

# 생태독성을 고려한 CCS 전과정 영향평가 방법론 개발 연구

박기학, \*강헌  
(주)에코피엔지, \*수원대학교

A study on development of CCS(Carbon Capture and Storage) life cycle impact assessment methods considering the ecotoxicity

Ki-Hak Park<sup>1</sup>, \*Hun Kang  
Eco P&G, \*Dept. of Environmental energy Engineering, Suwon University  
parkihak@naver.com, \*hkang@suwon.ac.kr

## Abstract

Carbon capture and storage(CCS) is a technique that aims to capture carbon dioxide(CO<sub>2</sub>) from emissions and store it somewhere, thus it attracts public attention as a reduction method of the greenhouse gases(GHGs).

To achieve GHGs reduction goal complying with 2005 level by 2050, internationally it is forecasted that CCS will reduce 19% of total greenhouse gas.

Also, South Korea has a plan to reduce 32 million tons of CO<sub>2</sub> emission, which is 10% of total national GHGs, by using CCS techniques by 2030. There many technical efforts and researches for CCS system for GHGs reduction, however, there has been little study on ecological and environmental impact assessment and research for CCS system.

The CO<sub>2</sub> storage at underground and deep saline aquifer can contribute for GHGs emission reduction, however, the CO<sub>2</sub> leak from storage can affect ecological system and this cause other serious problems. Also we cannot expect its impacts.

Therefore, in this study, we suggested a life cycle impact assessment method, which can be applied to the CCS system, as not a global warming emission but an ecotoxicity factor for CO<sub>2</sub> emission. When CO<sub>2</sub> emission is considering as an ecotoxicity emission, first we can identify the quantity and concentration of CO<sub>2</sub>, and then it can be translated to 1,4-dichlorobenzene(DCB) equivalent value, which is ecotoxicity characterization factor. This life cycle impact assessment method can be applied to CCS system effectively.

By using this suggested life cycle impact assessment method in this study, we can interpret in terms of global warming and ecotoxicity aspects and it will contribute for safe CCS technology development.

**Keywords** : Life cycle assessment, Carbon capture and storage(CCS), Ecotoxicity, Characterization

## 요약문

이산화탄소 포집 및 저장(CCS)은 대량의 발생원으로부터 배출되는 이산화탄소를 포집 및 수송하여 적절한 지하장소에 저장하는 기술로써 온실가스 감축방안으로 크게 주목을 받고 있다. 세계적으로 2050년까지 2005년 수준으로 온실가스 배출을 감축하는 목표를 달성하는데 있어 CCS가 전체 온실가스 감축량의 19%에 기여할 것으로 전망하고 있다. 또한 국내에서도 2030년까지 국가 온실가스 배출량의 10%에 해당되는 CO<sub>2</sub> 32백만 톤을 CCS 기술로 감축할 계획을 제시하고 있다.

그러나 CCS는 온실가스를 저감하기 위해 기술적 노력과 연구를 하고 있으나, 생태계 및 환경에 대한 평가

와 연구는 미흡한 실정이다. 지중 및 해양에 저장되는 CO<sub>2</sub>는 온실가스 저감에 크게 기여하나, CO<sub>2</sub> 누출로 인한 지중 및 해양 생태계영향과 변화는 또 다른 문제를 발생시킬 수 있으며, 그 영향을 아무도 예측할 수 없는 상황이다.

따라서 본 연구에서는 CO<sub>2</sub>가 지구온난화의 물질이 아닌 생태계에 독성인자로 작용 될 수 있는 측면을 고려하여 CCS에 적용될 수 있는 전과정평가 방법을 제시하였다. CO<sub>2</sub>가 생태계에 독성으로 작용될 수 있는 양과 농도를 규명하여 생태독성 특성화인자인 1,4-dichlorobenzene(DCB) eq로 전환함으로써 전과정평가 기법을 CCS에 효과적으로 적용 할 수 있다.

본 연구에서 제시한 CCS의 전과정평가 방법을 활용하여 지구온난화 및 생태계의 영향 측면을 모두 고려한 환경영향평가 해석이 가능하며, 안전한 CCS 기술발전에 크게 기여할 것으로 기대된다.

*주제어 : 전과정평가, 이산화탄소 포집 및 저장, 생태독성, 특성화*

## 1. 서론

### 1.1 온실가스 감축 노력

현재 국내뿐 아니라 전 세계적으로 자원과 에너지, 그리고 지구온난화 물질인 이산화탄소의 배출을 줄이기 위해 다양한 기술 개발은 물론, 제도적으로 많은 체제를 구축하고 있는 상황이다. 경제적 관점에서 에너지의 효율화와 자원의 사용을 줄이는 경지를 넘어 온실가스를 감축하지 못하는 국가와 기업은 세계시장에 진입할 수 없는 상황에 이르렀다. 세계적으로 이산화탄소의 배출을 줄이기 위해 다양한 감축 목표를 국가적으로 설정하고 있으며, EU의 경우 2020년까지 1990년 대비 20% 감축계획을 제시하며 이에 대한 실행방안으로 자동차 온실가스 배출규제 등을 도입하고 있다.

한편 국내에서는 저탄소녹색성장기본법을 중심으로 온실가스·에너지 목표관리제도 등 다양한 방법으로 국내 온실가스를 감축하기 위한 노력을 기울이고 있는 상황이다. 현재 국내의 온실가스 감축 목표는 2020년까지 국가온실가스 배출량을 30%감축(BAU대비)을 목표로 설정하였고, 이를 위한 실천 방안으로 신재생에너지 개발, 에너지 절약 및 효율 증대와 같은 노력을 기울이고 있다. 또한 온실가스의 감축하기 위한 대안으로 CCS 기술을 도입하고 있으며, 2020년까지 100만 톤급 포집 수송 저장 통합실증완료계획과 함께 2030년까지 CO<sub>2</sub> 32백만 톤을 CCS 기술로 감축(국가 온실가스 배출량의 10%)하는 계획을 제시하고 세계 CCS 기술 강국으로의 도약을 추진하고 있다.

CCS의 기술의 도입으로 세계적으로 2050년까지 2005년 수준으로 온실가스배출을 감축하는데 약 19%를 기여할 것으로 전망하고 있으며, 이를 채택하지 않을 경우 이산화탄소의 감축비용이 약 70% 증가할 것으로 예상하고 있다(IEA 2010). 이에 따라 이산화탄소 포집 및 저장(Carbon dioxide Capture and Storage, CCS)을 위한 기술개발과 노력이 진행되고 있다.(IEA 2009)

### 1.2 이산화탄소 포집 및 저장 (CCS) 기술

이산화탄소 포집 및 저장(CCS)은 CO<sub>2</sub>를 직접적으로 감축할 수 있는 종합적인 기술로서 기존의 고농도 CO<sub>2</sub> 대량 배출원(화석연료 연소 산업, 천연가스 정제, 시멘트제조공정, 에탄올 생산)에서 발생하는 CO<sub>2</sub>를 포집하고, 포집된 CO<sub>2</sub>를 압축, 수송하여 지중 및 해양 퇴적 암반층에 안전하게 저장하고 장기 모니터링 하는 기술을 총칭한다. 전체 CCS 과정에서 70~80% 비용을 차지하는 포집 단계에서 배출가스 중 이산화탄소를 분리하는 연구가 활발하게 진행되고 있는 상황이다. 또한, 운송 단계의 경우 거리에 따른 수송 방식의 경제성이 검토 중이고, 저장 단계에서는 이산화탄소 누출 및

환경오염이 없는 안전한 지형의 탐색이 이루어지고 있다. CCS는 2010년 이후 구미 선진국을 중심으로 대규모 실증 파일럿 프로젝트를 거친 다음, 2020년부터 화력발전소에 본격적으로 운영될 것이다.

이산화탄소 포집 기술은 연소 후 포집, 연소 전 포집, 순산소 연소의 3가지 방법이 개발되고 있다. 연소 후 포집 기술은 화석연료의 연소 후 발생하는 배출가스에서 이산화탄소를 포집하는 기술이며, 연소 전 포집기술은 화석연료를 연소 전에 수증기 재질을 통해 가스화시켜 이산화탄소와 수소의 합성가스로 변환한 다음, 분리 또는 연소를 통해 이산화탄소를 포집하는 방법이다. 순산소 연소 포집기술은 공기 중의 질소를 제거한 95% 이상의 고농도 산소를 연소에 사용하여 배기가스의 이산화탄소 농도를 높여 포집하는 기술이다.(IPCC 2005)

산업 및 발전시설에서 이산화탄소를 포집한 다음에는 저장 장소까지 운반하여 격리시키는 과정이 필요하며, 대표적으로 운송 단계에서는 파이프라인 및 LNG 운반선 등의 방법이 이용되고 있다. 이산화탄소 저장이 가능한 지역은 극히 한정되어 있고 또한 저장 시 운송거리, 기온, 이산화탄소 운송량 및 압력과 같은 다양한 변수를 고려해야 한다.

일반적으로 1,000 km내에서는 파이프라인으로 운송하는 방식이 경제적이며 이때에 이산화탄소를 100 ~ 150 bar의 임계압력까지 압축하여야 한다. 미국의 경우 유전채굴에 사용되는 이산화탄소를 전달하기 위해 이미 2,500km의 파이프라인이 사용되고 있다. 이 밖에도 탱크 트럭이나 대형 가스운반선을 이용한 운반방법이 사용될 수 있다.(IPCC 2005)

1990년대부터 석유 및 천연가스의 개발 사업에서 자원 회수를 증진시키기 위해 이산화탄소 저장 방법(EOR, Enhanced Oil and Gas Recovery)이 사용되어 왔지만, 최근에는 CCS를 위해 폭넓은 장소 탐색이 이루어지고 있다. 특히 내륙 및 해양 지층이 저장 장소로 각광받고 있다. 해수 심층 저장, 광물 저장 등의 방법도 있지만 생태계 파괴와 반응 시간이 오래 걸리는 한계가 있기 때문이다. 지층 저장이 적합한 장소로는 지하 약 1,000 m깊이의 대염수층(1), 석유 가스층(2), 석탄층(3) 등이 있다(Fig. 1). IPCC에 따르면 대염수층의 잠재 저장 능력은 1,000 GtCO<sub>2</sub>로 2005년 글로벌 연간 이산화탄소 배출량 7 GtCO<sub>2</sub>에 비교하였을 때 충분한 것으로 평가되고 있다.(IPCC 2005)

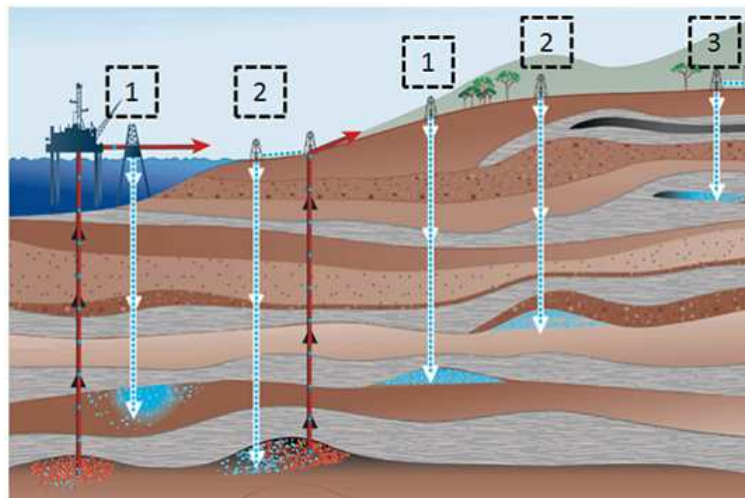


Fig. 1. Overview of geological storage options.

## 2. 연구 배경 및 목적

런던의정서에서 이산화탄소를 해양배출이 가능한 폐기물로 규정함(2006. 10 런던의정서)으로써 일본과 미국은 기존의 법 규정을 개정하였으며, EU는 별도의 지중저장관리에 관한 법령을 마련하고 있다. 이산화탄소의 해양배출의 경우 처분대상은 순수 이산화탄소 스트림으로, 처분장소는 해양지중으로 제한하고 있는 상황이다. 국내에서도 해양환경관리법 시행규칙 개정안(2010. 2 국토해양부)에 따르면 이산화탄소 스트림을 해양배출폐기물로 지정하여 “격리목적의 이산화탄소 포집공정으로부터 발생한 이산화탄소스트림”에 대하여는 해양배출(지중저장)을 허용할 수 있도록 국내법을 수용하고 있다. 따라서 CCS 기술은 더욱더 발전 될 것이다. 그러나 CCS의 기술발전과 노력에 비해 지중 및 해양에 저장되어지는 CO<sub>2</sub>가 생태계에 어떠한 영향을 줄 것인가의 연구는 진행되어 지고 있지 않은 실정이다. 지중 및 해양에 저장되는 CO<sub>2</sub>는 온실가스 저감에 크게 기여하나, CO<sub>2</sub> 누출로 인한 지중 및 해양 생태계영향과 변화는 또 다른 문제를 발생시킬 수 있으며, 그 영향을 아무도 예측할 수 없는 상황이다. 본 연구에서는 CCS의 안전성과 관련하여 인간 및 생태계의 피해사례와 이를 평가할 수 있는 위해성 평가 기법을 살펴보았으며, CCS를 전과정평가 기법에 적용하기 위한 방안을 살펴보았다. 본 연구에서는 CO<sub>2</sub>가 지구온난화의 물질이 아닌 지중 및 해양생태계에 독성인자로 작용 될 수 있는 측면을 고려하여 CCS에 적용될 수 있는 전과정평가 방법을 제시하였다. 본 연구의 범위는 해양생태독성을 정량화하는 기법으로 특성화 단계 까지를 고려하였으며 Mid-point 환경영향을 제시하였다. CCS의 전과정평가 기법은 생태계에 독성으로 작용될 수 있는 CO<sub>2</sub>가 양과 농도를 규명하여, 생태독성 특성화인자인 1,4-dichlorobenzene(DCB) eq로 전환함으로써 가능하며, 전과정평가 기법을 CCS 기술에 효과적으로 활용할 수 있도록 방법론 개발에 목적이 있다. 또한, 지중 및 해양에 저장되는 CO<sub>2</sub>가 생태계에 미치는 영향과 지하수의 산성화 등 다양한 해석과 접근이 필요하며, 이는 잠재적 환경영향을 정량적으로 평가하는 전과정평가가 CCS의 보급화에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

## 3. 연구수행

### 3.1 이산화탄소 포집 및 저장 (CCS)기술의 안전성

이산화탄소 포집 및 저장 (CCS) 기술은 대용량 고농도 이산화탄소 저장기법으로서 저장에 따른 환경피해는 수반될 수밖에 없으며, IPCC WG3에서는 이산화탄소 회수저장 특별보고서를 2005년에 발간하였고, 이산화탄소 포집 및 저장에 있어서 수송 또는 지중저장소 등과 관련된 부분의 안정성과 주변 환경에 대한 문제점, 그리고 광물탄산화 등에 대한 위험성을 경고하였으며, 이것은 주로 저장소의 누출 시 발생할 수 있음을 시사하고 있다.

지중저장 시 이산화탄소의 주입은 지진과 화산활동 혹은 지반의 상대적 침하를 발생시킬 수 있으며, 토양환경에 상당한 영향을 미쳐, 생태계에 직접적인 영향을 줄 수 있다. 선행 연구 이정석 등(2008)에 따르면, CO<sub>2</sub>가 해양유출에 따라서 농도변화가 발생 시 성계의 수정에 심각한 영향을 주게 되어, CO<sub>2</sub> 농도가 550ppm이 되었을 경우 수정률(fertilization rate)이 380ppm 대비 약 40%로 나타났다. 화산활동에 의해서 지하수에 함유된 이산화탄소가 대기 중으로 확산된 경우가 이탈리아에서

발생하였는데 이 경우 약 100~430t의 CO<sub>2</sub>가 하루에 유출되었고, 동물과 식물이 치사수준까지 영향을 주었다. 이태리의 포지오 델루리보에서는 약 평균 200t의 이산화탄소가 하루에 누출되어 적어도 10명이상의 사망자가 지난 20년간 있었던 것으로 보고되었다. (IPCC, 2005)

이산화탄소가 자연적으로 저장되어있는 지질학적 구조에서는 이산화탄소 포집 및 지중저장 사업의 추진과정에서 과다하게 강조되었던 안전함을 위협하는 사건이 과거에 다수 발생하고 있다.

카메룬(1986년)의 Nyos 호수에서 화산활동으로 야기된 호수 내 이산화탄소의 대규모 누출(약 1 km<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>)로 1,700명의 사망자가 발생하였다.

Table 1에서 보는 바와 같이 미국 Clear Lake, CA 의 자연누출 사고는 변성퇴적암의 열분해로 인해 이산화탄소 누출량은 1톤/일 으로 4명의 사상자가 발생하였고, 미국 Yaggy gas storage facility에서 주입된 천연가스에서 CH<sub>4</sub>가 누출되면서 2명의 사상자가 발생하였다.

Table 1. Cases of CO<sub>2</sub> Leakage Accident

발생원	현장상황	누출원인	누출경로	표면누출	누출량	피해정도
변성퇴적암의 열분해로 CO <sub>2</sub> 누출	변성퇴적암층 내 지열에 의한 CO <sub>2</sub> 발생	불명	결합, 균열	Gas Vent, Springs	~ 1ton/일	사상자 4명
주입된 천연가스에서 CH <sub>4</sub> 누출	150~200m 깊이 소금동굴에서 주입된 천연가스	우물 외피의 균열	우물과 갈라진 틈	자유 유동/폐정에서 가스와 물의 분출	알려지지 않음	가스폭발 (사상자 2명, 건물손상)

이와 같이 CCS는 지구온난화의 영향에만 국한 되는 것이 아니라 인간과 생태계에 위협적인 요소로 작용될 수 있다. CCS의 잠재적인 환경 위해 요인은 Table 2에 제시하였듯이 많은 잠재적인 환경 위해 요인이 있으며, 이를 정량화 하여 평가하는 기법의 개발이 필요하다.

Table 2. Potential Environmental Risk Factors in Stage of CCS System

단 계	잠재적인 환경위해 요인
포 집	- 포집과정에서 SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> , 고상폐기물 등의 환경배출 - 포집 플랜트에 보관된 고압 CO <sub>2</sub> 의 누출에 의한 주변 환경, 작업장 피해
이 송	- CO <sub>2</sub> 의 대기 중 누출에 의한 온실가스 감축 효과 상실(지구적 규모) - 파이프라인 건설에 의한 자연.경관 파괴 - CO <sub>2</sub> 누출에 의한 지역주민, 환경*에 대한 영향 * 동식물의 질식, 토양, 지표.지하수의 산성화 등
저 장	- CO <sub>2</sub> 의 대기 중 누출에 의한 온실가스 감축 효과 상실(지구적 규모) - 지상의 고압 CO <sub>2</sub> 시설물 누출에 의한 주변 환경*, 작업장 피해 * 동식물 질식, 생태계 영향, 토양, 지표.지하수의 산성화 등 - 지하 저장된 CO <sub>2</sub> 스트림 내 불순물(중금속 등)에 의한 오염 - 지하 저장된 CO <sub>2</sub> 에 의한 지상용기, 지하수 이동(염수에 의한 대체), 지진 등 물리적 영향

### 3.2 위해성 평가

CCS를 전과정평가 기법을 활용하여 평가하기 위해 생태계 및 인체의 위해성 평가 기법을 살펴본다. 네덜란드에서 개발한 ConsExpo 4.0 (J.E. Delmaar, 2005)은 RIVM(National Institute for Public health and the Environment)에서 소비재 제품을 사용하는 일반인을 대상으로 인체노출평가를 주된 목적으로, 제품의 사용 및 사용 후 단계에서 발생하는 노출에 대해 평가하는 “ConsExpo 4.0”이 있으며 노출평가 수준은 접촉이 이루어지는 공간과 제품의 사용패턴과 같은 팩터들에 의해서 결정된다. 노출평가는 함유화학물질의 배출과 환경 잔류물질의 다른 매체의 이동으로 시작되며, 배출과 이동은 제품 사용 및 사용 후 단계의 제품 함유물질의 농도-시간 특성에 의해 결정된다. “ConsExpo 4.0”는 ‘external’ 과 ‘internal’ 노출을 구분하며 ‘external’ 노출의 경우는 몸의 외벽에(피부, 폐, 위장벽) 접촉되는 경우를 말하며, ‘internal’ 노출은 섭취에 의한 인체 노출을 의미한다. 노출평가는 호흡노출경로, 피부접촉 경로, 경구경로 노출평가로 이루어져 있다. 피부접촉 경로에 의한 노출평가 시 필수적인 파라미터는 화학물질의 무게비(총 제품 사용량에 대한 대상 화학물질의 무게비), 제품사용량(피부에 접촉되는 총 제품 사용량)이다.

HERA(Human & Environmental Risk Assessment, 2005)는 비누세제유제 제품협회와 유럽화학산업 위원회에서 함께 1999년에 시작한 것으로 가정용세제에 의한 사용단계 및 폐기단계에서의 인체 및 환경 위해성을 평가한 것이다. 가정용 세제 성분에 대한 제조 및 유통 과정 이후 제품의 사용단계부터 하수처리장, 하천, 농경지, 바다 등 환경으로 폐기되는 시점까지를 경계로 설정하고 있다. HERA의 생태계 위해성 평가는 화학물질의 이동에 대한 시나리오를 토대로 각 권역별로 화학물질의 이동에 따른 예상농도인 PEC<sup>1)</sup>(Predicted Effect Concentration)값을 결정한 후에 각 권역별로 조사된 화학물질별 PNEC<sup>2)</sup>(Predicted No-Effect Concentration) 값으로 PEC값을 나눠 위해도를 산출한다. 생태계 독성의 경우 PEC/PNEC값이 1 이하의 값을 가질 경우 환경위해성은 없는 것으로 평가 할 수 있다.

EUSES(European Union System for the Evaluation of Substances)는 인간과 환경에 영향을 주는 물질과 영향을 줄 것으로 예상되는 신화학물질에 대한 정량적인 평가를 위해 개발된 시스템이다. EUSES에서 인간에 대한 위해성 평가는 소비자, 환경을 통해 간접적으로 노출되는 인간집단을 대상으로 하며 환경에 대한 위해성평가에는 하수처리장 미생물, 수계, 토양, 침전물, 기타 최종 포식자가 포함된다.(J.P.A. Lijzen and M.G.J. Rikken, 2004)

LIME(Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling)은 피해 산정형 환경영향평가 방법으로 일본에서 개발되었다. LIME에서는 보호대상의 상위개념으로 ‘인간’과 ‘생태계’를 인간과 생태계의 생존원을 대요하는 항목으로 ‘인간건강’과 ‘생물다양성’을, 그리고 인간 건강과 생물 다양성의 존속을 위한 필수 불가결한 항목으로 ‘사회자산’과 ‘일차 생산’을 보호 대상으로 선정하고 있다. 생물 다양성은 생물 멸종 리스크를 정량화하여 고려 항목으로는 관속식물 및 수상식물의 멸종으로 정하고 있다. (Yutaka Genchi, 2006)

1) PEC(Predicted Effect Concentration) : 예측환경농도

2) PNEC(Predicted No-Effect Concentration) : 환경 무영향농도

### 3.3 전과정평가

전과정평가(Life cycle assessments; LCA)는 목적 및 범위 설정, 목록분석, 영향평가, 결과해석의 4단계와 보고 및 검토로 구성된다(ISO 14040, 2006). 목적 및 범위정의단계에서는 목적정의, 기능(Function)의 선택, 기능단위(Functional Unit), 기준흐름(Reference flow), 초기 시스템 경계설정, 데이터 품질요건, 영향의 종류 및 영향평가 방법론 정의 등이 있다.

전과정 목록분석에서는 선정된 시스템을 대상으로 해당 시스템에 투입되는 에너지 및 원료 그리고 배출되는 제품, 부산물, 오염물질 등의 종류와 양을 파악하여 정량화하는 과정이다.

전과정 영향평가는 목록분석에서 얻어진 에너지 및 자원소요량과 배출물이 환경에 미치는 잠재적인 영향을 기술적, 정량적, 그리고 경우에 따라서는 정성적으로 파악하고 평가하는 단계이다. 분류화, 특성화, 정규화, 가중치부여 단계를 거쳐 환경으로의 영향을 평가한다.

전과정 해석은 전과정 목록분석과 전과정 영향평가 단계의 결과를 기초로 한 주요 이슈의 규명하는 단계로 완전성, 민감도, 일관성 검사들을 고려하는 평가와 연구의 목적 및 범위에 부합하도록 결과를 제시한다.

Table 3. Calculation Equation for Environmental Impact Index

$E \cdot I = \sum (LCI \text{ result} \times C_i \times 1/N_i \times W_i)$
$W_i = N_i/T_i \times f_i$
$C_i$ : 특성화 인자
$N_i$ : 정규화 인자
$N_i/T_i$ : 저감계수
$f_i$ : Relative Significance Factor
$W_i$ : 가중치 인자

본 연구에서 전과정평가 기법을 활용하여 CCS의 환경영향을 평가하고자 하였으며, 그 방법을 제시하였다. CO<sub>2</sub>의 포집 및 수송과정에서 누출, 발생하는 CO<sub>2</sub>는 지구온난화에 영향을 주는 반면, 지중 및 해양에 저장된 CO<sub>2</sub>의 누출은 생태계의 독성인자로 작용할 수 있는 점을 고려하였다.

## 4. CCS에서의 LCA기법 연구

본 연구에서는 지중 및 해양에 저장되는 이산화탄소를 지구온난화의 문제가 아닌 누출 시 발생할 수 있는 생태독성인자로 분류하여 LCA 기법의 특성화 부분을 연구하였다.

이산화탄소는 대기 중에 존재하며 인체나, 생태계에 무해한 물질이나, 해양 및 지중에 고농도와 대량으로 저장된 후 누출에 의한 피해는 토양 및 해양환경의 pH 증가로 산성화를 유발하며, 생태계의 영향을 주게 된다. 이러한 토양 및 해양의 산성화는 토양미생물 및 해양생태계 생물에 독성으로 작용 될 수 있으며 CCS의 전과정평가는 이산화탄소를 생태독성 영향인자로 구분되어져 평가해야 할 것이다.

전과정평가의 특성화 과정은 두 부분으로 나누어지는데 하나는 목록항목이 영향범주에 미치는 영향의 크기를 정량화하는 단계이고, 다른 하나는 특정 영향범주에 속하는 모든 목록항목들의 영향을 합산하는 단계이다. 이것을 수식으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다. 목록항목 j가 영향범주 i에 미치는 영향의 크기를  $CI_{i,j}$ 라 정의하면,

$$CI_{i,j} = Load_j \cdot eqv_{i,j} \quad \dots\dots\dots\text{Equation 1.}$$

여기서,  $Load_j$  = jth 목록항목 환경부하량, g/f.u.,

f.u. = functional unit, 기능단위,

$eqv_{i,j}$  = i라는 영향범주에 속한 jth 목록항목의 특성화 계수 값  
(Equivalency factor), g-eq/g.

특정 영향범주 i로 분류된 모든 목록항목들이 소속된 영향범주에 미치는 영향의 크기( $CI_i$ )는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$CI_i = \sum_j CI_{i,j} = \sum_j (Load_j \cdot eqv_{i,j}) \dots\dots\dots\text{Equation 2.}$$

이산화탄소가 생태독성에 영향을 미치는 정도를 파악하기 위해서는 이산화탄소가 어떤 경로를 거쳐서 각 생태계 구성 종(species)에 얼마만큼 노출되는가를 파악해야 한다. 즉, 각 물질별의 fate 및 intermedia transport를 고려해야 하며, 노출된 양이 각 종(species)에 어떠한 영향을 미치는가를 정량화해야 한다.

본 연구에서는 mid-point 접근 방식으로 최초배출로부터 생태계에 미치는 효과(effect)까지를 고려하였다.

생태수계독성의 경우 MTC<sup>3)</sup>(Maximun Tolerable Concentrations)는 어류, 갑각류, 조류의 급성독성, Quantitative Structure Activity Relationship(QSAR)<sup>4)</sup> estimate, 즉 실험을 통해 구해진 LD50<sup>5)</sup>, EC50<sup>6)</sup>이나 분자의 구조를 통해 예측된 급성독성 또는 만성독성(무관찰작용량 No Observed Effect Level ; NOEL<sup>7)</sup>)을 통해 결정된다. 그러나 일반적인 경우 만성독성에 대한 데이터를 구하기는 대단히 힘들기 때문에 급성독성자료를 중심으로 산정하는 것이 보통이다. 급성독성자료를 사용할 경우 어류, 갑각류, 조류의 독성자료 중 가장 낮은 값을 선택하고 여기에 자료의 수에 따라 0.01 또는 0.001의 Safety factor를 곱하여 MTC를 산정한다. 생태수계독성의 특성화 계수는 다음과 같이 정의되어진다.

---

3) MTC(Maximun Tolerable Concentrations) 최대 허용가능 농도  
 4) Quantitative Structure Activity Relationship(QSAR) 정량적 구조활성 상관관계  
 5) LD50(lethal dose for 50 percent kill) 반수 치사량 : 일정한 조건하에서 시험동물의 50%를 사망시키는 물질의 양  
 6) EC50(Effective concentration of 50% ) 대상 생물의 50%에 측정 가능할 정도의 유해한 영향을 주는 물질의 유효농도  
 7) NOEL(No Observed Effect Level)만성독성 검사에서 구해지는 주요지표로 투여 전 기간(90일~2년)에 걸쳐 작용이 관찰되지 않는 용량



$$ECA = X_a \times E_a = \frac{1}{MTC_{EPA}} \quad \dots\dots\dots \text{Equation 3.}$$

여기서,  $X_a$  : Exposure factor(set to 1),

$E_a$  : Effect factor(=1/MTC).

생태독성의 특성화 계수는 Risk Chacterization Ratios(RCR<sup>8)</sup>)와 가중치가 부여된 weighted RCR을 토대로 계산되어지고 있다.

$$RCR_{x,c,e} = \frac{PEC_{x,c,e}}{PNEC_{x,c}} \quad < \text{수계} > \quad \dots\dots\dots \text{Equation 4.}$$

여기서,  $RCR_{x,c,e}$  : x물질이 e계로 배출후 c계(수계)에 미치는 위험특성비

$PEC_{x,c,e}$  : x물질이 e계로 배출후 c계(수계)에 미치는 예상  
환경농도(kg.m<sup>3</sup>)

$PNEC_{x,c}$  : c계에 대한 x물질의 만성독성(kg.m<sup>3</sup>)

$$\text{Weighted RCR}_{i,x,e} = \sum_{c/s=1}^{c/s=n} RCR_{i,x,e,c/s} * W_{i,c/s} \quad \dots\dots\dots \text{Equation 5.}$$

여기서,  $\text{Weighted RCR}_{i,x,e}$  : x물질이 e계로 배출후 가중치가 부여된 영향 범주 i의 위험  
특성비(m<sup>3</sup> 또는 kg)

$RCR_{i,x,e,c/s}$  : x물질이 e계로 배출후 c계 또는 s지역적 범위에서의 영향 범주  
i의 위험 특성비

$W_{i,c/s}$  : c계 또는 s지역적 범위에서의 가중치 인자(m<sup>3</sup> 또는 kg)

독성물질에 대한 각각의 영향범주에 관한 특성화 계수 값은 RCR과 weighted RCR을 이용하여 kg 독성물질 당 kg reference 물질의 비로 나타내어지며 아래의 식과 같이 표현되어진다.

따라서 이산화탄소의 영향을 분석하기 위해 해양 및 토양미생물 등 생태계에 미치는 영향을 실험을 통해 정량화함으로써 새롭게 CCS에 LCA 기법을 적용할 수 있을 것이다.

$$AETP_{fresh,x,i} = \frac{RCR_{fresh,x,i}}{RCR_{fresh,1,4DCB, fw}} \quad \dots\dots\dots \text{Equation 6.}$$

여기서,  $AETP_{fresh,x,i}$  : x물질이 i로 배출후 수계의 생태 독성 인자  
(1,4-dichlorobenzene(DCB) equivalents)

$RCR_{fresh,x,i}$  : x물질이 i계로 배출 후 수계의 위험특성비

$RCR_{fresh,1,4DCB, fw}$  : 1.4-DCB 가 수계로 배출 후 수계의 위험특성비

CCS가 지중저장 및 해양저장시 누출로 인해 기존의 배경농도 보다 많은 양의 이산화탄소가 누출 되었을 때의 영향을 고려한 weignted RCR의 계수개발을 통해 CCS의 전과정평가를 수행할 수 있다.

8) Risk Chacterization Ratios(RCR) : 위해도 결정

## 5. CCS의 LCA 활용 가능성

CCS의 누출은 토양 및 지중, 해양의 CO<sub>2</sub> 농도를 증가시키고, 특히 해수중의 CO<sub>2</sub>농도 증가는 화학적으로 수소이온(H<sup>+</sup>)의 농도를 증가시켜, 탄산염(CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)의 농도를 감소시키게 된다.(Feely et al 2004, Gattuso & Buddemeier 2000) 자연적인 해수(35psu (Practical Salinity Units: psu, 해수 1kg중에 녹아있는 용존물질의 g 질량비))의 pH 범위는 대부분 7.8-8.2 정도이며, 일반적인 호기성 환경의 해수 pH가 7.6 이하로 내려가는 경우는 매우 드물다(Knutzen[1981]; Orr et al.[2005]). 해수의 인위적인 pH 감소에 따른 생물학적 영향에 대해서 Table 4에 정리하였다. 조류(algae)의 경우 실험초기 pH가 6.0~6.7 범위일 때 광합성 저해 등 독성영향이 나타나고 있다. 이때패류인 *pinctata fuscala*에 대한 20일간의 실험에서는 초기 pH가 7.4~7.7 이하일 때 성장, 생존에 대한 저해가 나타나는 것으로 보고되고 있어 일부 민감종은 매우 적은 pH변화에 의해서도 생리적 저해가 일어날 수 있다.(Knutzen[1981])

Table 4. Effect of decreased pH on marine organisms

Organisms	Species	pH	End point	References (see Knutzen[1981] for detailed citation)
Bacteria	<i>Aerobic heterotrophs</i>	6.5	50% reduced growth	Zobell[1941]
Macroalgae	<i>Ulva lactuca</i>	<6.0 - 6.5	Died within 5 days	Hampson[1967]
	<i>Palmaria palmata</i>	<6.5	Reduced photosynthesis	Robbins[1977]
	<i>Chondrus crispus</i>	6.6	Reduced growth	Simpson <i>et al.</i> [1978]
Coccolithoporid	<i>Coccolithus(Emiliana) huxleyi</i>	<6.0	No calcification	Paasche[1964]
		<6.7	Reduced photosynthesis	
Diatom	<i>Thalassiosira pseudonana</i>	7.7	Increased Cu toxicity	Sunda & Guillard[1976]
		<6.4 / <7.0	Reduced growth	Bachrach & Luccicard[1932]
Dinoflagellates	<i>Prorocentrum micans</i>	<6.0 / <7.0	No growth with start pH 6.0 (pH increased to 7.0 during tests)	Barker[1935]
Clam	<i>Mercenaria mercenaria</i>	<6.7 - 7.0	Reduced egg development	Calabrese & Davis[1966]
Oysters	<i>Crassostrea virginica</i>	<6.3 - 6.5	Reduced survival of larvae	
		<6.8	Reduced growth of larvae	
Pearl oyster	<i>Pinctata fuscala</i>	7.4 / 7.7	Dead, reduced growth of larvae	Kuwatani & Nishii[1969]
Oysters	<i>Ostrea virginica</i>	<6.5 / 6.8-7.0	Reduced pumping frequency	Loosanoff & Tommers[1947]
Mussel	<i>Mytilus edulis</i>	<7.0	Increased heart beat rate	Schlieper[1955]
Crustacean	<i>Acartia tonsa</i>	<6.7	Increased death rate	Rose <i>et al.</i> [1977]

대표적인 해양성 발광미생물은 *Vibrio fischeri*와 저서단각류인 *Monocorophium acherusicum*에 대한 고농도의 CO<sub>2</sub>의 급성독성영향평가가 따르면, 저서단각류에 대한 CO<sub>2</sub> 노출평가 결과 pH 5.11 이하에서 모든 개체가 사망하였고, pH 6.4에서(pCO<sub>2</sub>로는 3.5kPa)이하에서 사망률이 크게 증가하였다. 그 결과 저서단각류의 EC50는 pH 6.2(pCO<sub>2</sub>로는 6.1)이다. 즉 이러한 실험을 통해 구해진 LD50, EC50을 바탕으로 LCA 생태독성 특성화 인자값으로 변화시킬 수 있으며, CO<sub>2</sub>의 독성실험 및 연구를 통해 CCS의 전과정평가를 수행할 수 있다.

전과정평가 기법에서 생태독성의 특성화인자인 1,4-dichlorobenzene(DCB)로 이산화탄소의 생태독성 등가량(equivalents)으로 환산함으로써 CCS의 LCA평가는 보다 쉽게 수행되어질 수 있을 것이다.

## 6. 결론

CCS의 정량적 환경영향을 평가하고, 친환경적인 CCS의 기술도입을 위해 LCA 방법론을 적용시켰다. CCS를 LCA평가를 하기 위해 CO<sub>2</sub>가 이동경로를 고려하였으며, CCS를 통해 CO<sub>2</sub>를 지중 및 해양에 저장함으로써 지구온난화의 회피효과로 작용 되어질 수 있지만, 저장된 CO<sub>2</sub>의 누출은 생태계 측면에서 독성물질로 작용될 수 있다. 이러한 관점에서 이산화탄소의 영향을 생태계에 미치는 영향(독성)으로 분류하여 CCS의 새로운 전과정평가 기법을 연구하였다.

본 연구에서 제시하는 기법을 적용하기 위해서는 실험을 통한 기초 데이터 생성이 반드시 필요하다. 그러나 토양, 육상지중, 해양지중 등 다양한 매체와 생태계속에서 이산화탄소가 생태계에 미치는 영향을 실험하고 연구하는 것은 매우 어려운 일이다. 그러나 CCS 기술발전과 함께 CCS의 환경영향평가 기술 개발도 중요한 과제이다. CCS의 발전은 지구온난화 및 기후변화에 미치는 영향뿐만 아니라, 토양생태계, 해양, 수생태계에 미치는 영향을 동시에 연구함으로써 CCS의 신뢰성이 높아질 것이다. 본 연구에서 제시한 CCS의 전과정평가 적용 연구가 앞으로 더욱 다양한 영향평가, 영향예측 연구에 도움이 되길 기대한다.

## 7. 사사

본 연구는 환경부의 “이산화탄소 저장 환경관리기술개발사업(RE201402033)”의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 8. 참고문헌

- 1) 환경부, ‘전과정평가 기법을 적용한 전과정위해성평가 방법론 표준화 및 관련 데이터베이스 구축’. 친환경상품진흥원 (2007).
- 2) 이정석, 이규태 ‘해수중 용존 CO<sub>2</sub> 농도 증가가 해양생물 및 해양생태계에 미치는 영향: 국내사례 연구’ 한국해양환경공학회지 Vol9, No4 pp243-255 (2006).
- 3) 한국환경정책평가연구원, 신용승, 배경은 “유해화학물질 함유 제품의 소비자 노출기법 적용방안” (2006).

- 4) Knutzen, J. 1981 "Effect of decreased pH on marine organisms" *Mar. Pollut. Bull.*, 12, pp25-29
- 5) J.E. Delmaar, M.V.D.Z. Park, J.G.M. van Engelen "ConsExpo 4.0 Consumer Exposure and Uptake Models Program Manual" (2005).
- 6) "Human & Environmental Risk Assessment on Ingredients of Household Cleaning Products" Guidance Document Methodology (2005).
- 7) J.P.A. Lijzen and M.G.J. Rikken (eds.) "European Union System for the Evaluation of Substances Background report" Bilthoven, January (2004).
- 8) Yutaka Genchi "LIME: Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling" Tsukuba, Japan (2006).
- 9) IPCC, "IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage", pp15-61 (2005).
- 10) IEA, "Technology Roadmap Carbon Capture and Storage", pp27-35 (2009).
- 11) Orr, J.C. Fabry, V.J. and Aumont, O.A. "Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms, *Science*, 437, pp681-686 (2005).
- 12) IPCC, "IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage", Cambridge University Press, Cambridge, U.K., pp431, (2005).
- 13) Gattuso, J.P. and Buddemeier, R.W., "Calcification and CO<sub>2</sub>", *Science*, 407, pp311-312, (2000).
- 14) Feely, R.A., Sabine, C.L., Lee, K., Berelson, W., Kleyas, J., Fabry, V.J. and Millero, F.J. "Impact of anthropogenic CO<sub>2</sub> on the CaCO<sub>3</sub> system in the oceans", *Science*, 305, pp362-366 (2004).