부는 지난 다년간의 연구 사업을 통해 국가 CO₂ 폐기물 저장지도 구축 및 실증부지선정 연구, 해양 내 대규모 CO₂ 수송체계 구축 및 해양 CCS 전공정 누출방지 관리기술 연구, 해양지중저장 환경위해성 평가관리기술 기초연구를 수행하고 있다. 이러한 연구를 통해, 2012년 4월, 동해 울릉분지 인근 해저퇴적층에서 51억 톤 규모의 저장 가능할 후보 지역을 발표한 바 있다. 또한, 국가 CCS 종합추진계획에 따라 2016년부터 이산화탄소 포집기술과 연계한 100만 톤 CO₂ 해양지중저장 실증사업을 2020년까지 실시하고 그 이후에는 상용화한다는 계획을 수립하였다. 이를 위해, CO₂ 누출 가능성과 환경에의 잠재적인 영향을 평가하는 해양환경 관리체계 구축 등에 필요한 기술개발과 해양 분야의 관련 법제도 정비 등의 사업을 지속적으로 수행하고 있다(MLTM[2012]).

2. 현행 환경 평가 제도와 CCS

2.1 CCS사업의 환경 안전성

CCS는 CO₂를 효과적으로 감축한다는 장점이 있다. 하지만, CCS의 각 단계, 즉 포집, 수송, 저장과정 중에서 발생 가능한 CO₂의 누출은 환경 안전성 문제를 유발시킬 수 있다는 단점도 있다. 또한, 포집 과정에서 발생하는 암모니아, 미세먼지, 황산화물, 질소산화물 등이 환경 중에 유출되면 인체 건강에 악영향을 줄 가능성이 있으며 (Thitakamol *et al.*[2007]), 포집된 이산화탄소(CO₂ stream)내의 황산화물은 수송 파이프의 부식을 초래할 수도 있다(Stanger *et al.*[2011]). CO₂ 스트림은 일반적으로 10 Mpa 이상의 압력으로 압축되어 수송저장되므로(Svensson *et al.*[2005]), 이 과정에서 부식이 일어날 수 있고, 구조적 결함이나 높은 압력에 의한 누출사고 가능성 역시 존재한다(Burgherr *et al.*[2005]). 가능성은 희박하지만, CCS 과정 중 발생한 대량의 누출로 인해 공기 중에 CO₂가 7% 이상의 농도로 증가하게 되면, 인체에도 즉각적인 위해를 미칠 수 있다. 비록 소량이라 하더라도 장기간에 걸친 CO₂의 누출은 인간이 식수나 농업 용수로 이용하는 지표 부근 지하수를 오염시킬 가능성도 있다(Xie *et al.*[2009]). 하지만 육상 환경에 누출된 이산화탄소는 쉽게 대기 중으로 확산되므로 그 피해가 상대적으로 국지적, 단기적으로 나타날 가능성이 높다.

반면에 해양 환경에서 CO₂는 대기에 비해 확산이 느리고 해수의 화학적 특성을 변화시킬 수 있으므로 해양지중저장 과정에서의 CO₂ 누출은 보다 장기적으로 해양 생태계 피해를 초래할 가능성이 있다. 누출된 CO₂에 의한 pH 변화로 인해 외부환경이 거의 변하지 않는 심해에 서식하는 생물의 대부분은 주변 해수의 pH가 0.1 정도만 변해도 유의한 생리적인 영향을 받을 수 있다는 연구 결과가 있으며(Seibel *et al.*[2003]), 상대적으로 pH 변화에 잘 적응하는 연안 생물의 경우에도 pH가 1.0 이상 급격하게 변화하게 되면 피해 영향을 받을 수 있음은 이미 오래전부터 실험을 통해 알려져 왔다(Knutzen[1981]). 최근에는 고농도 이산화탄소의 유입은 해수의 화학적 조성을 변화시켜 산호나 석회조류와 같이 탄산염을 이용하여 석회질의 몸체를 구성하는 생물들에게 심각한 피해 영향을 미칠 수 있다는 여러 연구 결과가 나온 바 있다(Gattuso *et al.*[2000]; Riebesell *et al.*[2000]). 따라서 비록 가능성은 낮지만 해양 지중 저장 사업 과정에서 발생할 수 있는 다양한 경로의 CO₂ 누출이 해양 생태계와 생물들에게 바람직하지 않은 영향을 미칠 가능성은 부정하기 어렵다. 따라서 일부 선진국에서는 CCS 사업의 잠재적인 환경적, 사회 경제적 영향에 대한 심각한 우려가 존재하는 것이 사실이다.

2.2 CCS사업의 사회적 수용성 문제

이산화탄소의 누출에 의한 환경문제는 CCS 사업 시행시 이해관계자를 비롯한 지역 주민이나 환경단체 등의 반대를 유발하는 원인을 제공할 수 있다. 캐나다 Weyburn-Midale 프로젝트의 저장지 주변 농장의 소유자인 Kerr 부부는 동물의 죽음과 주변 표층수에서의 기포발생 등의 문제의 원인을 CO₂ 주입과 관련이 있다고 보

고 민원을 제기함에 따라 전면적인 환경 조사가 진행되기도 하였다(IPAC[2011]). 현재까지 전문가들이 동위원소 분석 등 다양한 현장조사를 수행한 결과 지표면에서 관찰된 고농도의 CO₂는 주입된 가스에 기원하는 것으로 보기 어렵다는 결론을 내렸다. 하지만, 사전에 충분한 배경 조사를 통해 사업 이전에도 이미 고농도의 CO₂가 존재하는 환경이 자연적으로 있었음을 밝혔다면 주민들이 놀라 대피하는 소동은 피할 수 있었을 것이다.

네덜란드 Barendrecht 프로젝트는 사업에 의한 환경파괴와 저장지가 인구밀집지역에 위치한 것에 대한 반대여론의 확산으로 사업이 보류된 대표적 사례이다(ECN[2010]). 이러한 사례는 환경을 매개체로 한 대형 사업의 경우 추진과정에서의 이해당사자와 지역주민에 대한 충분한 소통의 중요성을 다른 사업자들이 깨달을 수 있는 중요한 계기가 되었다. 비슷한 시기에 노르웨이에서는 석유 회수를 위한 물의 주입 과정에서 지반붕괴 및 확인되지 않은 해저분화구 등을 통해 주입수에 포함된 유류성분이 최대 175톤가량 해양으로 누출되는 사고가 발생하였는데(Reuter[2009]), 이 사고와 관련하여 비정부 환경단체인 그린피스는 성명을 내고 이산화탄소 주입 기술의 위험성을 경고하기도 하였다(Greenpeace[2008]). 그린피스는 해저 지층에 물질을 주입하는 기술이 현재 충분히 긴 기간 동안 환경 안전성을 보장할 수 있을 만큼 발달되어있지 않았다는 취지의 의견을 제기하였다.

사례에서도 확인 할 수 있듯이, CCS 사업은 환경적인 안전에 대한 확고한 신뢰가 형성되지 않으면, 대중이나 이해관계자의 저항으로 인해 사업추진이 중단되거나, 지연되는 어려움을 겪을 수 있다. 즉 모든 대규모 CCS 사업의 시행에 앞서 대중의 수용성 문제(public acceptance)를 우선적으로 해결해야 할 필요가 있다. 환경적인 안전에 대한 신뢰는 체계적인 모니터링 감시체계, 적법한 환경영향평가(Environmental Impact Assessment) 및 과학적인 환경위해성평가(Environmental Risk Assessment)를 수행하도록 규정하고 평가 결과에 기반한 관리가 이루어지도록 하는 체계를 마련하는 데서 시작된다.

2.3 현행 환경영향평가 및 위해성평가 제도

국내 환경 안전성 평가제도에에는 대표적으로 환경부의 환경영향평가제도와 국토해양부의 해역이용협의 및 평가제도가 있다. 환경영향평가제도는 사업의 경제성, 기술성 및 환경적 요인 등을 종합적으로 비교·검토하여 최적의 사업계획안을 모색하는 과정이며, 환경적으로 건전하고 지속가능한 개발이 되도록 함으로써 쾌적한 환경을 유지·조성함을 도모하는 제도이다(ME[2009]).

평가대상사업은 도시개발과 건설사업 등 18개 사업이 지정되어 있다. 평가항목은 대기·수질·토지·자연생태·생활환경·사회경제 6개 분야에 대해, 기상, 대기질, 악취, 온실가스, 수질 등 수리·수문, 해양환경, 토지이용, 토양, 지형·지질, 동·식물상, 자연환경자산, 친환경적 자원 순환, 소음·진동, 위락·경관, 위생·공중보건, 전파장애, 일조장애, 인구, 주거, 산업의 21개 항목에 대해 평가하고 있다. 평가과정은 평가사업 여부결정, 중점평가 항목선정, 현황

조사, 예측 및 평가, 저감방안설정, 대안평가, 사후관리 대책수립 과정을 따른다.

해양환경관리법에 따른 국토해양부의 해역이용협의 및 평가제도는 해양을 개발 또는 이용하는 행위의 해역이용적정성과 행위로 인해 예상되는 해양환경영향을 사전에 검토·평가하는 제도로 사업계획의 수립단계에서부터 환경적인 측면이 고려될 수 있도록 하는 사전예방적 환경관리 정책수단이다(MLTM[2009]). 해역이용협의와 해역이용영향평가는 해양개발·이용 행위의 규모나 그로 인한 해양환경영향 정도를 기준으로 구분한다. 평가대상은 공유수면의 점용·사용, 바다 골재의 채취, 공유수면의 매립·준설 및 굴착, 토석의 해양투기, 해양자원의 이용·개발 사업이 있다. 평가항목은 기상, 해양물리, 해양화학, 해양지형·지질, 해양퇴적물, 부유생태계, 저서생태계, 어류 및 수산자원, 어란 및 자치어, 조간대동물, 경관·위락, 산업보호종 및 보호구역의 12개 항목을 평가한다.

환경위해성평가는 환경에 부정적인 영향이 발생하거나, 생태계가 위협요인에 노출되어 피해 영향이 발생하는 확률적 결과에 대한 단계적인 평가과정이다. 이러한 평가는 환경에 대한 보호와 관리를 과학적이고 합리적인 정책결정을 통해 하기 위한 방법이다. 기본적으로 위해성평가는 과학적 기반에 따른 단계적 방법론에 따라 수행되고, 그 결과들은 위해도의 효율적 관리 및 관련 정책 수립 등에 활용되는 것을 목적으로 한다(US EPA[1998]). 하지만 아직까지 국내에서는 환경위해성평가를 자연을 매개로한 사업의 주변 영향을 평가하기 위한 목적으로 수행하도록 규정되어있지 않은 실정이다.

환경 위해성 관리(risk management)는 위해성 평가 결과를 통해 사전적으로 예측된 위험에 대한 적절한 예방과 감시, 만일에 있을 위기 대응 및 이에 필요한 법제도와 정책을 마련하는 일련의 행위를 포함하며, 그 목적은 잠재적인 환경적 문제의 발생 가능성을 최소화할 뿐만 아니라 대중의 위해성 인식을 개선하고 원활하게 소통할 수 있는 기반을 마련하는 것이다(US EPA[1998]). 따라서 위해성 관리 체계는 위해성 평가(발生源, 이동, 영향의 추정과 위해성의 정량적 크기 결정) 결과를 활용하여, 위해성을 저감하기 위한 사회, 경제, 정치적으로 적절한 자원 배분 결정의 제도적 수단이자, 과학적이고 합리적인 정책결정을 통해 사회적 수용성을 향상시키는 데 있어 매우 중요하다고 할 수 있다. 이에 따라 선진국에서는 다양한 분야의 정책 결정 및 사업성 평가를 위해 위해성평가 및 관리기술이 많은 분야에서 이용되도록 제도화 되어있다(US EPA[1998]).

2.4 해양지중저장을 위한 현행 환경영향평가제도 적용

국내에서 포집된 이산화탄소의 해양지중저장을 위한 실증화 사업이 시행되면, 포집이 대부분 육상에서 이루어지는 만큼 포집된 가스의 육상에서 해양 주입 플랜트로의 수송에 관련한 시설에 대한 육상 환경영향평가가 실시되어야 하고, 포집 가스의 해상 수송과 해저 주입 시설 등에 대한 해양 환경영향평가가 실시되어야 할 것이다. 현행 환경영향평가법이나 해양환경관리법 등 관련법에 따

라 진행될 경우, CO₂를 저장하는 사업적 특성이 고려된 평가범위와 항목 등에 대한 규정이 없어 평가 과정에서의 혼선이 예상될 뿐만 아니라 잠재적인 환경 영향을 충분히 평가하기 어려운 실정이다. 현행 제도를 개선하지 않고 해양지중저장 사업을 시행할 경우 발생할 수 있는 문제점은 아래와 같다.

첫째, 현재로서 이산화탄소의 지중저장 사업과 관련하여 환경영향평가 및 해역이용영향평가 방법에 대한 구체적인 지침이 존재하지 않는다. 사업 수행 과정에서 일부 포집, 수송, 저장 과정이 시설물 건설에 있어, 공장 설립(15만 m² 이상) 사업, 고압가스시설과 환만건설 사업 등이 대상 사업에 해당 될 수 있으나, 이산화탄소 해양지중저장 사업의 특성에 맞는 규정이 없으며, 구체적인 규모에 따른 평가 대상사업으로의 지정 요건이 필요하다. 해양지중저장을 위한 시설은 포집시설과 저장지 위치에 따라 장거리 혹은 단거리의 각각의 위치에서 건설되지만, 수송시설을 통해 하나의 단위 사업으로 연결되어 넓은 범위에서 운영되고 관리될 수 있다. 따라서 본 사업에 맞는 평가 범위와 중점평가 항목을 마련하는 것 역시 필요한 일이다. 또한, 사업을 수행하는 단계에서는 만약에 있을 CO₂ 누출 사고로 인한 환경피해 예방과 저장 후 해양 누출 피해를 방지하기 위해 지속적인 모니터링에 대한 규정이 필요하다. 이러한 해양지중저장 사업의 특성을 향후 환경영향평가 제도에서 고려하지 못하고, 평가범위 및 평가항목에 대한 구체적인 규정 없이 사업이 진행된다면, 환경적 위험과 평가의 어려움을 초래할 수 있다.

둘째, 환경영향평가의 현황조사, 예측·평가를 위한 배경자료가 부족하다. 문헌조사, 실측자료를 통해 환경영향을 파악하는 부분에 있어, 운영과 저장후의 누출 영향 자료, 저장지에 대한 해양환경 배경자료가 부족하여 정확한 예측·평가가 어렵다. 저장 후보지가 위치한 동해에 대한 광역해양조사가 국토해양부의 EAST-I 사업을 통해 이루어진 사례는 있지만(Cruise Report[2011]), 주로 표면수온, 표층 해류도와 해수의 플랑크톤 등에 대한 조사가 이루어 졌다. 하지만, CCS 사업에서는 CO₂에 대한 영향을 평가하기 위해 pH와 pCO₂의 수직분포와 CO₂ 누출 시 가장 영향이 클 것으로 예상되는 해저 퇴적층의 생물에 대한 배경자료가 요구 될 것이다.

셋째, 해양지중저장 사업은 시행 기간이 매우 길 뿐만 아니라 사업이 종료된 이후에도 장기간(>30년) 동안 이산화탄소의 누출에 대한 감시와 평가가 매우 중요하다. 하지만 현행제도의 평가기간만을 해양지중저장 사업에 적용할 경우 충분한 환경 안전성에 대한 감시가 가능하지 않을 것으로 판단된다. 해양지중저장 사업에서는 이산화탄소 스트림의 누출 영향을 평가하고, 사전에 누출이 발생하지 않도록 하는 관리가 필수적이므로 이를 고려한 평가기간과 사후관리 기간의 설정이 필요하다.

넷째, CCS 사업에 적합한 누출 감시와 위해성 평가 기술 개발이 부족하다. CCS 사업에 대한 적합한 평가기술이 없다면, 환경안전성 판단에 대한 과학적 근거와 관리를 위한 기준 설정 및 정책결정에 어려움이 있을 수 있다. 또한, IMO(International Maritime Organization), OSPAR(Oslo/Paris Convention) 등 국제기준에 근거한 위해성평가를 위해서는 국내 상황에 적합한 방법을 찾는 것이 중요할 것이며, 시

급하게 해결해야 할 과제이다. 또한, 환경영향 평가항목으로 이산화탄소 누출 가능성에 대한 장기간 예측과 누출 시 위해성에 대한 평가항목의 편입이 필요하다.

3. 국외 CCS사업과 환경 평가 사례

3.1 국외 관련 법규와 지침의 정비

국외에서도 CO₂ 지중저장의 잠재적 환경영향을 평가하기 위한 수단으로써 환경영향평가의 역할과 관심이 증가하고 있다. CCS의 환경 정책에 대한 연구를 통해 Zakkour *et al.*[2007]은 환경영향평가가가 CCS 개발 정책의 규제와 허가의 핵심 역할을 할 것임을 주장하였다. 또한, 환경영향평가는 CCS 사업 수행에 있어서 중요한 정책 규제사항으로 요구되고 있다(Mace *et al.*[2007]).

미국은 NEPA(National Environmental Policy Act)의 40 CFR (Code Federal Regulation) 1502에 의거하여 환경영향평가를 실시하고 있다. 이를 바탕으로 미국에서 수행되고 있는 FutureGen 프로젝트에서는 매우 체계적이고 광범위한 조사 결과를 담고 있는 환경영향평가서를 작성하였다(DOE[2007]). 이 평가서는 CCS 사업을 포집(플랜트), 저장, 저장 후로 구분한 다음 각 과정별로 현황을 조사하여 정보를 제공하였다. 저장 전·후의 이산화탄소 누출에 대한 노출 시나리오를 작성하고 이에 기반한 위해성 평가를 통해 잠재적 생태계 및 인체 영향과 위해도를 확인하였다. 또한 평가의 효율성을 증대하기 위해서 중점 평가항목(e.g. 대기질, 지질, 지형과 토양, 지하수, 지표수, 경관, 교통, 폐기물관리, 인간건강, 안전과 사고, 위해성평가, 통합영향 등)을 선정하여 집중적으로 평가를 실시하였다(DOE[2007]). 또한 이 보고서에는 이산화탄소 뿐만 아니라 불순물에 포함될 수 있는 유해물질에 대한 위해성 평가 결과까지 제시되어 있다. 최악의 가정 하에서 도출된 평가 결과에서는 피해를 받을 수 있는 주민과 생태계의 범위를 정량적으로 제시하고, 누출이 발생할 경우 어떤 조치를 취해야 하는 지에 대한 지침까지 제시하고 있다.

미국 환경보호국(U.S.EPA)은 CCS 사업의 잠재적 위험성 및 불확실성과 관련하여 지중저장으로 인한 악영향의 잠재성을 증가시킬 수 있는 조건을 체계적으로 확인하기 위해 취약성평가기법(VEF: Vulnerability Evaluation Framework)을 개발하였다(US EPA[2008]). 취약성평가는 광범위한 적용성이나 개연성과 관계없이 부정적인 영향이 증가할 수 있는 조건들을 체계적으로 확인하기 위하여 개발된 것이며, 정량적인 위해성평가방법은 아니다. 하지만 이러한 평가 과정을 통해서 사업자나 관리자는 미처 평가되지 못한 다양한 문제에 대해서 사전에 검증하고 대비할 수 있다. 유럽연합에서는 300 MWth 이상 포집시설(power plant), 직경 80 cm 이상과 길이 40 km 이상의 수송시설(pipeline), 500 tonnes/day 이상 오일과 500,000 m³/day 이상의 가스 저장시설(enhanced oil/gas recovery)에 대해서 전략환경평가(SEA: Strategic Environmental Assessment) 및 환경영향평가를 수행하도록 규정하고 있다(EU[2009]). 이러한 평가 기법은 단계별로 매우 체계화된 점검표를 제시하고 있어 사

업자로 하여금 보다 환경적인 문제의 발생을 최소화하기 위한 방안 마련에 도움을 줄 수 있다. 대규모 CCS 프로젝트의 사업 허가 여부 역시 이러한 평가에 기반하여 인허가를 해주고 있다.

3.2 사업지 주변환경의 배경자료 조사 사례

환경평가의 현황조사 및 예측평가를 위해서 배경자료는 환경평가의 기초자료로 이용되고, 사업의 전·후 비교를 통해 환경영향을 객관적으로 파악하고 평가할 수 있게 한다. Hill *et al.*[2009]은 북해 인근의 석탄가스화복합발전(IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle) 시설에서 배출되는 이산화탄소를 포집하고, 수송, 저장하는 CCS사업에 대해 환경영향을 평가하고, 방법을 제안하였다. 환경영향을 CCS 단계에 따라 구분하고, 각 과정에서 환경에 영향을 줄 수 있는 항목들을 설정하였는데 모든 단계에서 CO₂ 누출을 가장 중요한 영향으로 설정하고 있다. 포집시설의 평가 방법은 CO₂ 포집이 없는 일반적인 발전시설의 평가와 유사하게 이루어졌으며, 파이프라인을 통한 수송은 기존 천연가스 수송 평가와 비슷한 평가방법을 따랐다. 이러한 평가에는 항상 기존의 환경과 생태계의 배경자료가 대조군으로서 활용되고 있다. 마찬가지로 본 사업을 위한 평가에 있어서도 저장지역 인근의 생태계와 군집 자료를 통해 CO₂의 누출가능성에 따른 영향을 파악하고, 예측 할 수 있는 충분한 배경자료는 필수적이라고 할 수 있다.

대표적인 해양지중저장 프로젝트 사례인 노르웨이의 Sleipner 프로젝트는 세계 최초의 CO₂ 해양 지중사업으로서 1996년부터 주입이 시작되었다. 시작단계부터 현재에 이르기까지 환경영향을 파악하기 위한 저장지 주변의 해수와 퇴적물 등에 대해 환경조사와 모니터링이 이루어지고 있다(UNI RESEARCH[2010]). 북해의 환경과 생태계에 대한 조사 자료는 매우 오래전부터 축적되어 왔기 때문에 이 사업에서 활용할 수 있는 배경자료는 매우 풍부한 편이다. 2015년 연간 백만톤 주입을 목표로 하는 이탈리아의 Enel 프로젝트에서도 역시 주입전에 저장지 주변 400 km²에 대해 해저 퇴적물과 해수의 물리화학생물학적인 배경조사가 이루어지고 있다(Politi[2001]). 이러한 조사의 목적은 사업이 장기간 수행되면서 발생할 수 있는 환경 변화를 감시하고 비교하기 위한 수단을 확보하기 위함이다.

3.3 CCS 사업에 관련한 환경영향평가 사례

일반적인 환경영향평가 항목은 앞서 열거한 것과 같이 기상, 수질, 해양환경, 지형지질 등이 있다. 국외에서도 유사한 항목과 내용으로 평가하고 있으나, 국내 평가와 차이점은 환경 위해성 평가가 이루어지고 있다는 점이다. 스웨덴은 CO₂-Free Power Plant 프로젝트와 관련하여 전략환경평가를 수행하였다(Vattenfall[2006]). 이 경우 전략환경평가는 대규모 사업에 대해 환경적 측면에서 체계적이고, 투명한 평가를 가능하게 하는 도구으로써, 이해관계자들의 이해를 돕고, 합리적인 결정을 내릴 수 있도록 고안되었고, 그 평가 내용으로는 잠재적 환경 및 생태계 영향, 환경위해성평가가 필수적으로 포함되어 있다.

호주에서는 ZeroGen 프로젝트에 대해 환경영향평가를 수행한 바 있는데(Queensland Government[2010]), 이 평가서에는 일반적인 프로젝트 설명과 환경적 가치와 영향관리, 누출 이산화탄소 및 관련 부산물의 유해(hazard)와 위험(risk)에 대해 충분한 조사와 평가 결과를 제시하고 있다. 네덜란드의 연구에서 Koornneef *et al.* [2012]는 CCS의 환경영향평가와 위해성평가의 중요성을 언급하고, 누출에 의한 정량적인 위해성 평가의 한계와 평가방법론 등을 분석하였다. 환경적 문제는 포집시 발생할 수 있는 암모니아, 질소산화물, 황산화물 등의 부산물에 의한 피해 영향문제와 수송시 일어날 수 있는 고압상태에서의 CO₂ 스트림 누출문제, 저장시의 장·단기기간의 누출 피해가 있다. 이러한 문제 평가를 위해서는 저장과정의 정량적인 누출확인 및 정량적 위해성평가 기술이 필요하나, 현재 기술에는 한계가 있기 때문에 평가기술의 향상을 제안하였다.

생애주기평가(LCA: Life Cycle Assessment)를 통해 CCS 사업 과정에 대한 평가범위를 설정하고, 영향평가를 수행함으로써 평가의 정확도와 수준을 향상시킬 수도 있다(Manuilova *et al.*[2009]). 이와 같은 연구에서 CCS는 포집을 비롯한 수송, 저장 등의 광범위한 사업이 될 수 있으므로 평가 범위를 결정하는 것이 매우 중요함을 강조하고 있다.

해양지중저장을 위한 환경영향평가와 위해성 평가는 현재 체계를 구축하는 과정에 있다. IMO는 런던협약 96의정서에 의거하여 해양지중저장에서의 위해성평가체계를 2006년 5월에 합의·도출하였다(IMO[2006]). 따라서, 각 회원국은 자국의 CO₂ 해양지중저장 사업의 수행 시 IMO의 평가 지침을 기반으로 각 사업의 특성에 맞는 위해성평가관리 지침 및 체계를 마련할 의무가 있다. IMO의 평가 지침서에는 CO₂ 해양지중저장에 대한 위해성평가 및 관리체계 구축에 관한 내용을 포함하고 있으며, 구성은 문제설정, 대상지역 선정 및 특성 파악, 누출평가, 영향평가, 위해도 결정, 위해도관리 등 해양지중저장이라는 특성에 맞추어 일반적인 위해성평가 절차를 따르고 있다(IMO[2007]).

3.4 CCS 사업을 위한 환경 위해성평가 기술

환경 위해성평가는 CO₂의 포집, 수송과 장기간 지중저장에 의한 환경과 인간건강의 피해를 예측평가하는 방법으로 이용될 수 있으며, 유럽에서는 관련 기술개발을 활발하게 진행하고 있다(EA[2011]). 그 결과 OSPAR는 북대서양의 안전한 CO₂ 해양지중저장을 목적으로, 지질층으로 CO₂를 주입 시 필요한 환경 위해성평가 및 관리 지침을 발표하였다(OSPAR[2007]). 이 지침은 북해에서 이루어지는 모든 이산화탄소 해양지중저장 사업을 위해 CO₂ 스트림에 대해 문제설정, 저장지 선정과 특성 파악, 누출평가, 영향평가, 위해도 결정, 위해성관리의 과정에 대해 설명하고 있다. 이 지침은 해양환경 보호를 위한 최소한의 평가 가이드라인으로 모든 사업에서 반드시 수행되어야 할 환경 위해성평가 관련 항목을 제시하고 있다.

또한, 위해성평가 기술로는 CCS 사업의 환경분야 뿐만 아니라, 경제, 정책 및 기술적인 위험에 대한 평가를 위해 결정론적 방법(deterministic risk assessment), 확률론적 방법(probabilistic risk

assessment)과 취약성평가체계(vulnerability evaluation framework) 등이 개발되고 적용되고 있다(Condor[2011]). 이러한 방법을 이용하여 Gerstenberger *et al.*[2009]는 논리적 분석방법인 logic tree 방법을 통해, CCS 사업의 안전, 경제, 사회, 정책 그리고 기술적인 이슈에 대해 평가한 사례가 있다. 이처럼 다양한 위해성평가방법에 대해 국내 적용 가능한 기술을 개발해야 할 필요가 있다.

3.5 국내 환경영향평가 기술 개발 사례

국내에서 CCS 관련 환경영향평가는 아직 사업의 준비 단계이기 때문에 수행한 사례는 없지만, 앞서 언급한 것처럼 CCS 기술개발 사업이 2020년 상용화를 목표로 진행 중에 있어 방법론에 대한 확립이 시급한 실정이다. 국토해양부에서는 2005년부터 환경 안전성 평가·관리를 위한 기술개발 사업을 수행하고 있다(Fig. 3). 이러한 사업은 누출 가능성 및 크기를 평가할 수 있는 모델 개발, 누출된 CO₂ 스트림의 해양환경 중 거동을 평가할 수 있는 거동 모니터링, 누출된 CO₂에 의한 해양생태영향을 평가할 수 있는 생물영향평가 기술과 이를 종합하여 법제도하에 평가가 가능하게 하는 지침과 방법 연구가 목적이다(Fig. 3).

해양지중저장을 포함한 CCS 사업의 제도적 기반 마련을 위한 법제도 또한 준비단계에 있어, CCS 관련한 직접적인 법제도가 마련되어 있지는 않은 상황이다. 따라서 대기환경보전법, 폐기물관리법, 고압가스 안전 관리법, 해양환경관리법 등의 관련 법규를 참조하여 CCS의 특성이 고려된 법제도 개정이 필요하다. 특히, 사업의 추진을 위한 환경영향평가에 대한 규정마련이 시급하다. 이와 관련하여, 환경위해성평가를 위해 Choi *et al.*[2009]은 국제법에 부합하고, CO₂ 특성이 고려된 누출평가와 영향평가가 수행될 수 있는 평가기술개발을 요구한바 있다. 환경위해성평가를 위해서는 국내외에서 신뢰성 있는 생물영향 평가를 위한 기초자료가 부족하며, 국외 영향자료가 충분하다라도 국내 생물종에 대한 영향평가와 지역 특이적인 누출평가를 위해서는 지속적인 자료 확보와 연구가 필요하다.

4. 해양 지중저장 사업을 위한 환경 평가 방안

4.1 해양 지중저장사업 특성을 고려한 환경 평가 방안

앞서 제시한 현행 환경영향 평가제도 적용의 문제를 해결하고, 안전한 CCS 사업을 위한 환경평가를 위해 1) CCS 사업의 영향평가를 위한 CCS 해양환경영향평가지침, 2) 주입과 저장 전후의 환경변화와 누출 모니터링을 위한 환경모니터링지침, 3) 누출 사고에 대한 대비와 복구를 위한 누출사고대응지침, 4) 각 지침에서의 위해성평가를 위한 위해성평가관리지침을 마련해야 한다(Table 1).

해양환경영향평가지침은 기존 해양이용영향평가지침의 내용을 기본으로 하여, 국제 기준에 부합되고, CCS의 특성이 고려된 내용을 평가해야 한다. 특히, 시설의 건설과 운영과정에서의 환경적 악영향에 대한 평가를 목적으로 해야 한다.

환경모니터링지침은 사업의 포집부터 저장과정, 시설 건설부터

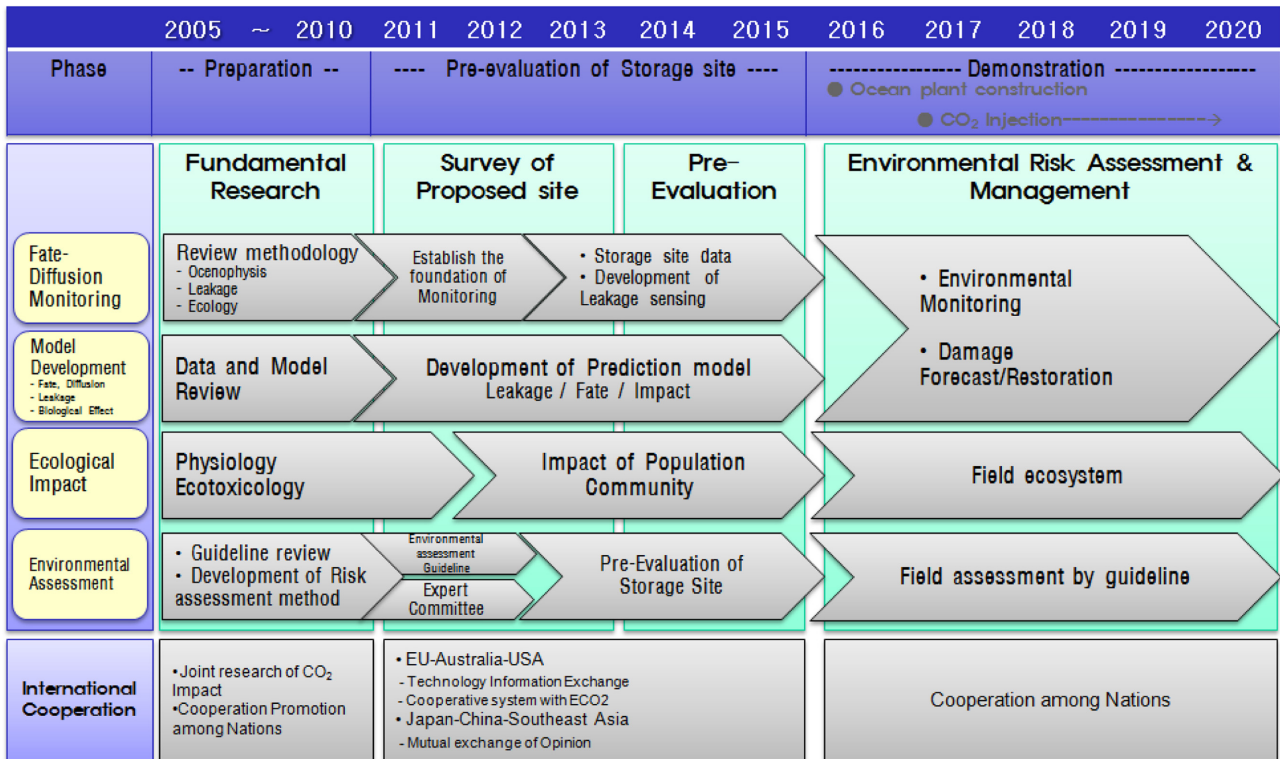


Fig. 3. A research on environmental assessment in Korea.

Table 1. Purpose and contents of environmental assessment guideline

Guideline	Purpose	Contents	Reference
Marine Environmental impact assessment	Project impact	<ul style="list-style-type: none"> Project environmental impact assessment of ecology, physics, chemicals, geology, society, etc. Ecological risk assessment 	<ul style="list-style-type: none"> Japan CCS guideline (METI[2009]) Marine environmental management law – Marine environmental impact assessment (Article 85)
Environmental Monitoring Guideline of CO ₂ Storage Site	Monitoring of environment change and leakage	<ul style="list-style-type: none"> Leakage monitoring and environmental monitoring Hazard identification of human health and ecological by CO₂ leakage Ecological monitoring of post-closure (>30 years) 	<ul style="list-style-type: none"> EC Directive (EU[2009]) OSPAR guideline (OSPAR[2007]) 2006 IPCC guideline (IPCC[2005]) Marine environmental management law – Marine environmental impact survey (Article 95)
Leakage Accident Action Guideline	Adaptation of accident	<ul style="list-style-type: none"> Risk assessment (Field) Method of Extent of damage, recovery, restoration 	<ul style="list-style-type: none"> EC Directive (EU[2009]) Japan guideline (METI[2009]) Marine environmental management law – Marine population impact survey (Article 77)
Risk Assessment & Management Guideline	Risk management of ecology and human health	<ul style="list-style-type: none"> Risk assessment method Pre/post risk assessment 	<ul style="list-style-type: none"> London Convention/Protocol (IMO[2007]) OSPAR guideline (OSPAR[2007]) CSA CCS standard (CSA[2012])

CO₂ 주입후 폐쇄 단계까지의 전과정에 대해 CO₂의 누출과 생태 환경적 변화에 대한 모니터링을 목적으로 한다. IPCC 지침에 의한 CO₂ 누출모니터링과 OSPAR 지침의 영향평가 등 국제기준에 적합한 모니터링 절차를 따르는 것이 가장 중요할 것이다. 또한, 사업 전후의 모니터링 결과 비교를 위한 배경조사가 필수적으로 이루어질 수 있도록 해야 한다.

누출사고대응지침은 CO₂ 주입 및 운영과정에서의 대량의 누출 사고에 대응하고, 사고발생시 환경적 피해를 최소화 할 수 있는 것을 목적으로 하며, 누출 시 환경보호를 위한 최소한의 안전수단이 될 수 있다.

위해성평가관리지침은 환경영향평가, 환경모니터링을 위한 위해성평가 절차 및 내용에 관한 지침으로 OSPAR 위해성평가지침 등 국제기준과 절차를 반영하고, 생물영향평가 등 국내 현황이 고려된 내용으로 평가되어야 한다. 이러한 지침마련과 배경조사를 통해 CCS 사업의 환경적 악영향과 불확실성을 최소화할 수 있는 체계를 마련할 수 있을 것이다.

4.2 환경영향평가법 및 해역이용영향평가제도 개정 방안

대규모 CO₂ 해양지중저장사업의 상용화를 위해서는 IMO, EC 등의 국제기준에 따르고, 해양환경관리법에 의거한 해역이용영향

평가와 환경영향평가법에 따른 평가가 요구된다. 현재 규정에 따라 환경영향평가와 해양 CCS사업의 해역이용영향평가가 실시되면, CO₂의 특성과 국제기준이 반영되지 않은 평가가 어렵기 때문에 필요한 내용을 반영하여 국내 규정 및 지침을 개정할 필요가 있다.

기본적으로 CCS 사업은 포집시설부터 수송·저장시설까지 저장지 위치와 포집시설 위치에 따라 광범위한 지역에서 건설·운영되어 사업의 규모에 따라, 사업과 관련된 전체 범위가 상당히 넓을 수 있다. 따라서, 환경영향평가의 범위는 포집·수송 그리고 저장 과정 전체가 되어야 하며, 각 과정에 따라 환경에 미치는 영향을 평가해야 한다. 또한, CCS의 환경영향평가는 CO₂ 누출 문제, 장기간 저장으로 인해 발생할 수 있는 문제 등에 대한 CCS의 특성이 고려된 저장 전·후 단계의 영향이 평가되고, 대안이 제시되어야 한다. 포집과정에서는 전생애주기평가를 통해 특성을 파악할 필요가 있고, 포집방법에 따른 배출물질을 파악하여 이에 대한 영향 예측과 저감방안을 수립해야 한다. 수송과 저장과정에서는 CO₂의 사고

누출에 의한 단기간의 급격한 고농도 누출과 잠재적인 장기간의 누출 영향과 가능성을 확인하고 대처하기 위한 환경위해성평가가 필요하다. 저장 후의 이산화탄소는 100년 이상 장기간 지중에 보관되기 때문에 해양으로의 누출을 모니터링 할 수 있는 방안을 제시하여, 이에 대한 관리가 지속적으로 이루어 질 수 있도록 해야 한다. 사후환경영향조사에서 장기간 모니터링 방법과 기간을 명시하여 저장 후에도 지속적인 관리가 이루어지도록 해야 한다.

CCS의 환경영향평가를 위해서는 육상과 해상의 저장지 위치에 의한 영향 범위에 따라, 현행 평가항목에서 환경영향평가법 21개, 해역이용영향평가 12개에 대해 평가하고, 안전성·위해성 항목을 추가하여, CO₂ 누출에 의한 영향을 평가하도록 한다.

중점 평가내용은 CO₂ 스트림에 의한 인간과 생태계 영향을 조사·분석하고, 기상(기온, 풍향, 풍속, 대기 안정도 등), 대기질(CO₂ 스트림 발생 영향), 수질(지하·지표수 오염현황), 수리·수문(저장지 특성), 해양환경(해수 순환·확산 특성), 토양(오염가능성), 지형·지

Table 2. Consideration on environmental assessment of CCS process

List	Capture	Transport	Storage	post-storage
Air quality	• CO ₂ , NOx, SOx, particle material, VOCs, heavy metal, amine emissions	• CO ₂ seepage	• CO ₂ seepage impact	• Seepage monitoring
Green house gases		• GHGs emission forecast		• Certified emission reductions
Water quality	• Cooling water discharge: water withdrawal, heating of water - Contaminants: emissions and nuisance effect in receiving water system	• Disturbance of groundwater flow and level during construction and operation. • Extraction of groundwater during construction	• damage or change of water environment by seepage	
Hydrology	-	-	• Survey for diffusion model	• Diffusion model assessment
Marine environment	-	-	• damage or change of marine environment by seepage - pH, pCO ₂ , alkalinity	• Seepage management strategies.
Soil contamination	• Leaching of substances from waste/fuel storage.	• In case of leakage of CO ₂ to soil	-	-
Soil disruption	• Soil disruption during construction and dismantling phase.	• Soil disruption during construction and dismantling phase.	• Drilling during construction.	• Seismicity (similarities with natural gas storage).
Fauna/flora	• biodiversity disruption	• biodiversity disruption - Heat flux to soil (pipeline).	• biological impact of CO ₂ seepage	-
Raw materials resources and Water use	• Use of materials (e.g. MEA) for emission reduction (SCR) • Process and cooling water use	• Construction materials.	-	-
Noise/Vibration	• Noise zoning. • Noise or vibration emissions/nuisance.	• Noise emissions/nuisance surrounding compression station. • Disruption during construction.	• Noise emissions/nuisance surrounding injection station. • Disruption during construction.	
Visual impact	• Impact of installation (e.g. stack) considering its surroundings.	• Visual impact due to construction and decommissioning activities.	-	-
Socio-economic	-	• Soil temperature (heat flux) and agricultural activities, other economic or social activities affected.	-	-
Safety/Risk	• Internal/External safety for area: - Ammonia storage (SCR). - Solvent storage (amines/solvent).)	• Individual risk (risk contours). • Group risk	• Individual and group risk of aboveground installation. • Change of CO ₂ leakage -> possible exposure and related effects on human and ecosystem.	• Change of CO ₂ long-term leakage -> possible exposure and related effects on human and ecosystem.

*Revised Koornneef *et al.*[2006].

질(지형형상, 지질 구조·특성), 식물·동물상(육·수상 동·식물의 종·다양성 및 서식지 파괴)를 조사하여 확산모델링을 통해 영향 범위를 예측하고, 안전성과 위해성을 평가한다(Table 2). 위해성평가를 통해 누출시 영향범위를 확인하고, 대처방안을 수립한다. CO₂ 해양지중저장을 위한 해역이용영향 평가항목은 해양물리, 해양화학, 해양퇴적물, 부유생태계, 저서생태계, 어류 및 수산자원 등이 중점 평가 되어야 할 것이다.

이러한 환경영향평가는 현황조사와 예측·평가를 위해 문헌자료, 환경영향 자료, 배경농도 등 기존 자료와 실측자료를 이용한 모델링이 요구되기 때문에 CO₂ 저장지에 대한 환경현황 파악과 추후 비교 분석을 위한 배경자료가 사업시행 전에 준비가 되어야 사업의 행정적 시간적 지연 없이 원활한 수행이 가능 할 것이다.

4.3 해양지중저장 사업의 환경 위해성평가 및 관리 방안

이산화탄소의 해양지중저장 사업에 따른 환경 위해성평가를 위해서는 누출거동영향에 대한 체계적인 평가기술이 필요하다(Fig. 4). 이 기술은 해양환경에 누출된 CO₂의 환경위해성평가의 기본 구성요소라고 할 수 있는데, 사업의 각 과정에 활용될 수 있는 사전 사후 평가를 위한 모델링과 모니터링 그리고 위해성평가의 다양한 기법들을 구성요소로 포함한다. 이와 같은 환경위해성평가는 누출이 된 이후보다는 누출이 일어나기 전에 누출에 의한 피해를 사전에 예측함으로써 피해가 예상되는 누출의 가능성을 최소화하고, 적절한 대응 활동을 하기 위한 수단으로 더욱 필요하다. 이러한 평가

기술의 기반을 구축하기 위해서는 이산화탄소 저장 후보지에 대한 물리, 생지화학적 환경에 대한 상세한 검토가 우선되어야 할 것이며, 또한 누출에 대한 위험 인식 및 분석, 저장지에 대한 모니터링 관측기법 등의 확립이 선행되어야 한다.

앞서 언급한 IMO, OSPAR 등 국외 문헌에서는 이산화탄소의 해양지중저장에 대한 환경위해성평가를 하려면 저장 지역에 대한 특성파악, 누출시나리오에 기반한 환경노출평가, 누출된 이산화탄소에 의한 생물에 대한 직접적인 영향과 환경 변화에 의한 간접적인 영향이 고려된 영향평가 등의 과정을 수행할 것을 명시하고 있다. 국내에서 진행되는 이산화탄소의 포집 및 해양지중저장사업에서도 우리의 환경 특성에 적합한 위해성평가관리 시스템 구축이 필요하다. 국내 CO₂의 해양지중저장사업에 대한 위해성평가관리 체계 마련을 위해서는 후보지역의 환경 특성에 대한 연구를 바탕으로 해양환경에서 이산화탄소의 물리화학적 확산거동에 대한 이해가 필요하다. 현재 누출된 CO₂의 거동과 생물영향을 함께 예측할 수 있는 모델 개발이 진행중에 있어 향후 노출 평가에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

이와 함께 수송 및 주입과정과 지중저장 지질구조에 적합한 개연성 있는 누출시나리오에 기반을 둔 노출평가와 국내 종을 이용한 생태영향평가 자료의 생산과 DB화, 그리고 누출 감시 및 환경 모니터링 기법 개발 등이 반드시 이루어져야 한다. 이러한 과정을 통해야만 국내 환경에 적합한 환경위해성평가의 체계를 구축할 수 있을 것이다.

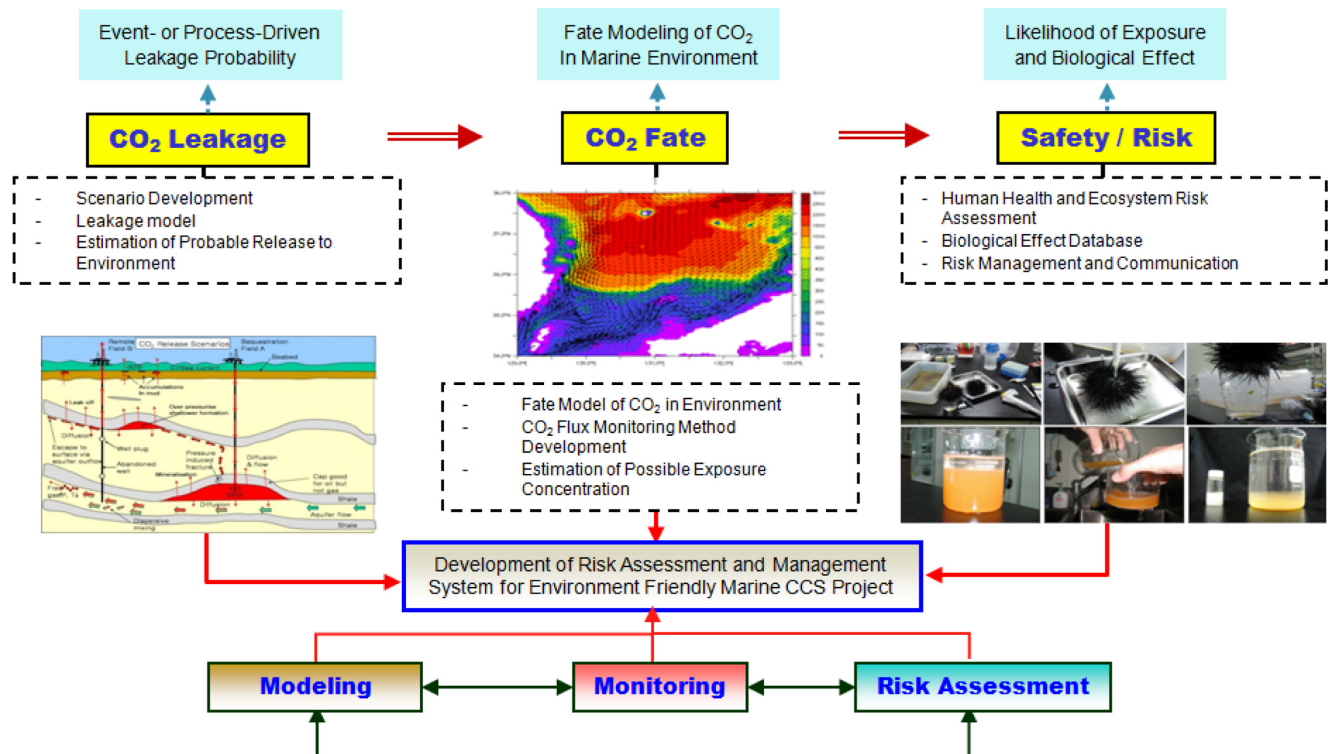


Fig. 4. Framework for the development of risk assessment and management system for environment-friendly ocean CCS project in Korea (Choi *et al.*[2009]).

5. 결 론

국내 CCS 사업의 안정적인 상용화를 위해서는 과학적인 환경 평가와 지속적인 관리시스템이 필요하다. 이것을 통해서 대중의 사회적 수용성을 향상시킬 수 있으며, 환경과 인간에 안전한 CCS 사업을 수행할 수 있다. 따라서 본격적 사업추진에 앞서 환경평가와 관리기술 마련이 무엇보다 중요하다. 이를 위해서는 먼저 본 사업의 특성과 장기적인 영향을 고려한 환경영향평가 기법이 개발되어 법제화될 필요가 있다. 특히 해양지중저장 사업의 경우 운송, 주입, 저장 등 대부분의 과정이 해양에서 이루어지는 만큼 해양환경관리를 위한 환경평가 및 모니터링 사업이 제도적으로 이루어질 필요가 있다. 필요한 경우 현행 해역이용영향평가의 기본 틀에 본 사업의 특성과 영향을 고려한 조사 항목과 주기, 방법 등을 추가하여 개정안을 작성하는 것도 가능한 방법이다. CCS 사업에 관련된 환경영향 및 위해성 평가는 단기간의 조사와 연구로 이루지기 어려운 특성을 갖는다. CO₂ 저장에 의한 사전사후 영향평가를 위해서는 장기간의 배경자료 조사가 선행되어야 하며, 이 자료를 기초로 CCS 환경평가와 위해성평가가 수행 될 수 있다. 배경조사는 비교평가를 위해 저장지 환경에 대한 계절별, 연차별 조사가 이루어져야 하며, 사업시행 전 체계적인 조사가 필히 수행되어야 한다. 또한, 누출된 이산화탄소의 거동을 감시하고 영향을 예측, 평가할 수 있는 기술의 개발이 필요하다. 기술개발의 효율성을 높이기 위해서는 최신의 기술을 보유한 선진국의 선행연구팀과의 활발한 기술교류가 중요하다고 할 수 있다. 최근 다양한 환경 위해성평가를 위한 국제적인 지침이 발표되고 있다. 국내기준과 국제적인 기준에 부합하고, 국내 실정에 적합한 지침을 작성하여, 이에 따라 평가할 수 있는 평가기술 개발이 이루어져야 한다. 개발된 기술은 법제화를 통해 법적 구속력을 갖고, 장기간의 지속적인 관리가 이루어질 수 있다. 이러한 법제화는 안정적인 관리운영의 기반이 되며, 이는 사업시행의 이해관계자들의 사회적 수용성 향상을 통해 CCS 사업 추진의 기반이 될 수 있다.

후 기

본 논문은 2012년 국토해양부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 “CO₂ 해양지중저장 기술개발” 연구과제의 결과입니다. 또한 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP) 에너지인력양성사업의 지원을 받았습니다 (No. 20100092). 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Minister of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM), 2010, “Report on Development of Technology with CO₂ Marine Sequestration (VI)”.
- [2] Minister of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM), 2009, “Regulation of concern with preparing of environmental impact statement on sea area utilization”, [Enforcement on 2009. 8. 24], Announcement of MLTM No. 2009-792.
- [3] Minister of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM), 2012, “Press Release by Marine Conservation Division of MLTM on 2012. 4. 4”.
- [4] Presidential Committee on Green Growth (PCGG), 2010, “Press Release on Comprehensive planning on National CCS Technology Development by PCGG on 2010. 7. 11”.
- [5] Choi, T.S., Lee, J.-S., Lee, K.-T., Park, Y.-G., Hwang, J.-H. and Kang, S.-G., 2009, “Scheme on Environmental Risk Assessment and Management for Carbon Dioxide Sequestration in Sub-seabed Geological Structures in Korea”, J. of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol.12, 307-319.
- [6] Minister of Environment (ME), 2009, “Law of Environmental Impact Assessment”, [Enforcement on 2009.1.1], No. of Law 9737.
- [7] Thitakamol, B., Veawab, A., Aroonwilas, A., 2007, “Environmental impact of absorption-based CO₂ capture unit for post-combustion treatment of flue gas from coal-fired power plant”, Int. J. of Greenhouse Gas Control, Vol.1, 318-342.
- [8] Burgherr, P., Hirschberg, S., 2005. “Comparative Assessment of Natural Gas Accident Risks”, Paul Scherrer Institut/Schweizerischer Verein des Gasund Wasserfaches, Villigen, GA-05-06/D254.
- [9] CCST, 2011, “California's Energy Future-Electricity from Renewable Energy and Fossil Fuels with Carbon Capture and Sequestration”, April 2012, California Council on Science and Technology, ISBN-13: 978-1-930117-52-5.
- [10] Cruise Report, 2011, “Cruise Report August, 2011 EAST-I Survey Ulleung Warm Eddy Observation”, Research Institute of Oceanography, Seoul National University/Kore Hydrographic and Oceanographic Administration.
- [11] CSA, 2012, “Geological storage of carbon dioxide”, CSA Group Z741-12.
- [12] DOE/NETL, 2007, “FutureGen Project Final Environmental Impact Statement”, DOE/EIS-0394.
- [13] EA, 2011, “Environmental risk assessment for carbon capture and storage 2011”, Report-GEHO0411BTSN-E-E, Version 1.0 April 2011, Environment Agency.
- [14] EU, 2009, “Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council on the geological storage of carbon dioxide”, Official Journal of the European Union, 5.6.2009.
- [15] ECN, 2010, “What happened in Barendrecht”, Energy Research Centre of the Netherlands (ECN).
- [16] Politi, M., 2011, “Italy Porto Tolle: storage in offshore saline aquifer, CO2GeoNet Open Forum, 9-11 May 2011, San Servolo Island, Venice.
- [17] GCCSI, 2012, “The Global Status of CCS/2012”, Global CCS Institute.
- [18] Gerstenberger, M., Nicol, A., Stenhouse, M., Berryman, K., Stirling, M., Webb, T., Smith, W., 2009, “Modularised logic tree risk assessment method for carbon capture and storage projects”,

- Energy Procedia Vol.1, 2495-2502.
- [19] Greenpeace, 2008, "Leakages in the Utsira formation and their consequences for CCS policy (Greenpeace Briefing)".
- [20] Hill, T.A., Booth, M.-J., Dorren, C., Stiff, S.M., Hull, W., 2009, "Environmental Impact Study of a Power Plant with Carbon Capture and Storage near the UK Coast", Energy Procedia Vol.1, 2463-2470.
- [21] IEA, 2003, "CO₂ Capture and Storage in Geological Formations, Zero Emissions Technologies for Fossil Fuels", OECD/IEA, France.
- [22] IEA, 2012. "Energy technology perspectives 2012: Pathways to a clean energy system", OECD/IEA, France.
- [23] IMO, 2006, "Report of the meeting of the SG inter-sessional technical working group on CO₂ sequestration", Working Group on CO₂ Sequestration (3rd May), Meeting of the SG Inter-sessional Technical Working Group on CO₂ Sequestration. L/SG CO₂ 1/7.
- [24] IMO, 2007, "CO₂ sequestration in sub-seabed geological formations: Report of the ad-hoc working group on the specific guidelines for carbon dioxide sequestration into sub-seabed geological formations."
- [25] IPAC, 2011, "The Kerr Investigation: Final Report", IPAC-CO₂ Research INC.
- [26] IPCC, 2005, "IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage", Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [27] Koornneef, J., Faaij, A., Turkenburg, W., 2006, "Environmental Impact Assessment of Carbon Capture & Storage in the Netherlands", published in: N.A. Røkke, O. Bolland and J. Gale, Proceedings of 8th International Conference on Greenhouse Gas Technologies, Trondheim, Norway, Elsevier, Oxford, United Kingdom, 2006. 4 pages.
- [28] Condor, J., 2011, "A comparative analysis of risk assessment methodologies for the geologic storage of carbon dioxide", Energy Procedia Vol.4, 4036-4043.
- [29] Knutzen, J., 1981, "Effects of decreased pH on marine organisms", Mar. Pollut. Bull. Vol.12, 25-29.
- [30] Koornneef, J., Faaij, A. and Turkenburg, W., 2012, "The environmental impact and risk assessment of CO₂ capture, transport and storage-An evaluation of the knowledge base", Progress in Energy and Combustion Science Vol.38, 62-86.
- [31] Mace, M.J., Hendriks, C., Coenraads, R., 2007, "Regulatory challenges to the implementation of carbon capture and geological storage within the European union under EU and international law", Int. J. of Greenhouse Gas Control Vol.1, 253-260.
- [32] METI, 2009, "For safe operation of a CCS demonstration project", Carbon Dioxide Capture and Storage Study Group, Industrial Science and Technology Policy and Environment Bureau Ministry of Economy, Trade and Industry, JAPAN.
- [33] NETL, 2010a, "DOE/NETL Carbon Dioxide Capture and Storage RD&D Roadmap", December 2010, NETL
- [34] NETL, 2010b. "Archer Daniels Midland Company: CO₂ Capture from Biofuels Production and Sequestration into the Mt. Simon Sandstone".
- [35] OSPAR, 2007, "OSPAR Guidelines for risk assessment and management of storage of CO₂ streams in geological formations", OSPAR convention for the protection of the marine environment of the North-East Atlantic, OSPAR 07/24/1-E, Annex7.
- [36] Queensland Government, 2010, "Terms of reference for an environmental impact statement".
- [37] Reuters News, 2009, "Norway bets on CO₂ capture, storage despite risks (28th, May)", <http://www.reuters.com/article/latestCrisis/idUSLS313448>.
- [38] RISCS, 2010, Research into impacts and safety in CO₂ storage, Scenarios for potential impacts from hypothetical leakage from geological storage facilities for carbon dioxide, Revision: 2.0.
- [39] Stanger, R., Wall, T., 2011, "Sulphur impacts during pulverised coal combustion in oxy-fuel technology", Progress in Energy and Combustion Science Vol.37, 69-88.
- [40] Seibel, B.A., Walsh, P.J., 2003, "Biological impacts of deep sea carbon dioxide injection inferred from indices of physiological performance", J. of Experimental Biology Vol.206, 641-650.
- [41] Svensson, R., Odenberger, M., Johnsson, F., Stromberg, L., 2004. "Transportation systems for CO₂-application to carbon capture and storage", Energy Conversion and Management Vol.45, 2343-2353.
- [42] UNI RESEARCH, 2010, "Environmental monitoring survey of oil- and gas fields in Region II 2009 UNI RESEARCH AS", Section of Applied Environmental Research.
- [43] US EPA, 1998, "Guidelines for ecological risk assessment, Washington, DC: Risk Assessment Forum", U.S. EPA. EPA/630/R-95/002F.
- [44] US EPA, 2008, "Ulnerability evaluation framework for geologic sequestration of carbon dioxide", US EPA, EPA430-R-08-009, 78 pp.
- [45] Vattenfall, 2006, "Strategic Environmental Assessment of CO₂ Capture, Transport and Storage - Official Report". Serial No. U07:73.
- [46] Xie, X., Economides, M.J., 2009, "The impact of carbon geological sequestration", J. of Natural Gas Science and Engineering, Vol.1, 103-111.
- [47] Zakkour P, Haines M., 2007, "Permitting issues for CO₂ capture, transport and geological storage: a review of Europe", USA, Canada and Australia. Int. J. of Greenhouse Gas Control Vol.1, 94-100.

2013년 1월 25일 원고접수

2013년 2월 13일 심사수정일자

2013년 2월 14일 게재확정일자