

이산화탄소 해양 지중저장사업의 환경위해성평가관리 방안

최태섭¹ · 이정석^{1,†} · 이규태¹ · 박영규² · 황진환³ · 강성길⁴

¹(주)네오엔비즈 환경안전연구소

²한국해양연구원 해양기후환경연구본부

³동국대학교 환경시스템공학부

⁴한국해양연구원 해양시스템안전연구소

Scheme on Environmental Risk Assessment and Management for Carbon Dioxide Sequestration in Sub-seabed Geological Structures in Korea

Tae Seob Choi¹, Jung-Suk Lee^{1,†}, Kyu-Tae Lee¹, Young-Gyu Park²,
Jin-Hwan Hwang³ and Seong-Gil Kang⁴

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

²Ocean Climate and Environment Research Division, KORDI, Ansan P.O.Box 29, Kyeonggido 425-600, Korea

³Dept. of Environmental System Engineering, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea

⁴Maritime and Ocean Engineering Research Institute, KORDI, 171 Chang-dong, Yusung-gu, Daejeon 305-343, Korea

요 약

이산화탄소를 포함하는 온실가스의 증가로 인한 기후변화 영향을 저감하기 위해 최근 이산화탄소의 포집 및 저장(CCS)과 관련된 많은 연구들이 이루어지고 있다. 포집된 이산화탄소의 저장은 저장용량이 큰 육상/해상의 유가스 전, 대수층, 석탄층과 같은 지질구조를 이용한다. 이산화탄소의 포집 및 저장과정에서 예상되는 가장 중요한 문제는 이산화탄소의 환경 중 유출에 의해 발생할 수 있다. 사업과정 또는 이후의 이산화탄소의 유출은 잠재적으로 환경 변화 및 서식 생물에 심각한 피해를 미칠 수 있는 것으로 우려된다. 저장된 이산화탄소의 유출에 의한 환경 피해를 최소화하고 과학적으로 관리하기 위해서는 환경위해성평가 결과를 바탕으로 위해도 저감 및 관리가 이루어져야 할 것이다. 위해성평가는 기본적으로 효율적인 위해도 관리를 위한 정책 결정 도구로 활용되며, 예상되는 위해요인과 인간 및 생태계에 미치는 영향과의 관계에 대한 신뢰성 있는 자료를 바탕으로 노출평가와 영향평가를 수행한 후 위해도를 산정하는 과정이다. 최근 국제해사기구(IMO)는 해저 지중저장 사업을 위한 위해성평가 체계에 대한 일반 지침서를 제시하였고, 모든 해저 지중저장 사업의 수행 주체는 이 지침서를 기본으로 사업 수행 전 과정에 대한 위해성평가관리 체계를 마련하도록 요구하고 있다. 이 지침서는 이산화탄소의 해저 지중저장에 대한 환경위해성평가는 저장 지역에 대한 특성 파악, 유출시나리오에 기반한 노출평가, 누출된 이산화탄소에 의한 생물에 대한 직접적인 영향 및 환경 변화에 의한 간접적인 영향이 고려된 영향평가 등을 포함한다. 국내에서 시도되는 이산화탄소의 포집 및 해저 지중저장사업 또한 IMO의 지침서를 기반으로 하되 사업과 환경 특성에 적합한 위해성평가관리 시스템을 구축할 필요가 있다. 국내의 이산화탄소 해양 지중저장사업에 대한 위해성평가관리 체계 마련을 위해서는, 후보지역의 환경 특성에 대한 연구를 바탕으로 해양환경에서 이산화탄소의 물리화학적 거동에 대한 이해, 육상 및 해양환경의 배경 조건 및 특성 파악, 포집 후 수송, 지중저장 지질구조에 적합한 개연성 있는 유출시나리오에 기반을 둔 노출평가와 국내 생물종을 이용한 생태영향평가 자료의 생산과 DB화, 그리고 유출 감시 및 환경 모니터링 기법 개발 등이 반드시 이루어져야 한다.

[†]Corresponding author: bioassay@neoenbiz.com

Abstract – Carbon dioxide capture and storage (CCS) technology has been regarded as one of the most possible and practical option to reduce the emission of carbon dioxide (CO₂) and consequently to mitigate the climate change. Korean government also have started a 10-year R&D project on CO₂ storage in sea-bed geological structure including gas field and deep saline aquifer since 2005. Various relevant researches are carried out to cover the initial survey of suitable geological structure storage site, monitoring of the stored CO₂ behavior, basic design of CO₂ transport and storage process and the risk assessment and management related to CO₂ leakage from engineered and geological processes. Leakage of CO₂ to the marine environment can change the chemistry of seawater including the pH and carbonate composition and also influence adversely on the diverse living organisms in ecosystems. Recently, IMO (International Maritime Organization) have developed the risk assessment and management framework for the CO₂ sequestration in sub-seabed geological structures (CS-SSGS) and considered the sequestration as a waste management option to mitigate greenhouse gas emissions. This framework for CS-SSGS aims to provide generic guidance to the Contracting Parties to the London Convention and Protocol, in order to characterize the risks to the marine environment from CS-SSGS on a site-specific basis and also to collect the necessary information to develop a management strategy to address uncertainties and any residual risks. The environmental risk assessment (ERA) plan for CO₂ storage work should include site selection and characterization, exposure assessment with probable leak scenario, risk assessment from direct and in-direct impact to the living organisms and risk management strategy. Domestic trial of the CO₂ capture and sequestration in to the marine geologic formation also should be accomplished through risk management with specified ERA approaches based on the IMO framework. The risk assessment procedure for CO₂ marine storage should contain the following components; 1) prediction of leakage probabilities with the reliable leakage scenarios from both engineered and geological part, 2) understanding on physio-chemical fate of CO₂ in marine environment especially for the candidate sites, 3) exposure assessment methods for various receptors in marine environments, 4) database production on the toxic effect of CO₂ to the ecologically and economically important species, and finally 5) development of surveillance procedures on the environmental changes with adequate monitoring techniques.

Keywords: Carbon dioxide(이산화탄소), Carbon dioxide Capture and Storage(CCS)(이산화탄소 포집 및 저장), CO₂ leakage(이산화탄소 누출), Risk assessment and management(위해성평가 및 관리)

1. 서 론

대기 중 이산화탄소(CO₂)를 포함하는 온실가스의 증가와 이들이 지구 기후에 미치는 영향에 대한 우려는 시간이 갈수록 심각해지고 있다. 선진국을 중심으로 많은 나라들이 경제적인 발전과 이산화탄소 또는 온실가스의 증가가 가져올 가까운 미래의 전 인류적 피해를 최소화하기 위하여 많은 노력들을 경주하고 있다.

이산화탄소의 증가는 지구온난화와 같은 기후변화를 야기하여 기상이변, 해수면 상승 등을 초래할 수 있을 뿐만 아니라, 해양의 산성화를 초래하여 생물 종조성 및 해양생태계 변화, 영양염 순환 구조 변화 등 다양한 환경적, 사회경제적 피해를 가져올 수 있다는 주장이 점차 신빙성을 얻어가고 있다(Feely *et al.*[2004], Sabine *et al.*[2004]; IPCC[2005]; Fabry *et al.*[2008]; Florides and Christodoulides [2009]). 이와 같은 심각한 기후변화 영향 문제 해결은 근본적으로 이산화탄소의 배출 저감을 통해서 가능하다는 인식이 이미 전 세계적인 공감을 얻고 있고, 이산화탄소의 증가 속도를 늦추기 위하여 에너지 절약 및 효율 증대, 신재생에너지 기술개발과 같은 노력과 함께 이산화탄소의 배출을 대량 배출원으로부터 직접 차단하기 위한 기술개발도 진행되고 있다.

최근 EU, 미국, 일본, 호주 등 선진국들은 이산화탄소의 배출을 줄이기 위하여 발전소 등과 같은 대량의 발생원으로부터 이산

화탄소를 포집 및 수송하여 저장용량이 매우 큰 유가스전, 대수층, 석탄층 또는 심해에 안정적으로 장기간 격리시키는 탄소 포집 및 저장(carbon dioxide capture and storage; CCS) 기술 개발에 많은 노력을 기울이고 있다(IPCC[2005]; 홍 등[2005]; 류 등[2006]; 이창근[2009]). 포집된 이산화탄소의 저장과 관련하여 가장 많은 기술개발이 이루어진 부분은 특정한 지질구조에 지중저장하는 방식에 대한 것이다(윤상준[2005]). 국내에서도 역시 육상과 해양을 매개로한 CCS 기술 개발에 대한 관심이 크게 증가하였고, 이에 대한 정부의 연구개발 지원도 크게 증가하고 있는 추세이다.

최근 국내에서는 국토해양부의 ‘이산화탄소 해양처리기술개발 사업’과 같이 해양의 심부염수층(대수층)을 이용하여 이산화탄소를 저장할 수 있는 방안에 대하여 지속적인 연구를 수행하고 있다. 이 연구에서는 이산화탄소의 해양 지중저장 과정 또는 저장 이후 발생할 수 있는 이산화탄소의 해양 유출에 의한 생태계의 변화 등을 예측하고, 이에 대응하기 위한 효율적인 관리방안의 구축에도 많은 노력을 기울이고 있다(강 등[2006]).

대기로부터 이산화탄소를 장기간 격리시키기 위한 방법으로 많은 시도들이 이루어지고 있는 지중 저장의 경우, 네덜란드, 노르웨이, 유럽연합, 일본 및 호주 등은 ‘해양’을 매개로 한 지중저장이 활발하게 진행 중이며 비교적 육상공간이 넓은 캐나다, 미국, 알제리 및 중국 등은 ‘육상’을 매개로 한 저장에 대해서 많은 연

구와 시도들을 수행하고 있다(Kevitiyagala[2009]; 류 등[2006]). 각각 지중저장 사업들은 저장지의 특성에 맞는 환경 유출에 대한 감시 및 예측, 위해성평가 및 관리, 피해 저감에 관련된 체계적인 시스템을 구축하는 것을 사업의 중요한 구성 요소의 하나로 기술 개발을 진행하고 있다.

해양 또는 육상의 지질구조 내에 이산화탄소를 저장하는 과정에서 가장 중요한 관심사는 이산화탄소의 유출(leakage)에 대한 방지라고 할 수 있다(Koornneef et al.[2008]). 이산화탄소의 유출은 크게 두 가지 이유에서 심각한 문제라고 할 수 있는데, 첫 번째는 사업의 목적인 이산화탄소 저감을 인정받지 못해 사업의 존립을 위협할 수 있다는 점이고, 두 번째는 유출로 인해 환경과 생태계에 피해를 입힐 수 있다는 점이다.

이에 따라 국제해사기구(IMO)에서는 런던협약 96의정서에 의거한 해저 지중 저장에서의 위해성평가 체계를 2006년 5월에 한국을 포함한 회원국 간에 합의 도출하여 제시하였다(IMO[2006]). 따라서 각 회원국은 자국의 이산화탄소 해저 지중 저장 사업의 수행 시 IMO의 평가 지침을 기반으로 각 사업의 특성에 맞는 위해성평가관리 지침 및 체계를 마련할 의무를 갖게 되었다.

본 논문에서는 해저 지중 저장 사업 과정의 각 단계에서 발생할 수 있는 이산화탄소의 유출에 따른 환경위해성을 체계적으로 평가하기 위해 국제해사기구에서 제시한 환경위해성평가 지침을 분석하고, 이를 기반으로 국내 실정에 맞는 위해성평가관리 지침 및 체계 구축을 위한 방안과 계획을 제시하도록 하였다.

2. 이산화탄소 유출로 인한 피해 사례

이산화탄소의 유출은 다양한 과정에서 예상이 되지만 일반적으로 가능한 경로는 크게 두 가지로 예상된다. 그 하나는 대기로의 유출과 해저면으로의 유출을 예상할 수 있다. 이러한 이산화탄소의 유출은 투과성의 덮개암(cap rock)을 통한 느린 속도의 유출과 이산화탄소 수송파이프의 파괴(파손), 지중 저장 주입정의 파손, 지중 구조인 단층과 균열과 같은 예상하지 않은 현상의 발생으로 인한 누출 때문에 발생할 수 있을 것이다(IMO[2006, 2007]).

이산화탄소의 포집, 수송, 저장 과정 또는 저장 이후에 유의한 이산화탄소의 환경 유출이 일어나지 않는 것이 가장 바람직하다. 과거의 사례를 보면 메탄과 같은 가스의 지중저장이 갖고 있는 잠재적인 누출 위험성이 어느 정도인지 추정해 볼 수 있다(Lewicki et al.[2007]).

이산화탄소 지중저장과 유사하게 채굴된 천연가스를 지중에 저장하여 사용하는 경우가 있다. 미국 캔자스주의 경우 현재 18개의 천연가스 저장소를 운영 중에 있으며, 미국 전체에서 이와 같은 가스 저장소 약 320개를 운영하고 있다(Tobin[2006]). Yaggy 가스 저장소의 경우 주입정 부분에서 가스가 누출되어 폭발하여 2인의 사망자와 건물 손상을 발생시켰다. 인공적인 이산화탄소 저장은 아니지만, 자연적으로 이산화탄소가 지중에 저장된 경우가 발견되고 누출되는 경우가 있는데, 미국의 캘리포니아 clear lake

의 경우 변성퇴적층 내에서 대규모 이산화탄소가 지열에 의해 생성되어 하루에 1톤 정도 누출되어 4명의 사상자가 발생했다(Lewicki et al.[2007]). 이외에도 자연누출이 약 12건 정도 기록되었고, 1950년대 프랑스에서만도 산업용 천연가스의 지중저장소에서의 누출 사건은 7건 발생하였다(Lewicki et al.[2007]). 이러한 사고를 돌이켜 보면 해저 지중저장 시스템이 비교적 안정적이라 하더라도 누출에 대한 적절한 영향평가가 수행될 필요성이 있음을 보여주는 것이라 하겠다.

또한 노르웨이에서는 최근 이산화탄소의 지중 저장 기술개발과 연계된 석유회수증진(EOR) 주입기술 개발 과정에서 지반 붕괴로 인하여 주입수에 포함된 유류성분이 최대 175톤가량 해양으로 유출되는 사고가 일어난 것으로 보고되고 있다(Reuters[2009]). 이 사고로 환경 단체인 그린피스 는 성명을 내고 CCS 기술의 위험성을 경고하기도 하였다(Greenpeace[2008]). 이처럼 사고는 항상 예측하기 어려운 상황에서 발생하므로 그 가능성을 충분히 파악하고 대비를 하는 것은 환경 피해를 최소화하고 사업의 신뢰성을 높일 수 있는 가장 중요한 과정이다.

독일에서는 최근 2009년 7월 Spremberg 마을 주변에서 이루어지는 이산화탄소의 육상 저장 사업에 대한 주민들과 지역 정치인들의 문제제기로 인해 이미 수년간 진행되어 왔던 사업이 중단되는 사태가 빚어지기도 하였다. 축산업을 주로 영위하는 많은 주민들이 이산화탄소의 유출에 대해 심각한 두려움을 갖고 있었는데, 이러한 사태의 근본적인 원인은 CCS 사업의 위해성에 대한 과학적이고 체계적인 평가와 관리 시스템이 아직 미비한 상태에서 사업이 추진되었기 때문이다. 이러한 사례는 CCS 사업에서처럼 환경적으로 비교적 안전해 보이는 물질을 다루는 경우에 있어서도 환경적인 유출이 우려되는 경우에는 실제 이해당사자들 간의 위해도 소통(risk communication)이 얼마나 중요한 것인지 단적으로 보여주고 있다.

이산화탄소의 저장 방법 중 하나인 해저지중 저장은 상기의 육상지중 저장 과정에서 발생할 수 있는 주민 건강이나 농축산물 피해에 대한 우려와 같은 사회적인 문제들을 피해갈 수 있는 장점이 있다. 하지만 앞서 노르웨이의 유출 사고에서 볼 수 있듯이 해저지중 저장 사업 역시 충분한 위해성평가관리 체계 구축이 사업의 안정성과 신뢰성 확보를 위한 최우선 과제라고 할 수 있다.

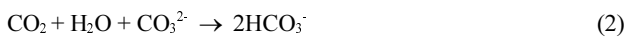
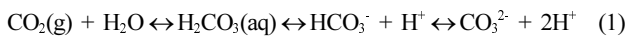
3. 고농도 이산화탄소의 유출이 인간 및 생태계에 미치는 영향

일반적으로 이산화탄소는 대기를 구성하는 성분 중에서 4번째로 많으며, ~0.038%(380 ppm) 수준으로 존재하는 미량의 기체로서, 화학적으로 안정하며 폭발성이 없어 위험한 물질로 분류되지는 않는다. 하지만 이산화탄소가 대기 중으로 고농도로 유출이 되면 인간은 물론 다양한 생물들에게 건강상의 위해(risk)를 발생시킬 수 있다. 예를 들면, 인간의 경우 1% (10,000 ppm)에 노출되면 졸음이 오는 기면상태의 증상을 느끼며, 7~10% 이산화탄소 농도는

현기증, 두통, 시각 및 청각장애의 원인이 되며, 수분에서 한 시간 이내에 의식불명이 될 수 있다(Rice[2003]). 지중 저장을 위해 주입된 이산화탄소의 지표면 유출은 이러한 위해의 원인이 될 수 있으며, 그 위험성을 정확하게 예측하고, 평가할 수 있는 방법론(methodology)이 개발되어 있지 않다면, 이산화탄소의 지중저장 과정에서 발생할 수 있는 환경적인 위해에 대해 효과적으로 대처하고 효율적으로 관리하기 어려울 것이다.

대표적인 이산화탄소의 육상 환경 유출 피해 사례로는 지난 1986년 아프리카 카메룬의 Nyos 호수에서 일어난 이산화탄소 160만 톤의 유출 사고를 들 수 있다. 이는 자연적으로 호수에 누적되어왔던 이산화탄소가 물리화학적 조건 변화를 통해 급격하게 대기 중으로 방출되어 나오면서 발생한 사고이다. 이렇게 갑작스럽게 방출된 이산화탄소는 호수에서 25 km나 떨어진 마을을 덮쳐 1700명의 마을 주민과 다수의 가축들과 생물들이 사망케 하였다(Wikipedia[2009]). 또한 국내에서도 밀폐된 공간에서 대량의 이산화탄소에 갑작스럽게 노출되어 급성적인 독성영향으로 부상을 입거나 심하면 사망에 이르는 사고가 종종 발생하고 있다(임과 배[2002]). 이처럼 이산화탄소는 생물학적 독성영향이 비교적 적은 물질이라 하더라도 환경적인 유출 문제는 소홀히 다룰 수 없는 중요한 문제라고 할 수 있다.

육상 환경으로 유출된 이산화탄소는 대기 중으로 이동, 확산되어 큰 물리변화나 대기 특성에 대한 영향을 거의 미치지 않는 반면에, 해양 환경으로 유출된 이산화탄소는 복잡한 물리화학적, 생물학적인 변환 과정을 통해 해수의 화학적 조성에 영향을 미칠 수 있다. 대기 중으로부터 표층 해수로 또는 해저 지중 저장을 위한 이산화탄소 수송 파이프라인이나 저장지의 단층으로부터 유출되어 해수로 유입된 이산화탄소는 아래 식 (1)과 같이 가수분해되어 중탄산염(HCO_3^-)과 수소이온(H^+)을 생성하게 된다. 중탄산염은 다시 탄산염(CO_3^{2-})과 수소이온으로 분해될 수 있는데, 이들 화학물질 간의 평형관계에 의해 결과적으로 용존 이산화탄소의 순증가는 아래 식 (2)와 (3)과 같은 방식으로 중탄산염과 수소이온의 증가를 야기하는 반면 탄산염 농도의 감소로 이어진다.



또한 해수 중의 용존 이산화탄소나 중탄산염은 식물의 광합성에 의해 유기물로 변환되고, 탄산염은 석회 성분으로 해양생물의 패각이나 몸체로 변환되어 복잡한 먹이연쇄 속에 들어오게 되고, 심해로 침강하여 표층의 탄소를 심해저로 실어 나르는 컨베이어 벨트의 역할을 하게 된다(Sabine *et al.*[2004]).

용존 이산화탄소의 증가가 수소이온의 증가, 즉 산성도의 증가 또는 pH의 감소를 야기한다는 사실 때문에 흔히 대기 중 이산화탄소 증가로 인한 해양의 화학적 변화를 통칭하여 해양 산성화(ocean acidification)라고 부르기도 한다. 마찬가지로 지중 저장 사업 과정 또는 저장 이후의 과정에서 해양으로 유출된 고농도의 이

산화탄소 역시 주변 해수를 산성화할 수 있다. 표층 해수의 용존 이산화탄소의 증가는 현재 진행형인 현상으로 지난 150년 동안 대기 중 이산화탄소 증가로 인해 해수의 평균 pH는 최소 0.1 이상 낮아진 것으로 파악되고 있으며, IPCC의 예측시나리오에 따르면 2100년경이면 해수의 pH가 0.3~0.4 정도 더 낮아질 것으로 예상되고 있다(IPCC[2001]; Orr *et al.*[2005]). 이러한 해양의 화학적 변화가 해양 생태계에 미칠 영향을 정확하게 예측할 만큼의 연구 성과는 매우 부족한 실정이나, 많은 연구에서 소위 해양 산성화라 일컬어지는 해수의 화학적 변화 과정에서 일부 해양 생물과 생태계 군집의 심각한 피해를 우려하고 있다(이 등[2006]; Fabry *et al.*[2008]).

이산화탄소 증가 완화를 위해 시도되고 있는 해저 이산화탄소 지중저장 사업과 같은 해양 CCS 사업의 경우 사업 과정 혹은 이후에 이산화탄소 유출로 인한 해양 생태계 피해에 대해 예상해 볼 수 있다. 이러한 과정은 주변 해수의 pH 변화에 민감한 많은 해양 생물들, 특히 심해 생물들에 대한 이산화탄소 유출의 영향을 우려하는 계기가 되었는데, Seibel & Walsh[2003]는 외부 환경이 연중 거의 변하지 않는 심해에 서식하는 생물의 대부분은 주변 해수의 pH가 0.1 정도만 변해도 유의한 생리적인 영향을 받을 수 있을 것으로 예상하고 있다. 상대적으로 pH의 변화가 심한 연안 생물의 경우에도 pH가 1.0 이상 급격하게 변화하게 되면 일부 독성 영향을 받을 수 있다(Knutzen[1981]).

하지만, 고농도 이산화탄소의 유입은 해수의 탄산염 조성의 변화를 통해 다른 심각한 영향을 미칠 수 있다. 대표적으로 산호나 석회조류와 같이 탄산염을 이용하여 석회질(CaCO_3)의 몸체를 구성하는 생물들의 경우 이산화탄소 유입에 의한 영향을 민감하게 받는 것으로 알려져 있다(Gattuso & Buddemeier[2000]; Riebesell *et al.*[2000]). 즉, 탄산염의 농도 감소(상기 식 (3)참조)는 이들 생물들의 석회형성율(calcification rate)의 감소로 이어져 개체의 성장과 생존에 지대한 영향을 미칠 수 있다. 물론 산호나 석회질 조류는 주로 표층해수에 서식하여 해저에 지중 저장 과정 또는 이후에 유출된 이산화탄소의 영향 범위에는 포함되기 어렵다. 일반적으로 심해저에는 해수의 탄산염 포화도가 표층에 비해 훨씬 낮은 경향이 있다. 하지만, 아직까지 해저면의 이산화탄소 유출이 탄산염 이용 심해 생물에 미치는 영향에 대해서는 잘 알려져 있지 않다.

용존 상태의 이산화탄소는 그 자체가 생물에 흡수되어 독성 영향을 미칠 수 있다(Kurihara & Shirayama[2004]; Kikkawa *et al.*[2003]). 용존 상태의 이산화탄소는 수소이온과는 달리 전하를 띠지 않는 중성으로 쉽게 세포막을 통과할 수 있다. 따라서 해수에 고농도의 이산화탄소가 유입되면, 세포내로 많은 양의 이산화탄소가 흡수된 후 가수분해되어 수소이온과 중탄산염을 형성하게 되면 세포내 pH가 감소하고 중탄산염 농도가 증가하는 과정을 통해서 생리생화학적 저해영향이 나타날 수 있다(Portner *et al.*[2004]).

실제 해저 환경에는 고농도의 이산화탄소가 해저면을 통해 지속적으로 유출되고 있는 환경이 존재하는 데, 이것이 바로 열수구(hydrothermal vent)이다. 열수구 주변 해수는 상대적으로 높은 온

도, 고농도의 용존 이산화탄소, 황화수소와 중금속, 그리고 낮은 pH의 특성을 갖고 있다. 따라서 열수구 주변에는 화학합성 박테리아를 일차생산자로 하는 매우 특징적인 심해 생태계가 형성되어 있으며, 이 생태계는 열수구의 특수한 조건에 적응하여 매우 고농도의 이산화탄소 농도에서도 서식할 수 있도록 진화한 생물들로 구성되어 있으며(Childress and Fisher[1992]), 이에 대한 연구는 이산화탄소가 지속적으로 유출되는 해저 환경의 생태계 예측에 활용될 수 있다.

지금까지 파악된 용존 이산화탄소의 영향농도 수준은 생물과 영향의 종류에 따라서 매우 다양한 것으로 파악되고 있다. 산호의 석회 형성물이나 성체의 수정물과 같이 매우 민감한 지표의 경우 대기과 표층 해수의 평균적인 이산화탄소 농도 수준(380 ppmv)보다 2배 정도 높은 수준에서도 유의한 저해 영향을 보이기도 한다. 하지만 산충류, 단각류, 요각류 등의 생존과 같은 지표는 수 만 ppmv 이상 고농도의 이산화탄소가 존재하는 조건에서도 유의한 영향을 받지 않는 것으로 나타났다(이 등[2006]). 이와 같이 생물종의 특성에 따라서 용존 이산화탄소의 증가 및 그에 따른 화학적 조성 변화가 미치는 저해 영향의 종류 및 수준은 매우 달라진다. 따라서 생태계 위해성평가를 위해서는 여러 생물 종류에 대한 다양한 영향(생존, 성장, 생식, 생리생화학적 저해 등)에 대한 용존 이산화탄소의 급만성 영향 농도 수준을 파악하고 이를 체계적으로 데이터베이스화 할 필요가 있다.

4. 해저 지중저장된 이산화탄소 월경과 환경영향

최근 런던협약/의정서 당사국 회의에서 해저 지질구조에 주입된 이산화탄소의 국가간 경계를 넘는 월경 문제에 대한 우려를 바탕으로 필요한 조치들에 대해서 논의된 바 있다(해양수산부[2008]). 해저 지질구조에 저장된 이산화탄소가 의도하지 않게 국가 사이

의 관할 경계를 가로지를 것으로 예상되는 경우, 추가적인 적절한 조치의 필요성에 공감하고, 관련 논의를 진행하고 있다. 이는 장시간에 걸친 이산화탄소의 해저 지중저장 과정 및 과정 후, 해저 지질구조에서 고의적 또는 비의도적 이동에 따른 월경 문제에 대해 법적, 기술적 고려가 필요하며, 이산화탄소의 이동에 대한 추가적인 모니터링 및 환경위해성평가에 대한 지침이 구성되어야함을 의미한다. 또한 2008년 런던협약/의정서 합동 당사국회의의 보고서(국토해양부[2009])에서는 런던의정서 제6조의 포집된 이산화탄소의 국가간 수출을 금지한다는 견해에 대해 “수출”이란 상업적 이유와 상관없이 다른 국가 내에서 이산화탄소를 처분하기 위해 국가간 이동을 포함하는 것으로 정의하였다. 하지만 이 문제에 관한 실무작업반은 이산화탄소의 국가간 고의적인 이동이 수출에 해당되는지에 대한 분명한 결론을 내리지는 못하였고, 일부 당사국들은 다수의 국가들이 영해나 배타적 경제수역 내에 적합한 저장소를 갖고 있지 않으므로 소규모 사업보다는 월경성 운송을 통한 대규모 사업이 훨씬 효과적일 것이라는 것에 대해 공감을 표시하였다. 이러한 논의는 이산화탄소의 해저 지중저장이 광범위한 지역에 대해 환경영향을 유발할 수 있을 것임을 시사하고 있으며, 즉, 위해성평가도 국지적 개념보다는 광역적 개념의 평가가 이루어져야할 것으로 판단된다.

5. 이산화탄소 해저 지중 저장과 해양 환경 위해성 평가의 필요성

국토해양부의 지원으로 진행되고 있는 해저 지중저장 사업에서는 사업 수행 과정과 이후 발생할 수 있는 환경적인 문제를 체계적으로 관리하기 위한 목적으로 기본적으로 환경위해성 평가관리 시스템을 개발하는 연구를 진행하고 있다(Fig. 1). 해저지중 저장 사업에서 수송, 주입 및 저장의 각 단계에서 이산화탄소의 유출로

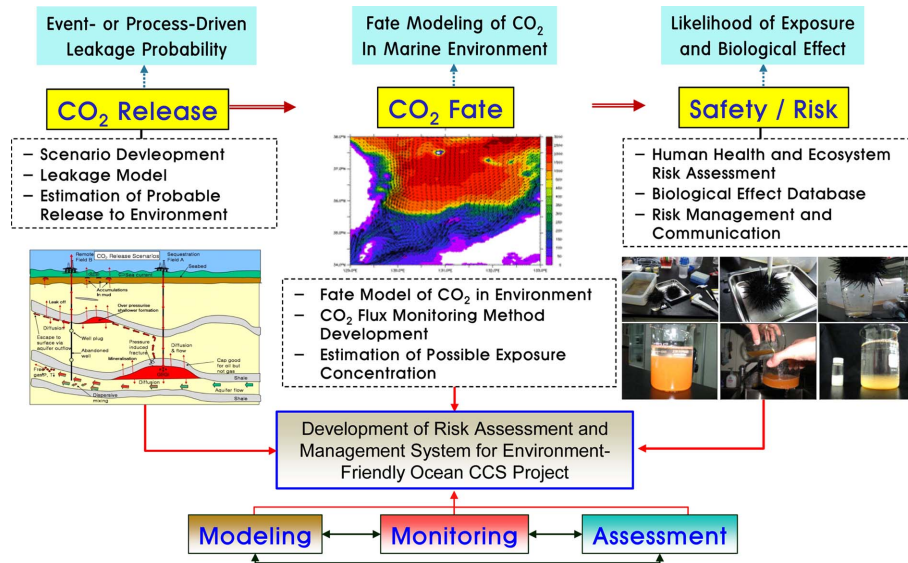


Fig. 1. Framework for the development of risk assessment and management system for environment-friendly ocean CCS project in Korea. The integrative components for the system are the CO₂ release estimation, fate modeling and safety and risk assessment procedure.

인한 해양생태계의 피해 정도를 합리적이고 과학적으로 평가하기 위해서는 사전에 해양환경으로 유출되는 이산화탄소가 환경 내에서 어떻게 이동, 확산, 변환된 이후에 어떤 수용체에 어느 정도 노출(exposure)되어 위험도(risk)를 미치는 지 예측해야만 한다(Fig. 1). 즉, 다양한 과정을 통해서 해양으로 유출된 이산화탄소가 수용체(해양생물 등)에 위협할 수 있는 정도에 대해서 ‘유출-거동-수용체 영향’ 간의 관계를 계량화하고, 이산화탄소가 수용체에 미칠 수 있는 위험을 확률로 나타내는 것을 환경 위해성평가의 중요한 목적이라 할 수 있다.

이와 같이 유출, 거동 및 영향의 과정은 해양환경에 유출된 이산화탄소의 환경 위해성평가의 기본 구성 요소를 이루며 각 과정에 대한 정확한 사전 그리고 사후 평가를 위해서 모델링과 모니터링 그리고 위해성평가의 다양한 기법들이 활용될 수 있다. 이와 같은 환경 위해성평가는 누출이 된 이후보다는 누출이 일어나기 전에 누출에 의한 피해를 사전에 예측함으로써 피해가 예상되는 누출의 가능성을 최소화하고, 적절한 대응 활동을 하기 위한 수단으로 더욱 필요하다. 물론, 사업의 진행과정에서 누출을 체계적으로 감시하고 사업에 따른 주변 환경의 변화를 주기적으로 조사하여 사업의 사후영향을 파악하는 것 역시 환경 위해성평가의 주요 목적에 포함된다.

위해성평가는 궁극적으로 위험도 관리(risk management)를 위한 하나의 과정이라고도 할 수 있다. 위험도 관리란 사전적으로 예측된 위험에 대한 적절한 예방과 감시 및 위기 대응 체계 구축과 이를 위해 필요한 법제도와 정책을 마련하는 모든 과정을 의미한다(홍 등[2005]). 또한 국민과 이해당사자간의 위험도에 대한 인식을 개선하고 원활하게 소통할 수 있도록 하는 것 역시 위험도 관리의 목적에 포함된다. 위험도 소통은 사업의 신뢰성과 안정성에 매우 큰 영향을 미칠 수 있음을 국내외 여러 사례를 통해서 쉽게 알 수 있다. 예를 들면 서론에서 언급한 독일의 사례에서처럼 지역 언론과 주민의 심각한 위험도 인식, 그린피스와 같은 환경 단체의 지속적인 반대, 수산 자원 보호에 대한 어민의 요구, 이산화탄소 유출이나 생태계 파괴에 대한 국민적 우려, 인접 국가의 이산화탄소 월경에 대한 우려와 문제제기 등은 사업의 존립에 영향을 미치는 매우 중요한 요소로 인식할 필요가 있으며, 문제 해결의 핵심은 투명하고 합리적인 위해성 평가의 수행과 이에 근거한 법제도, 정책적 수단 마련 등을 포함하는 위험도 관리 체계의 구축이라고 할 수 있다.

현재 국내외적으로 이와 같은 위험도 관리 기술을 이산화탄소의 해저 지중 저장에 적용한 사례는 많지 않아 기술 개발의 수준은 초기 단계라고 할 수 있다. 하지만, 위해성평가관리 기술은 미래의 가능성과 계획되지 않은 사건의 발생에 의한 효과에 대해 가장 비용-효과적으로 위험도 저감과 관리의 옵션이라고 할 수 있다(Deel *et al.*[2007]). 즉, 포집된 이산화탄소를 수송하여 해저 지질 구조 내에 저장하고, 안정화한 이후 전체 과정에 대한 합리적인 위해성평가 및 감시 체계는 이산화탄소가 갖는 잠재적인 유해(hazard)를 효과적으로 관리하여 환경에 대한 유해(hazard)를 완전

히 격리하거나 최소화하는데 있어서 반드시 필요할 뿐만 아니라 CDM 체계 하에서 이산화탄소의 저감 인증의 선결 요건으로서도 중요하다.

CDM을 인증 받기 위해서 작성해야 하는 문서로 Project Design Document 라는 것이 있으며, 이것은 UNFCCC에서 정한 기준을 만족시키는 가를 확인 하는 문서이다. 이 문서상에서는 5가지의 주요 내용을 구성되어 있으며, 이중 네 번째 조항에 환경영향평가에 대한 항목이 존재한다. CDM 혹은 국내 저감사업이 국제적으로 감축실적으로 인정 받기 위해서는 이러한 항목을 반드시 포함하여 작성해야 하며, CDM의 경우 국가 DNA (Designated National Authorities)에서 사업을 승인 받아야 UNFCCC에 제출할 수 있는데, 공공적 성격으로 볼 때 국가 DNA에서 중점적으로 검토해야 하는 부분은 이러한 환경위해성 평가를 충분히 검토하였는가를 판단해야 할 것이다. 정리하자면, 국가의 탄소 저감 실적을 국제적으로 인증받기 위해서는 이러한 CDM 인증절차와 같은 환경영향평가 항목에 대한 검토가 반드시 수행되어야 한다.

6. 환경 위해성평가의 개념 및 절차

환경 위해성평가는 안정적인 환경에 반하는 부정적인 영향(adverse effect)이 발생하는 것에 대한 평가 과정 또는 대상 생태계가 위해 요인(stressor)에 노출되어 발생된 결과에 대한 단계적 평가 과정으로 정의된다(U.S. EPA[1998]). 이러한 평가는 환경에 대한 보호와 관리에 관련된 정책적 결정을 합리적으로 하기 위한 방법이다. 즉, 환경 위해성평가는 환경에 대한 영향과 위해 요인의 수준 사이에 예측되는 관계성, 이에 대한 이해를 바탕으로 불확실성 및 추정, 정보와 자료의 조직적이고 체계적인 평가를 통해서 이루어지게 된다. 기본적으로 위해성평가는 과학적 기반을 둔 절차에 따라 수행되고, 그 결과들은 위험도의 효율적 관리 및 관련 정책 수립 등에 활용되는 것을 목적으로 한다(U.S. EPA[1998]).

위해성(risk)은 특정 유해한 사건이 발생할 확률(probability) 또는 빈도(frequency)와 사건이 발생하여 초래하게 되는 결과의 위험성(consequences)이라는 두 가지 요소를 포함하고 있다(Deel *et al.*[2007]). 그래서 위해성(risk)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\text{Risk} = \text{Frequency} \times \text{Consequences} \quad (4)$$

낮은 수준에서의 손상(damage)이 자주 발생하는 것과 높은 수준에서의 손상(damage)이 드물게 발생하는 것은 같은 수준의 위해성(risk)을 갖는다는 것이다. 그러므로 위해성평가 과정은 빈도와 발생한 사건의 잠재적인 손상(damage)을 함께 고려하여야 한다. 위해성평가에서 확률론적 접근방법은 위해를 평가하는데 있어서 다양성과 불확실성을 고려한 확률분포를 이용한다는 것이다. 이산화탄소의 포집 및 저장에 대한 생태위해성평가에서 확률론적 접근방법은 장기간에 걸친 과정에서 유도되는 문제(process-driven problem)이므로 가장 적당한 방법이 될 수 있을 것이다.

생태위해성평가 과정은 환경과 관련된 정책 결정(environmental

decision making)을 내리는데 유용한 방법으로 위해 요인과 생태 영향 사이의 관계에 대한 이해를 바탕으로 위해도(risk)를 예측하기 위하여 많은 자료, 정보, 가정, 그리고 불확실성들을 유기적으로 결합하여 체계적으로 평가하는 것이다. 또한 생태위해성평가는 본디 위해도 관리(risk management)라는 목적에서 출발하였으며, 인간 활동에 의해 생성되거나 영향을 받는 위해 요인과 이에 의한 부정적인 효과에 초점이 맞추어져 있다.

환경위해성평가는 앞으로 발생할 가능성이 있는 부정적인 위해에 대한 확률(전향적인 생태위해성평가) 또는 위해 요인에 대한 과거 노출이 원인이 되어 발생한 부정적인 효과에 대한 평가(후향적 생태위해성평가)에도 이용될 수 있다. 대부분의 경우, 이런 두 가지 접근방식은 단일 위해성평가 과정에 포함되어 있다.

환경위해성평가 과정은 위해 요인에 의한 부정적인 효과에 대한 특징과 노출에 대한 특성이라는 두 가지 주요 요소에 기초하고 있다. 이들은 위해성평가의 세 가지 단계인 문제설정(problem formulation), 분석(analysis), 위해도 결정(risk characterization)을 진행하는데 초점을 제공한다(Fig. 2). 문제설정 단계에서는 생태 환경에 부정적인 효과를 갖는 문제를 설정하고 분석에 대한 계획과 위해도 결정 방식을 결정한다. 문제설정 단계에서의 초기 작업은 위해 원인, 요인, 영향, 그리고 생태계와 수용체 특징들에 대한 유용한 정보를 수집하는 것으로부터 시작한다.

평가의 두 번째 단계인 분석은 문제설정 단계의 결과물들에 의해 방향이 결정된다. 분석단계에서는 위해 요인에 대한 노출이 어떻게 이루어졌고, 생태적으로 잠재적인 효과와 유형이 어떠한지에 대해 예상할 수 있다. 분석의 첫 번째 과정은 노출과 생태영향에 대한 자료의 수집 및 수집된 자료의 강점과 제한을 평가하는 것이다. 일반적인 생태위해성평가에서 노출평가를 위한 모니터링 자료는 생태적인 조건의 변화를 판별하는 것에 의해 평가의 추진력을 제공할 수도 있다. 자료의 분석과 해석에 초점이 맞추어진 위해성평가 과정을 통해 신뢰할 수 있고 충분한 자료의 획득 또는 확보는 매우 중요하다. 만약 이용 가능한 자료가 없다면, 자료가 확보될 때까지 중단할 수밖에 없다.

분석단계에서 노출평가는 위해요인의 환경거동 특성에 따른 노출경로를 결정하고, 결정된 노출경로를 바탕으로 모니터링 자료를 포함하여 이용 가능한 자료들을 수집하고 축적한다. 수집된 자료의 신뢰도에 대한 평가를 한 후, 이를 바탕으로 환경노출농도(Probable Effect Concentration; PEC)를 추정 또는 계산한다. 환경노출농도는 생태계에 서식하는 생물들이 노출된다고 예측되는 환경 중 농도를 의미한다. 생태영향평가는 노출평가 과정과 유사하게 위해요인을 생태영향 특성별로 분류한 후, 용량-반응 관계에 기초한 다양한 독성평가자료(반수치사 또는 반수영향농도, 무영향농도(NOEC) 또는 최소영향농도(LOEC) 등)를 수집하고 축적한다. 수집된 자료는 노출평가와 동일하게 신뢰도를 평가하고, 자료의 양에 따라 종민감도분포(Species Sensitivity Distribution; SSD)나 평가계수(assessment factor) 등을 활용하여 무영향농도(Probable No Effect Concentration; PNEC)를 도출한다. 무영향농도는 생태

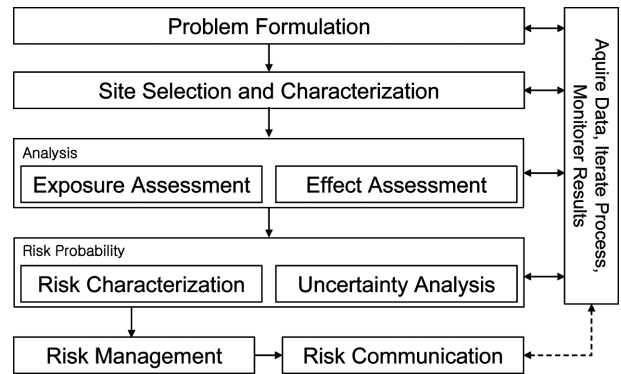


Fig. 2. The framework for ecological risk assessment specified for carbon dioxide sequestration in marine geologic formation storage (modified from USEPA [1992] and IMO [2006]). Only 'Site selection and characterization' stage is newly included in the IMO guideline, and remaining stages are mostly consistent with general risk assessment procedure from USEPA's and other protocols

계에 서식하는 생물에게 유해한 영향이 나타나지 않는다고 예측되는 환경 중 농도를 의미한다.

분석단계의 결과물은 위해도 산정 또는 결정의 기초를 제공한다. 위해도 결정 과정은 가정에 대한 요약, 과학적인 불확실성, 분석의 강점과 제한을 포함한다. 분석과 위해도 산정과정에서 누락되거나 새롭게 알게 된 것들은 문제 설정 또는 새로운 자료를 수집하고 분석하여 재평가하는 것을 유도하여 평가 과정이 반복적으로 수행될 수 있다(Fig. 2).

위해성평가 과정은 새로운 자료 또는 정보가 추가되어 한 번이 아닌 반복적으로 이루어질 수밖에 없다. 그래서 위해도 관리의 측면에서 추가적인 자료의 확보, 반복, 모니터링은 매우 중요하다고 할 수 있다. 생태위해도 산정 또는 결정은 정성 또는 정량적으로 이루어질 수 있으며, 정량적 생태위해도 결정은 무영향농도(PNEC)에 대한 환경노출농도(PEC)의 비율로 결정되며, 이를 위해지수(HQ, hazard quotient)라고 한다. 또 위해지수를 추정하는 방법은 점, 구간, 또는 분포추정 등 위해도 관리의 목적에 따라 다양하게 적용될 수 있다.

대부분의 인간 활동과 마찬가지로 이산화탄소의 회수 및 저장 사업은 앞서 언급한 이유들로 인하여 잠재적으로 환경 문제를 유발할 수 있는 가능성(확률)을 가지고 있다. 따라서 해저 지질구조에 저장된 이산화탄소에 대한 위해성평가는 일차적으로 지질구조 내에 저장된 이산화탄소가 시간이 경과함에 따라 유출될 확률과 유출에 따른 인간의 건강, 안전 그리고 환경, 공공정책에 대한 잠재적인 부정적 효과에 초점을 맞추어 위해성을 평가할 필요가 있다. 또한 이산화탄소의 해저 지중저장은 연속적인 과정으로서 접근해야 한다. 이것은 잠재적인 누출 유형에 대한 과학적이고 합리적인 가정이 밑바탕이 되어야 하며, 그 결과가 정량화 되고 위해와 함께 빈도가 측정되어 분석되는 평가가 필요하다. 이러한 결과를 바탕으로 위해에 대한 안전수준(safeguards) 또는 환경기준(environmental criteria)이 수용 가능한 수준까지 제시되어야 한다.

이런 과정을 통해 도출된 결과들은 위해에 대한 소통(risk communication) 과정에서 사회, 법률, 정치, 또는 경제적인 고려를 포함한 최종 정책적 결정을 내릴 때 유용하게 활용될 것이다. 기본적으로 생태위해성평가는 위해 관리자에게 서로 다른 관리에 대한 결정들이 갖는 잠재적인 부정적 효과에 대해 정보를 제공하기 위해 고안되고 수행된다(Ruckelshaus[1983]; Suter[1993]).

7. IMO의 이산화탄소 해저 지중저장을 위한 생태위해성평가 체계

국제해사기구(IMO)에서 런던협약 96의정서 부속서의 하나로 해저 지질구조 내 이산화탄소 격리에 관한 지침서를 발행하였다(IMO[2006, 2007]). 이 지침서는 이산화탄소 해저 지중저장에 대한 위해성평가 및 관리체계 구축에 관련된 내용을 담고 있다. 또한 이 지침서는 해저 지질구조 내 이산화탄소 격리란 산업 시설 및 에너지 관련 배출원에서의 이산화탄소 분리, 외해역(해저) 지질구조로의 운반, 대기로 부티의 장기간 격리 과정으로 구성된다 고 정의하고 있다.

이 지침서의 구성은 1)서론과 요약, 2)문제설정(Problem fomulation), 3)대상 지역 선정 및 특성 파악(Site selection and characterization), 4)노출 평가(Exposure assessment), 5)영향 평가(Effect assessment), 6)위해도 결정(Risk characterization), 7)위해도 관리(Risk management), 8) 결론 및 이용 방법 등으로 구성되어 있으며 이러한 절차 구성

은 이산화탄소 해저 지중저장이라는 특성에 맞추어 일반적인 위해성평가 절차를 대부분 따르고 있다(Fig. 2).

7.1 문제 설정

환경위해성평가의 시작인 문제 설정은 위해성평가를 위한 필요 자료의 수집이 주요한 내용이다. 이렇게 수집된 자료는 저장 후보 지역에 직접적이고 적합한 위해성평가를 위해 지역 특이적 개념 모델의 개발에 활용된다. 그리고 수집된 자료를 바탕으로 자료의 결여와 불확실성이 무엇인지 확인하는 것 또한 매우 중요하다. 또한 이산화탄소의 누출 시나리오와 경로에 대한 충분한 고려가 필요하다. 이산화탄소의 유출 시나리오는 수송 및 주입 등 사업 과정과 저장 사업 이후의 과정에서 다양하게 제시될 수 있다(Fig. 3). 사업 과정에서의 유출(operational release)은 크게 수송/주입 파이프라인의 폭발, 주입과정에서의 지반붕괴, 덮개암의 파손 등에 의해 발생할 수 있으며, 주로 일회성이며, 공학적인 과정(engineered process)에서 발생한다. 하지만, 덮개암의 균열이나 버려진 유정에서의 누출, 지진, 단층이나 크랙을 통한 누출과 같이 저장된 이후 장기간에 걸쳐 발생하는 저장 사업 이후 유출(post-operational release)은 지질학적인 과정(geological process)에서 발생할 것으로 예상된다. 유출된 이산화탄소는 기화되어 급격하게 확산, 희석되거나, 해수나 퇴적물과 접촉하며 물리화학적 특성이 변형되고 느린 속도로 확산되며 대기까지 도달할 가능성이 있다. 각각의 경로에 따라서 해양 내에서의 거동이 크게 달라질 수 있으며 영향

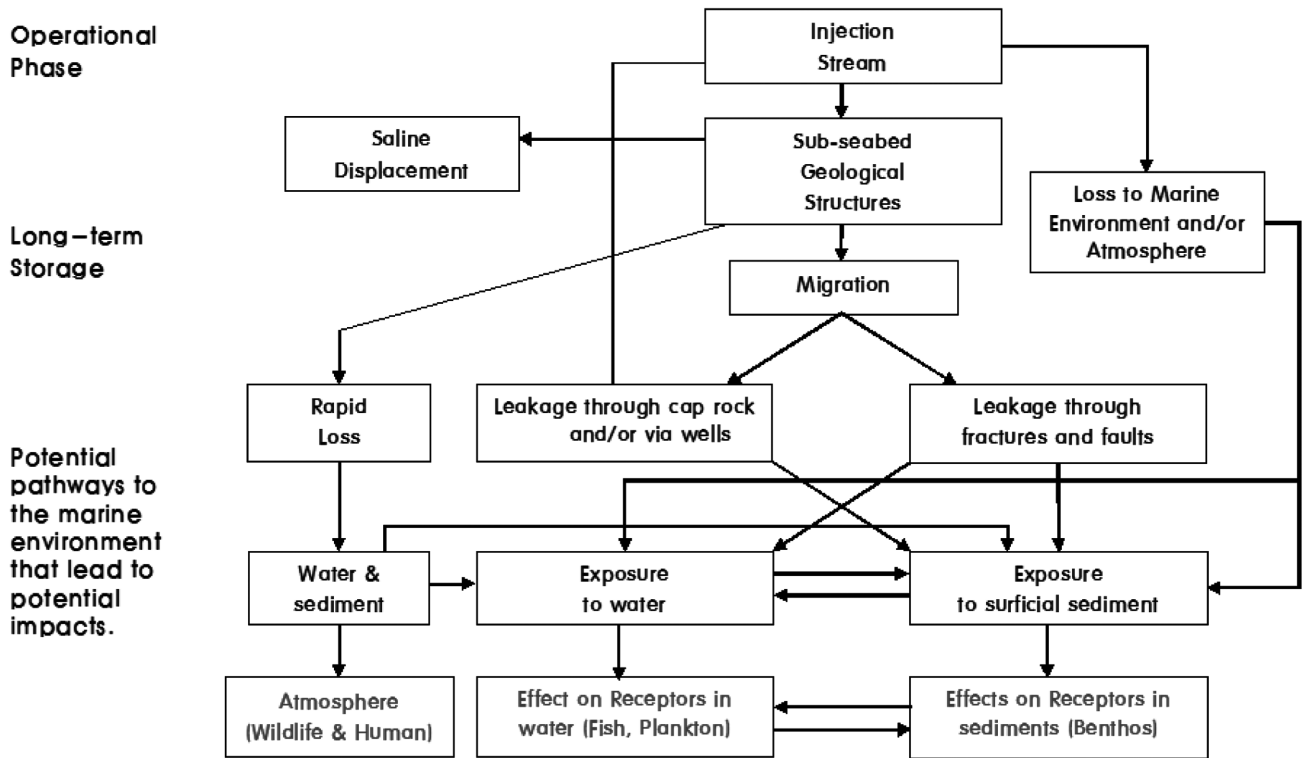


Fig. 3. Conceptual model of potential environmental pathways and effects (IMO [2006]).

을 받는 수용체 역시 달라질 수 있으므로 정확하게 유출 시나리오를 구성하고 경로를 파악하는 과정은 전체 평가 과정에서 매우 중요하다.

7.2 대상지역 선정 및 특성 파악

일반적으로 오염된 지역에 대한 생태위해성평가에서 필수적인 과정으로 포함되는 지역 선정 및 특성파악 과정에서는 이산화탄소를 장기간 처리하기 위한 저장지역의 적합성, 저장지역 주변 해양환경 특성파악을 포함한다. 또한 지역 선정 및 특성파악 단계에서는 저장지역의 지질학적, 물리적, 화학적 및 생물학적 조건들을 파악하여 필요한 관련 자료수집에 관한 것으로서 이산화탄소 저장 잠재용량, 지층주입 용이성, 저장기간, 저장소 주변지역의 적합성, 잠재 누출 경로 및 누출영향평가를 통해 최종 유망 저장지역을 선정한다.

7.3 누출 평가

일반적 생태위해성평가에서 누출평가는 물질의 지하학적 순환에 대한 이해를 바탕으로 화학평형모델이나 다매체 환경거동모델 등 다양한 평가 및 예측모델을 활용해 환경 중 농도를 예측하거나 직접 실측하여 환경누출농도(PEC)를 산정하는 과정이다(Lee[2009]). 누출평가의 중요한 내용은 물질의 환경 중 거동을 예측하기 위해 필요한 필수자료들을 최대한 수집하고 합리적으로 선택하여 평가한다는 것이다. 이산화탄소 해저 지중저장에 대한 환경위해성평가 과정에서 누출평가는 해저 지중저장되는 이산화탄소의 물리화학적 특성에 대한 정보를 수집하는 것에서부터 시작한다. 또한 포집 및 수송 과정에서 안전성 또는 기술적 필요성에 의해 추가로 포함되는 다른 화학물질(예를 들면, SO₂, NO, H₂S, CO, CH₄ 등)에 대해서도 물리화학적 특성 및 농도 등 많은 정보를 수집하여 누출평가를 수행하여야 한다. 이러한 정보들은 생물 및 환경에 대한 영향을 예측하고 이해하는데 필수적인 것이다.

본 지침에서는 이산화탄소의 해저 지중 저장에 대한 잠재적인 누출평가로서 특정지역에 처리를 위한 포집된 이산화탄소의 적합성을 결정함에 있어서 해저 지질구조로부터의 누출이 생물들에게 부정적 영향을 증가시키는 불순물 물질들의 누출이 어느 정도 증가할 것인가를 고려해야 한다고 기술하고 있다. 또한 잠재적 누출 경로로 주입정(well), 투과성 암석이 해저 표면까지 누출되어 있는 지역, 덮개암(cap rock)의 파쇄면 또는 침식부분, 그리고 저장 구조를 따라서 흐르는 측면 거동을 언급하고 있으며, 이러한 잠재적 누출경로를 통한 잠재적 거동 및 유동률을 확인하여 누출 가능성과 범위에 대한 수치모형실험을 수행하여 그 결과를 반영하도록 하고 있다.

7.4 영향 평가

해저 지질구조 내 이산화탄소 격리와 관련된 위해성들은 이산화탄소 및 그 속에 포함되어 있거나 이산화탄소 포집 및 운송과정에서 첨가된 다른 물질들이 해양환경내로 누출되어 발생할 수 있는 유해성(hazard)을 말한다. 생태영향평가 단계에서는 저장구

조로부터 누출된 이산화탄소의 생물에 대한 영향이 누출 속도 및 양, 해수와 퇴적층의 화학적 완충능력, 이동 및 확산속도에 따라 달라질 것으로 예상하며, 또한 누출된 이산화탄소에 의한 해수와 퇴적물의 pH 변화가 금속류, 영양염류 및 기타 다른 물질들의 화학적 형태(speciation), 거동 특성, 생물이용도(bioavailability)에 영향을 미쳐 이차적인 영향을 줄 수 있으므로 이에 대한 고려도 필요하다.

이산화탄소 유출에 의한 개체수준에서의 영향뿐만 아니라 군집 또는 생태계 교란 등에 대해서도 평가를 위한 자료의 수집 및 생산도 역시 중요하다. 이산화탄소 유출로 인한 환경변화는 장기간 지속될 가능성이 있으므로 생태영향평가 또한 개체의 경우 생식 또는 전 생애를 대상으로 한 평가결과가 이용되어야 하며, 군집 및 생태계 교란 또는 회복에 관한 평가결과가 활용되어야 한다. 하지만 현재 이러한 연구 결과들이 충분하지 않으므로 생태영향평가에 있어서 제한이 있을 수 있음을 지적하고 있다. 부가적으로 누출된 이산화탄소에 의한 생태계, 생물 서식지, 지역에 대한 영향이 해당 지역에서의 어업, 항해, 공학적 이용 등 다양한 목적의 이용에 잠재적 영향이 있을 것으로 예상하여 이에 대한 고려도 또한 포함할 것을 규정하고 있다.

7.5 위해도 결정

누출평가 및 생태영향평가 결과를 바탕으로 위해도 산정(risk characterization) 과정을 수행한다. 하지만 이산화탄소의 해저 지중저장이라는 특성에 맞게 지중저장 과정 단계 별로 특성화된 위해성평가를 수행할 필요가 있으며, 이는 이산화탄소의 포집 이후 수송 및 주입, 저장과정에서 초기에 발생할 수 있는 위해성은 장기적으로 발생할 수 있는 위해성과는 구분되어야 할 필요가 있기 때문이다. 이러한 이유로 장기간에 걸쳐 발생할 수 있는 위해성에 대한 고려는 모니터링 계획을 수립하고 수행하는데 있어서 매우 중요할 것이다.

7.6 위해도 관리

위해도 관리 단계에서 중요한 사항은 지속적인 모니터링을 통해 이산화탄소의 해저 지중저장이 완결된 후의 위해도를 효과적으로 관리하는데 있어서 매우 중요하다. 위해도 관리뿐만 아니라 이산화탄소 격리 장소의 효과적인 관리 및 위해도 저감과 복구 계획의 목적을 명확하게 정의하는데 있어서도 필수적이다. 위해도 관리를 위한 체계적인 모니터링을 위하여 포집된 이산화탄소의 수송 및 주입과 같은 처리과정에 대한 단기적 관점의 모니터링과 지질학적 관점의 모니터링, 환경 유출과 주변 해역 생태계에 대한 장기적인 관점의 모니터링 등이 반드시 계획되고 실행되어야 할 것이다(Table 1). 또한 모니터링 계획을 수립하고 실행하는데 있어서 이산화탄소의 이동과 누출 발생 가능한 넓은 지역에서 잠재적 이동 및 누출을 감지할 수 있는 직간접적인 모니터링 기법과 모델링을 사용하는 모니터링 프로그램을 전략적으로 고안하는 것도 깊이 고려할 필요가 있다. 특정지역에서의 모니터링 프로그램은 초기 위해도 특성 및 모델링 결과를 토대로 격리 장소에서 이

Table 1. The organization of monitoring system for risk management

| Monitoring fields | Substances and description |
|------------------------|--|
| Performance Monitoring | - The injection rate / continuous pressure monitoring - Injectivity and fall-off testing - The properties of the injected fluid / mechanical integrity |
| Seismic Monitoring | - Monitoring the geological layers above the reservoir to detect and measure migration of CO ₂ out of the intended reservoir |
| Leakage Monitoring | - Sensing system on CO ₂ leakage flux and Remote transmission/tele-monitoring system(TMS) - Development of risk mitigation protocol on ecosystem according to leak pathway - Developing sensing system on leak using tracer |
| Ecosystem Monitoring | - Organization of ecosystem monitoring around CO ₂ sequestration site at before and after processing; including monitoring entries, points and periodic cycle - Environmental effect assessment on marine sequestration |

산화탄소 관련한 다른 물질의 잠재적인 이동을 추적하기 위해 디자인 될 수 있을 것이다.

해저 지질구조 내 이산화탄소의 격리는 누출이 발생하지 않는다는 것을 목적으로 하고 있음에도 불구하고, 해양환경에의 누출에 빠르고 효과적인 대응이 가능하도록 하기 위하여 적절한 완화 또는 복구 계획을 수립하여야 한다.

8. 이산화탄소 지중저장에 대한 취약성평가 체계

이산화탄소 지중저장사업에 존재하는 잠재적 위험성 및 불확실성과 관련하여 지중저장으로 인한 악영향의 잠재성을 증가시킬 수 있는 조건을 체계적으로 확인하기 위하여 미국 환경보호국(U.S. EPA)은 취약성평가 체계(Vulnerability Evaluation Framework, VEF)를 개발하였다(U.S. EPA[2008]). 취약성평가(Vulnerability Assessment)는 광범위한 적용성이나 개인성과 관계없이 부정적인 영향이 증가할 수 있는 조건들을 체계적으로 확인하기 위하여 개발된 것이며, 또한 정량적이거나, 확률론적인 위해성평가는 아니다. 취약성평가는 환경위해성평가와 유사하게 새로운 자료 또는 정보가 확인되고 수집될 때마다 반복적으로 수행함으로써 보다 분명해질 수 있다. 취약성평가에서 생태적 수용체에 대한 평가는 이산화탄소 누출로 인한 생태영향을 받을 수 있는 수용체를 확인하고, 이러한 수용체가 민감한 종인지 또는 법률적 보호를 요하는 종인지에 따라 적절한 보호수준을 설정하고 부수적으로 이에 적합한 모니터링 및 저감계획 수립을 유도하기 위한 것이다. 이러한 평가체계는 이산화탄소 누출로 인한 영향범위(지리적 범위)의 설정에 대한 합리적인 평가체계를 제공한다. 이 외에도 인간에 대한 건강, 대기, 지하수 또는 표층수에 대한 부정적 영향범위를 어떻게 설정할 것인지에 대한 방법에 대해 체계를 구축하고 있다.

9. 국내 이산화탄소 해저 지중저장을 위한 생태위해성평가 방법 개발

국내에서는 이산화탄소 해저 지중저장과 관련된 생태위해성평가를 위하여 국내 생물종을 대상으로 한 생물영향평가와 그 결과 및 국외 자료를 수집하고 자료의 신뢰도를 평가하여 데이터베이

스 구축을 위한 기반 연구가 진행되고 있다. 또한 국내 해양환경에 적합한 생태위해성평가 방법론 개발을 위하여 이산화탄소의 지중저장 전후의 유출 시나리오 분석 및 시나리오에 따른 확산 모델 기반 연구 등을 수행하고 있으며, 국제해사기구에서 제시한 위해성평가 지침을 분석하여 환경위해성평가 및 모니터링 지침안을 구성하기 위해 노력하고 있다. 이러한 연구들은 국제법에 부합하는 해양환경 관련 국내 법령 및 제도의 구성을 위해 과학적 근거를 마련하고자 하는 노력의 일환이다.

국내에서 향후 이산화탄소 해저 지중저장에 대한 위해성평가 관리 체계 구축을 위해서는 다음과 같은 각 분야별 연구가 수행될 필요가 있다(Fig. 4).

첫 번째는 이산화탄소 해양 지중저장 시스템이 수송단계에서부터 주입 단계 및 사후관리까지 전체적 이산화탄소의 유출 가능성을 사전에 차단하고 위험성을 최소화하기 위한 분야이다. 이산화탄소 자체는 환경위해 물질이 아니지만, 수송부터 주입 후 저장관리 과정까지 고농도 이산화탄소의 누출 위험성을 인정하고 이러한 부분의 가능성을 파악하여 시스템 전체의 안정적 관리를 위한 기준을 제공해야 한다. 이러한 기준을 제공하기 위해서는 각 포집, 수송, 저장의 모듈별 유출 시나리오와 시나리오별 누출 경로 및 확산 영향 지역을 파악하는 확률기반의 확산 유출 모형 개발을 통한 영향평가 방법을 마련하고 있다. 이러한 영향평가 및 확률기반

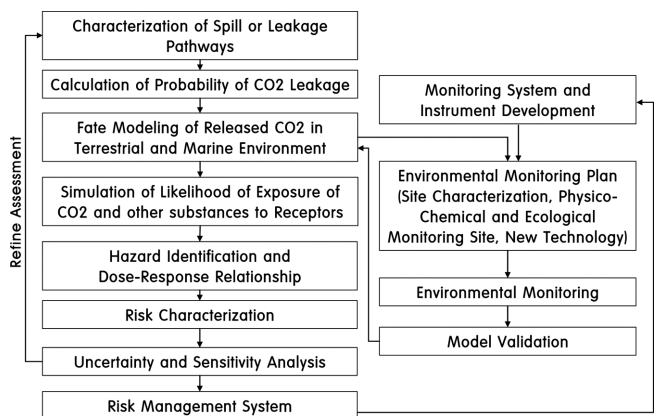


Fig. 4. The organization of environmental risk assessment on CO₂ sequestration in marine geologic formations.

누출예측 기법은 적절한 환경모니터링의 설치 계획을 좀 더 경제적으로 수립하는 데 기반을 제공할 수 있다.

두 번째는 유출된 이산화탄소의 환경 내 거동에 관한 분야로서 환경모니터링을 위한 이산화탄소 센서 개발 및 첨단 관측 장비를 활용한 모니터링 및 실시간 모니터링을 위한 시스템 구축이 필요하다. 기본적으로 국내 해저 지중저장 후보지를 대상으로 주변 해양환경에 대한 pH, 이산화탄소 분압, 온도, 염분, 해류 등과 같은 해양물리학적 정보 및 해저 퇴적물 정보 수집을 위한 기존자료 조사 및 모니터링 기술 개발을 바탕으로 환경 거동을 이해하고 예측하기 위한 연구가 중요하다. 이는 환경으로 유출된 이산화탄소의 확산, 이동, 지화학적 변환 및 지속 시간 등 거동과 관련된 모형을 개발하여 유출된 이산화탄소의 거동을 예측하고자 하는 노력의 일환이다.

또한 이산화탄소의 환경 거동에 대한 정확한 이해를 위해 이산화탄소 포집, 수송, 저장 각 과정에서 유출을 파악할 수 있는 추적자를 개발하여 추적자를 활용한 유출 모니터링 기법을 개발하기 위한 연구가 필요하다. 이 외에 이산화탄소 유출에 의한 생태계 영향을 모니터링하기 위해 해저 지중저장 후보지 주변 생태계를 대상으로 군집자료 조사, 생태계 연구, 독성 영향 모니터링을 위한 연구들이 계획되고 있다.

마지막으로, 이산화탄소의 해양 지중저장에 대한 안전성을 담보하기 위해 환경위해성평가와 관리 분야의 기반 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구를 위해서는 이산화탄소의 거동 및 개연성 있는 유출시나리오에 기반을 둔 누출과 이에 따른 생물학적 영향 및 확률을 예측하여 이산화탄소 고유의 독성역학적 모형을 개발하고, 이를 활용한 관련 자료의 생산 및 수집, 데이터베이스의 구축 등이 필수적이다. 환경위해성평가 체계 구축은 위해도 관리와 소통에 대한 기반을 확립하며, 이산화탄소 해양 지중저장에 대한 안전을 바탕으로 한 사회적 수용을 이끌어내고자 하는 노력들이다. 이는 매체별 환경 노출 및 수산물이나 축산물을 통한 간접적인 잠재 노출로 인한 인간 보건학적 위해성평가와 사회경제적으로 민감한 생물자원에 대한 평가도 함께 포함하고 있다. 이러한 노력을 바탕으로 환경위해성평가 지침 및 생물영향평가를 위한 공정시험법 등 국내법 및 국제법 체계 마련에 많은 기여를 할 것으로 기대된다. 또한 환경을 고려한 이산화탄소 해저 지중저장에 대한 경제성 분석을 위한 손익분석 기법의 개발을 통하여 중장기적 관점에서 대응할 수 있을 것으로 기대한다.

9.1 향후 연구 방향

앞서 언급한 바와 같이 이산화탄소의 해저 지중저장에 있어서 예상되는 가장 주요한 위해(risk) 중 하나는 잠재적인 유출이다. 이러한 위해를 최소화하기 위해서는 저장된 이산화탄소에 대한 측정(measurement), 저감(mitigation), 검증(verification)에 관련된 기술 개발이 필수적으로 요구된다. 이산화탄소에 대한 측정, 저감, 검증이란 특정 저장장소 또는 처분위치에 격리된 이산화탄소의 양을 측정할 수 있는 능력, 이산화탄소의 잠재적인 유출을 줄일 수

있는 기술의 개발, 마지막으로 저장되거나 격리된 이산화탄소가 주변 생태계에 부정적인 영향을 미치지 않을 것에 대한 증명할 수 있는 기술들의 연속성을 말한다. 이와 같은 이산화탄소의 저장으로 인한 잠재적 위해에 관련된 기술들의 발전은 지중저장에 대한 환경위해성평가의 주요한 과정들을 보다 과학적으로 이루어질 수 있도록 할 것이다.

이산화탄소라는 물질이 갖는 물성에 적합한 환경위해성평가를 위해서는 노출평가가 매우 중요할 것으로 판단된다. 이산화탄소의 잠재적인 유출이 갖는 위해(risk)에 대해 다양한 노출시나리오를 작성하고, 시나리오의 개연성을 검토하여야 하며, 개연성 있는 노출시나리오에 기반을 둔 노출평가가 이루어져야 할 것이다. 또한 해양환경에서의 이산화탄소 유출이라는 특수한 조건하에서 물질의 확산, 희석 등과 같은 거동에 대한 모델링이 이산화탄소의 해저 지질구조 내 주입 전과 후, 장기간에 걸친 저장과정 등 다양한 시기에서 필요할 것이며, 그 결과들 또한 노출평가에 활용될 수 있을 것이다.

환경에 유출된 이산화탄소의 국내 생물종을 대상으로 한 실험 결과가 충분하지 않은 상태에서는 국내 환경에 적합한 생태영향평가 및 생태위해성평가는 한계가 있다. 따라서 유출된 이산화탄소의 국내 생물종에 대한 생리, 생태학적 영향에 대한 연구가 보다 활발하게 이루어져 이와 같은 생물영향에 대한 메커니즘을 규명하고 생물영향에 대한 결과를 데이터베이스화하는 노력이 더욱 필요하다.

이산화탄소의 해저 지질구조 내 저장 후에는 이에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다. 저장된 이산화탄소는 지하내부의 단층이나 암석 틈을 통하여 상부로 이동하면서 지하수를 오염시키거나 대기 혹은 해수 속으로 누출되어 생태계에 영향을 끼칠 수 있다. 이로 인한 위해를 저감하고 신속하게 대응하기 위해서는 이산화탄소의 이동추적, 예측, 누출 조기 진단 등을 위한 다양한 모니터링 기법이 개발될 필요가 있다.

앞서 언급한 많은 시도와 연구결과를 바탕으로 이산화탄소 해양 지중저장에 대한 위해성평가 및 관리체계가 구축되고, 구축된 체계를 바탕으로 환경에 대해 이산화탄소가 갖는 잠재적인 위해를 효과적으로 제어하고 관리하기 위하여 지속적인 연구 지원과 관련 연구자들의 노력이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 ‘이산화탄소 해양 지중저장 기술개발’의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 강성길 외, 2006, “CO₂ 해양지중저장 실용화를 위한 위해성평가관리 체제”, 이산화탄소 포집 및 저장기술 워크샵, pp. 115-140.

- [2] 국토해양부, 2009, “2008년 런던협약/의정서 합동 당사국회의 보고서”, 202pp.
- [3] 류재용, 강성길, 정노택, 박용찬, 2006, “CO₂ 해양처리 기술 현황 분석 및 향후 연구개발 방안”, 선박해양기술. Vol.42, 71-84.
- [4] 윤상준, 2005, “이산화탄소의 지중저장 기술 및 현황”, ETIS 분석지, Vol.26, 111-118.
- [5] 이정석, 이규태, 김찬국, 박건호, 이종현, 박영규, 강성길, 2006, “해수 중 용존 CO₂ 농도 증가가 해양생물 및 해양생태계에 미치는 영향: 국내외 사례 연구”, 한국해양환경공학회지, Vol.9, 243-252.
- [6] 이창근, 2009, “이산화탄소 포집기술 최신 개발 현황”, 공업화학 전망 Vol.12, 30-42.
- [7] 임현술, 배근량, 2002, “생강 저장굴에서 발생한 건강 피해의 원인 조사”, 예방의학회지, Vol.35, 72-75.
- [8] 해양수산부, 2008, “2007년 런던협약/의정서 당사국회의 보고서”, 71pp.
- [9] 홍기훈, 박찬호, 김한준, 2005, “이산화탄소 해저 지질 구조 격리: 기술 현황과 제도 예비검토”, 한국해양환경공학회지, Vol.8, 203-212.
- [10] Childress, J.J. and Fisher, C.R., 1992, “The biology of hydrothermal vent animals: physiology, biochemistry, and autotrophic symbioses”, *Oceano. Mar. Biol. an Annual Review*, Vol.30, 337-441.
- [11] Deel, D., Mahajan, K., Mahoney, C.R., McIlvried, H.G. and Srivastava, R.D., 2007, “Risk assessment and management for long-term storage of CO₂ in geologic formations-United States Department of Energy R&D”, *Systemics, Cybernetics and Informatics*, Vol.5, 79-84.
- [12] Fabry, V.J., Seibel, B.A., Feely, R.A. and Orr, J.C., 2008, “Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes”, *ICES J. of Mar. Sci.*, Vol.65, 414-432.
- [13] Feely, R.A., Sabine, C.L., Kee, K., Berelson, W., Kleypas, J., Feby, V.J. and Millero, F.J., 2004, “Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans”, *Science*, Vol.305, 362-366.
- [14] Florides, G.A. and Christodoulides, P., 2009, “Global warming and carbon dioxide through sciences”, *Environmental International*, Vol.35, 390-401.
- [15] Gattuso, J.P. and Buddemeier, R.W., 2000, “Calcification and CO₂”, *Science*, Vol.407, 311-312.
- [16] Greenpeace, 2008, “Leakages in the Utsira formation and their consequences for CCS policy”, (Greenpeace Briefing).
- [17] 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.
- [18] 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”.
- [19] IPCC, 2001, “Climate Change 2001; Scientific Basis”, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 944pp.
- [20] IPCC, 2005, “IPCC special report on carbon dioxide capture and storage”, Cambridge University Press (<http://www.ipcc.ch>).
- [21] Lewicki, J.L., Birkholzer, J. and Tsang, C.-F., 2006, “Natural and industrial analogues for leakage of CO₂ from storage reservoirs: identification of features, events, and processes and lessons learned”, *Environ. Geolo.*, Vol.52 457-467.
- [22] Kevitiyagala, N., 2009, “Carbon sequestration”, *Science*, Vol.325, 1644-1645.
- [23] Kikkawa T., Ishimatsu A. and Kita, J., 2003, “Acute CO₂ tolerance during the early developmental stages of four marine teleosts”, *Environ. Toxicol.*, Vol.18, 375-382.
- [24] Knutzen, J., 1981, “Effects of decreased pH on marine organisms”, *Mar. Pollut. Bull.* Vol.12, 25-29.
- [25] Koornneef, J., Faaij, A. and Turkenburg, W., 2008, “The screening and scoping of environmental impact of carbon capture and storage in the Netherlands”, *Environmental Impact Assessment Review*, Vol.28, 392-414.
- [26] Kurihara, H. and Shirayama, Y., 2004, “Effects of increased atmospheric CO₂ on sea urchin early development”, *Mar. Ecol. Res. Ser.*, Vol.274, 161-169.
- [27] Lee, J.-H., 2009, “Toxicokinetic and toxicodynamic models for ecological risk assessment”, *J. of Environ. Toxi.*, Vol.24, 79-93.
- [28] Orr, J.C., Fabry, V.J. and Aumont, O.A., 2005, “Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms”, *Science*, Vol.437, 681-686.
- [29] Portner, H.O., Langenbuch, M. and Reischläger, M., 2004, “Biological impact of elevated ocean CO₂ concentrations: Lessons from animal physiology and earth history”, *J. Oceanogr.*, Vol.60, 705-718.
- [30] Reuters News, 2009, “Norway bets on CO₂ capture, storage despite risks”, (28th, May), <http://www.reuters.com/article/latestCrisis/idUSLS313448>.
- [31] Riebesell, U., Zondervan, I., Rost, B., Tortell, P.D., Zeebe R.E. and Morel, F.M.M., 2000, “Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO₂”, *Nature*, Vol.407, 364-367.
- [32] Rice, S.A., 2003, “Health effects of acute and prolonged CO₂ exposure in normal and sensitive populations”, Second Annual Conference on Carbon Sequestration, May 5-8 2003, Virginia, USA.
- [33] Ruckelshaus, W.D., 1983, “Science, risk, and public policy”, *Science*, Vol.221, 1026-1028.
- [34] 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 CO₂”, *Science*, Vol.305, 367-371.
- [35] Seibel, B.A. and Walsh, P.J., 2003, “Biological impacts of deep-

- sea carbon dioxide injection inferred from indices of physiological performance”, *The Journal of Experimental Biology* Vol.206, 641-650.
- [36] Suter, G.W., 1993, “A critique of ecosystem health concepts and indexes”, *Environ. Toxicol. Chem.*, Vol.12, 1533-1539.
- [37] Tobin, J., 2005, “U.S. Undergraduate Natural Gas Storage Development: 1998-2005. Energy Information Administration, Office of Oil and Gas”.
- [38] U.S. Environmental Protection Agency, 1992, “Framework for ecological risk assessment”, Washington, DC: Risk Assessment Forum, U.S. EPA. EPA/630/R-92/001.
- [39] U.S. Environmental Protection Agency, 1998, “Guidelines for ecological risk assessment”, Washington, DC: Risk Assessment Forum, U.S. EPA. EPA/630/R-95/002F. 124 pp.
- [40] U.S. Environmental Protection Agency, 2008, “Vulnerability evaluation framework for geologic sequestration of carbon dioxide”, U.S. EPA, EPA430-R-08-009, 78 pp.
- [41] Wikipedia, 2009, Free Encyclopedia, (http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lake_Nyos&oldid=321449320).

2009년 11월 10일 원고접수

2009년 11월 24일 심사완료

2009년 11월 24일 수정본 채택