

# 이산화탄소 포집, 수송 및 저장(CCS;Carbon Capture and Storage)의 전과정평가(LCA;Life Cycle Assessment) 및 전과정비용평가(LCC;Life Cycle Costing)에 대한 연구

강 현<sup>1</sup>, 박기학<sup>1</sup>, 황윤빈<sup>1</sup>, 김준범<sup>2</sup>

<sup>1</sup>수원대학교 환경공학과

<sup>2</sup>캘리포니아 산타바바라 대학

Research about the management of CCS control with specific consideration of Life Cycle

Hun Kang<sup>1</sup>, Ki Hak Park<sup>1</sup>, Yun Bin Hwang<sup>1</sup>, Jun Beum Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Environmental energy Engineering, Suwon University

<sup>2</sup>University of California, Santa Barbara, Bren School of Environmental Science and Management

## Abstract

이산화탄소 포집, 수송 및 저장(CCS)은 대량의 발생원으로부터 발생하는 이산화탄소를 포집 및 압축하고 적절한 지하장소에 주입하여 이를 격리시키는 기술이다. CCS는 온실가스 감축에 크게 기여할 수 있는 기술이며, 현재 세계적으로 많은 프로젝트들이 상용화되고 있다. 현재 우리나라에서는 CCS 포집단계를 중점적으로 연구되어지고 있다. 본 연구에서는 포집, 수송, 저장단계에서의 전과정평가를 통해 CCS 인프라구축에 대한 환경영향을 분석하고, 연구결과를 사례에 적용하여 지구온난화 회피효과를 분석하였다. 본 연구에 적용된 기능단위는 CCS 1ton, 기준흐름은 CO<sub>2</sub> 1ton으로 전과정 영향평가 결과 포집(2.99E-04Pt), 저장(7.80E-01Pt), 수송(1.59E+04Pt)의 환경영향이 분석되었다. 500MW 유연탄 화력발전소에서 CCS 도입을 통해 약 2.9백만톤 CO<sub>2</sub>-eq의 지구온난화 회피효과가 나타나는 것으로 분석되었다. 또한 CCS 도입시 예상되는 비용은 10.45억 US\$, 운영비는 연간 1.54~2.67억 US\$로 추정하고 있으며, 이에 대한 LCC 분석 결과 20년간 총 비용의 현재가치는 42.36억 US\$로 분석되었다. 향후 CCS 보급을 위해 각 단계(포집, 수송, 저장)별 환경영향의 정량화와 비용분석의 D/B가 지속적으로 구축되어야 할 것이다.

Carbon capture and storage (CCS) is a technique for trapping CO<sub>2</sub> as it is emitted from large point sources, compressing it, and transporting it to a suitable storage site where it is injected into the ground. CCS system can attribute to the reduction of CO<sub>2</sub> and currently many projects in the world are commercializing. In South Korea, many researches are concentrated upon the CO<sub>2</sub> capture processes in CCS system. In this study, we evaluated environmental impact of CCS infrastructure system, which has CO<sub>2</sub> capture, transportation and storage stage using life cycle assessment (LCA). Also we assessed the costs for each CCS stage operation with scenarios. As a result, the global warming impact in a system without CO<sub>2</sub> capture process was 9.64E+04g CO<sub>2</sub>-eq and a system with CO<sub>2</sub> capture process had 1.45E+05g

CO<sub>2</sub>-eq. About 1,368 kJ/ton CO<sub>2</sub> energy is required for CO<sub>2</sub> capture and it could remove 90% of occurred total CO<sub>2</sub> from electricity generation.

The result of life cycle cost analysis shows that the cost of 500MW size electricity generation and CCS system is 1,045 million US dollar and the operation cost per year is 154~267 million US dollar. As a result of the life cycle costing, current value of 20 years total cost is 4,236 million US dollar. For the future dissemination of CCS system, the database of the quantified environmental impacts and cost analysis in each stage (capture, transport and storage) should be updated and constructed regularly.

**Keywords** : Carbon dioxide(이산화탄소), Carbon dioxide Capture and Storage(CCS, 이산화탄소 포집 및 저장), Life Cycle Assessment(LCA, 전과정평가), Life Cycle Costing(LCC, 전과정비용분석)

## 1. 서론

### 1.1 연구 배경

현재 전 세계적으로 이산화탄소의 배출을 줄이기 다양한 기술을 개발은 물론, 제도적으로 많은 체계를 구축하고 있는 상황이다. EU의 경우 2020년까지 1990년대비 20% 감축계획을 제시하였으며, 자동차 온실가스 배출규제 등을 도입하였고, 일본의 경우는 2020년까지 2005년대비 15% 감축 목표를 설정하고 있다. 이에 국내에서는 저탄소녹색성장기본법을 중심으로 온실가스·에너지 목표 관리제를 시행하고 있다. 국내의 온실가스 감축 목표는 2020년까지 국가온실가스 배출량을 30% 감축(BAU ; Business as usual )을 목표로 위해서 신재생에너지 개발, 에너지 절약 및 효율 증대와 같은 노력을 기울이고 있다. 또한 온실가스의 감축하기 위한 현실적 대안으로 CCS(Carbon dioxide Capture and Storage)기술을 도입하고 있으며 2020년까지 100만톤급 포집 수송 저장 통합 실증완료계획과 함께 2030년까지 이산화탄소 32백만톤을 CCS 기술로 감축(국가 온실가스 배출량의 10%)하는 계획을 제시하고 세계 CCS 기술강국으로의 도약을 추진하고 있다. 세계적으로 CCS의 기술로 온실가스 감축량의 19%를 차지할 것으로 전망하고(IEA 2010) 있으며 이에 따라 이산화탄소 포집 및 저장을 위한 기술개발도 활발히 진행되고 있다.

### 1.2 CCS기술 개발의 노력

이산화탄소 포집 및 저장(CCS)은 대량의 발생원으로부터 발생하는 이산화탄소를 포집 및 압축하여 적절한 지하장소에 주입하여 이를 격리시키는 기술이다.

CCS 기술은 이미 1996년부터 미국과 캐나다, 유럽연합을 비롯한 선진국에서 석유 및 천연가스 개발사업과 연계하여 활발히 개발 및 적용이 이루어지고 있다. 대기 중 이산화탄소를 제거하는데 있어서 현재까지는 이산화탄소 지중저장이 과학 또는 기술적 측면에서 가장 효과적일 뿐만 아니라 경제 또는 산업적 측면에서도 가장 우수한 것으로 평가되고 있다. 또한 이산화탄소 지중저장이 석유 및 천연가스 회수(Enhanced Oil and Gas Recovery, EOR or EGR)와 석탄층 메탄가스 회수(Enhanced Coal Bed Methane Recovery, ECBMR)의 부가가치를 증진시켜 실용화하고 있다. 이산화탄소 포집 및 저장 관련 기술은 현재 Pilot 수준에서 실증적인 연구들이 진행되고 있으며, 특히 EOR의 경우 노르웨이 Sleipner에서 Stat Oil에 의해 수행되고 있는 사례가 있다.

영국의 경우 Immingham CCS 프로젝트를 2007년 ConocoPhillips사를 중심으로 시작하였고, 주로 열병합발전에서 발생한 이산화탄소를 액화시켜, 해양지질 구조에 이산화탄소를 주입할 예정이다.

캐나다의 경우 이미 Weyburn 프로젝트를 수행하고 있으며, 향후 앨버타에 사우디의 석유매장량 만큼 존재하는 Sand Oil에서 원유를 추출하는 과정에서 발생하는 이산화탄소를 저감하기 위한 유일한 수단으로 판단하여 상당한 연구개발을 수행하고 있다.

### 1.3 연구 목적

CCS는 온실가스 감축에 크게 기여할 수 있는 기술이며, 현재 이산화탄소의 포집기술에 중점을 두고 연구되어지고 있다. 또한 포집 비용이 CCS의 비용 중 약 80%를 차지하고 있으며 이에 따라 CCS 비용을 줄이기 위한 노력과 연구가 진행되고 있다. 효과적인 CCS가 이루어지기 위해서는 전과정을 고려한 환경영향과 비용적인 측면, 그리고 위해성 등 다양한 측면을 고려한 연구가 계속적으로 수행되어야 할 것이다.

CCS는 추가적인 인프라 구축이 수반되며, 이에 따른 환경오염부하와 비용이 발생하게 된다. 따라서 CCS의 계획단계부터 전과정평가와 전과정비용평가의 선행적인 연구와 예측이 CCS의 환경·비용 효율성을 극대화 시킬 수 있을 것이다.

현재 국내에서 이산화탄소를 지중 및 해양에 저장하여 온실가스를 저감한 사례는 없으며 포집기술에만 실험적으로 이루어지고 있는 현실이다. 따라서 본 연구는 선행연구의 검토와 문헌을 바탕으로 이산화탄소 1ton을 포집, 수송, 저장하는데 필요한 인프라 시설 및 운영에 소비되는 에너지 등을 고려하여 전과정평가를 수행하였으며, 이에 따른 운영비용에 대한 전과정 비용분석을 예측하였다.

본 연구의 목적은 이산화탄소의 포집, 수송, 저장에 이르는 각 단계의 전과정평가와 이에 따른 비용분석을 예측을 통해 CCS의 환경·비용 효과적인 포집기술과 수송, 저장기술을 분석함으로써 향후 경쟁력있는 CCS의 보급에 기여하고자 하는데 목적이 있다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 이산화탄소 포집 및 저장(CCS)

CCS는 이산화탄소를 직접적으로 감축할 수 있는 종합적인 기술로서 기존의 고농도 이산화탄소 대량 배출원(화석연료 연소 산업, 천연가스 정제, 시멘트 제조공정, 에탄올 생산)에서 발생하는 이산화탄소를 포집하고, 포집된 이산화탄소를 압축, 수송하여 지중 및 해양 퇴적 암반층에 안전하게 저장하고 장기 모니터링 하는 기술을 총칭한다. 전체 CCS 과정의 70~80% 비용을 차지하는 포집 단계에서는 배출가스에서 이산화탄소를 분리하는 공정의 연구가 활발하다. 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.[2]

### 2.2 CCS의 핵심 기술, 이산화탄소 포집

이산화탄소 포집 기술을 살펴보면 크게 연소 후 포집, 연소 전 포집, 순산소 연소의 3가지 방법이 개발되고 있다(Fig. 1 참조). 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.

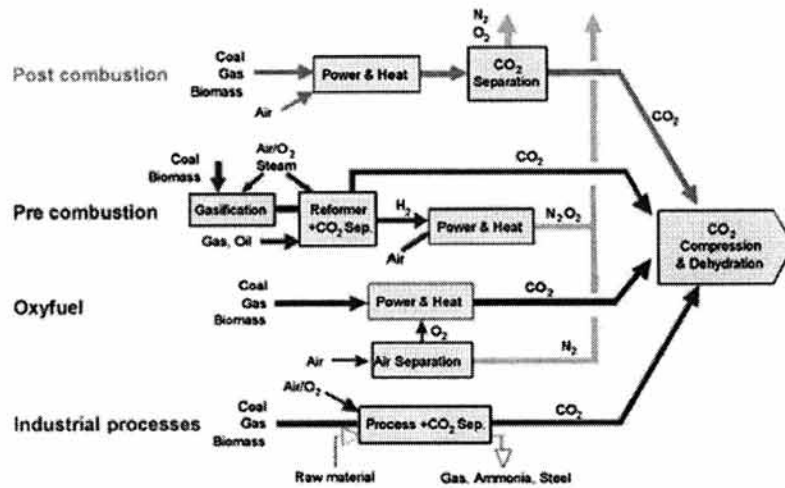


Fig. 1. Overview of CO<sub>2</sub> Capture processes and systems [1]

### 2.3 운송 및 저장의 다양한 방법

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 저장시 운송거리, 기온, 이산화탄소 운송량 및 압력과 같은 다양한 변수를 고려해야 한다.

일반적으로 1,000 km 내에서는 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.

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 1,000m 깊이의 대염수층(1), 석유 가스층(2), 석탄층(3) 등이 있다(Fig. 2 참조). IPCC에 따르면 대염수층의 잠재 저장 능력은 1,000 GtCO<sub>2</sub>(Giga ton CO<sub>2</sub>)로 2005년 글로벌 연간 이산화탄소 배출량 7 Gton CO<sub>2</sub>에 비교하였을 때 충분한 것으로 평가되고 있다.[1]

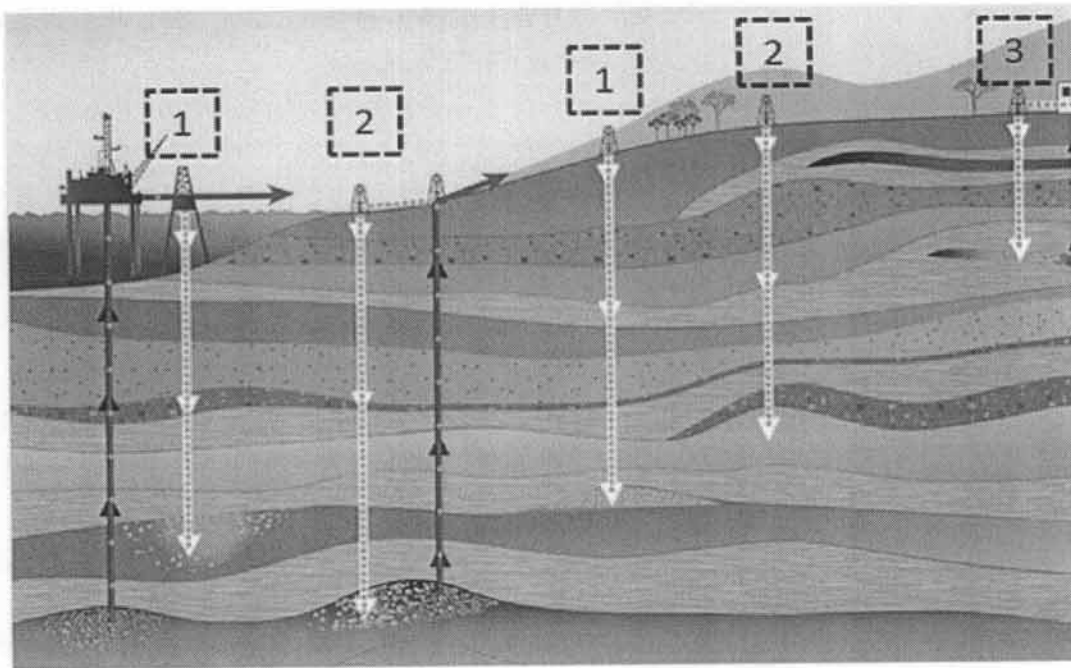


Fig. 2. Overview of geological storage options [1]

### 3. 연구 방법

본 연구는 CCS의 단계별로 포집, 수송, 저장에 관한 인프라시설 구성 시 발생하는 환경영향 전과정평가 평가으로 분석하였으며, 국내 전과정평가 영향평가 방법론을 적용하여 8가지 환경영향 범주로 분석하여 나타내었다.. 본 연구에 적용된 CCS의 인프라시설 투입물은 지리적(국가 및 지역) 위치에 따라 각각 달리 적용될 수 있으며, 또한 주입 시 이산화탄소의 압력 등에 따라 투입에너지 등이 달라질 수 있다. CCS의 각 단계별 환경영향을 정량화 및 비교 분석을 통해 현재 국내에서 계획하고 있는 500MW급 화력발전소에서 화석연료의 연소 후 발생하는 배출가스를 포집하는 연소 후 이산화탄소 포집, 수송(200km), 저장(염대수층 1,000m)의 CCS 시나리오를 가정하여 전과정평가를 수행하였다. 또한 전과정비용평가(Life Cycle Cost; LCC)는 현재 계획 중인 예상 투입비용을 고려하여 산출하였으며, 향후 20년간 운전비용을 포함한 전과정 비용들에 대해서 예측하여 보았다.

#### 3.1 목적 및 범위정의

CCS 시스템에서 포집-수송-저장의 단위공정별로 환경영향을 평가하고 CCS 시스템의 환경적 주요이슈를 규명하는데 목적이 있다. 본 연구의 시스템경계는 500MW 석탄발전소로부터 이산화탄소 1ton 포집하여, 200km 파이프라인 수송 후 해양(염대수층) 1,000m에 지중저장으로 설정하였으며 각각 포집, 수송, 저장에 투입되는 인프라 요소의 데이터를 수집·가공하였다. 또한 이산화탄소를 포집할 때 추가적으로 소비되는 에너지 및 저장주입시 투입에너지를 고려하여 전과정평가를 수행하였다. 기능 및 기능단위의 설정에 있어, 기능은 이산화탄소의 해양지중 격리이며, 기능단위는 CCS시스템을 통해서 포집, 수송 및 저장되어지는 이산화탄소 1ton 이다. 본 연구 결과를 바탕으로



로 현재 국내에서 계획하고 있는 500MW급 석탄발전 CCS에 적용하였으며, 이에 따른 비용분석을 수행하였다.

### 3.2 데이터 품질요건

현재 국내에서 CCS 시설을 위한 데이터수집이 불가능 하므로 향후 국내 적용가능한 최신기술 CCS시설의 포집, 수송, 저장 각 단계에서의 문헌 및 자료들[8, 9]을 참고하여 본 연구의 시나리오에 맞게 적용하였으며, 각 단계별로 데이터 수집은 다음과 같다.

포집단계에서의 데이터 수집은 유연탄을 이용한 화력발전소에서의 이산화탄소 포집을 할 경우 추가적으로 투입되는 연료 1TJ의 인프라 요소와 포집시 요구되는 에너지[9]를 고려하여 본 연구의 시나리오에 에너지 환산을 통하여 적용하였으며, 수송단계는 파이프라인 방식에 의한 이산화탄소 수송인프라 구축에 대한 데이터[8]를 활용하였으며, 저장단계에서의 인프라 구축을 위한 데이터[8]와 주입에너지의 데이터를 구축하여 시나리오에 적용하였다.

### 3.3 가정 및 제한사항

CCS의 전과정평가를 수행하기위해 현재 국내에서 계획하고 있는 500MW급 화력발전소에서의 이산화탄소 포집, 수송(200km), 저장(염대수층 1,000m)의 CCS 시나리오를 적용하였다. 화력발전소의 건설 및 운영은 제외하였으며, 전과정평가에 포함된 시스템 경계는 포집설비의 증축부문과 포집시 요구되는 에너지, 수송에 따른 인프라 구축, 저장시 주입에너지와 저장 인프라 구축을 고려하여 분석하였다.

시나리오에 적용된 화력발전소의 연료원은 유연탄을 적용하였으며 500MW급(4.5TJ)을 유연탄 발전에 의한 전력생산으로 이때 발전효율 및 열손실은 없는 것으로 가정하였다. 발열량 및 온실가스 배출량은 IPCC에서 제시하는 값(94,600 kgCO<sub>2</sub>/TJ, 1 kg CH<sub>4</sub>/TJ, 1.5 kgN<sub>2</sub>O/TJ)을 적용하였으며, 이산화탄소 포집율은 문헌[9]을 참고하여 90%를 적용하였다.

포집 및 수송에 대한 유지보수에 사용된 물질은 데이터 확보가 어려워 본 연구에서 제외하였으며, 초기 인프라 구축과 운영 에너지 및 투입물질을 고려하여 분석하였다. CCS의 저장단계에서 변수로 작용될 수 있는 운전압력 및 이산화탄소의 온도, 부피 등은 고려되지 않았다.

## 4. 연구 결과

### 4.1 CCS 단계별 전과정목록분석

CCS 포집, 수송, 저장에 투입되는 물질을 문헌에 근거하여 본 연구에 적용하였다. 포집시 추가적으로 전력에너지가 1,368 KJ이 투입되며 국내전력 1.52E-01 KW로 상위연결하여 전과정평가를 수행하였다.

Table 1. LCI data from CO<sub>2</sub> capturing system [9]

Reference Data				Data for this study (CO <sub>2</sub> 1ton capture)		
Input	단위	Conventional PP without CCS	Conventional PP with CCS	Unit	Input	Upstream DB
Concrete	kg/TJ	3.46E+02	5.54E+02	kg	6.469E+00	레미콘(지식경제부)
Steel	kg/TJ	7.26E+01	1.16E+02	kg	1.357E+00	전기로제강 (지식경제부)
Copper	kg/TJ	2.54E+00	2.54E+00	kg	2.968E-02	구리(ETH T)
Plastic	kg/TJ	1.06E+00	1.06E+00	kg	1.239E-02	LDPE(지식경제부)
Electricity	KJ/ton	-	1.37E+03	KW	1.520E-01	전기(지식경제부)

이산화탄소를 수송하기 위해 소비되는 건설자재 등의 투입물질은 파이프 steel, 에너지(경유) 등이며, Table 2에서 보는 바와 같다. 본 연구에서는 200km 수송을 가정하여 수행하였으며, 목록분석은 1km 수송에 투입되는 물질이다. 문헌연구에서 제시하고 있는 목록분석 중 수송 및 저장부분에 포함된 육로수송 및 철도수송은 본 연구에서 파이프라인 수송을 적용하였으므로 제외하였다.

Table 2. LCI data per km of pipeline assumed in this study [8]

Reference Data			Data for this study (CO <sub>2</sub> 1ton transportation)		
Input	Unit	Input	Unit	Input	Upstream DB
Sand	kg	4.40E+06	ton	4.40E+03	Sand (IDEMAT)
Diesel	MJ	3.31E+06	kg	7.42E+04	경유(환경부)
Steel	kg	2.70E+05	kg	2.70E+05	FE360 (IDEMAT)
Rock Wool	kg	5.12E+03	kg	5.12E+03	Mineral wool ETH T(ETH-ESU96)
Transport, Rolly	tkm	3.15.E+05	-	-	
Transport, Rail	tkm	5.51.E+04	-	-	

이산화탄소 1ton 저장에 따른 목록분석은 Table 3에서 보는바와 같으며, 이산화탄소 1ton을 주입시 전력에너지 6.68KW가 소요된다. 아래의 목록분석을 근거로 지중저장 1000m를 적용하여 전과정평가를 수행하였다.

Table 3. LCI data for CO<sub>2</sub> storage

Reference Data			Data for this study (CO <sub>2</sub> 1ton storage)		
Input	Unit	Input	Unit	Input	Upstream DB
Cement	kg	3.50E+01	kg	3.50E+01	포틀랜드시멘트(지식경제부)
Gravel	kg	3.67E+02	kg	3.67E+02	Gravel(IDEMAT)
electricity	KW	6.68E+00	KW	6.68E+00	전기(지식경제부)
Transport, Rolly	tkm	8.03E+00	-	-	
Transport, Rail	tkm	3.50E+00	-	-	

#### 4.2 CCS 전과정 영향평가

CCS 단계별 전과정 영향평가 결과 수송에 따른 환경영향이 1.59E+04Pt로 가장 높게 나타났으며, 200km 파이프라인 수송 건설시 지구온난화 범주에서 1.14E+11g CO<sub>2</sub>-eq가 발생하는 것으로 분석되었다. 파이프라인 수송에 의한 환경영향은 수송거리에 따라 환경부하가 발생하게 되며, 이산화탄소의 수송흐름의 연속성을 갖게 된다. 본 연구의 적용사례 Table 6에서 제시하였듯이 CO<sub>2</sub> (3.37E+12g CO<sub>2</sub>-eq)를 포집 후 수송 인프라시설 구성시 1.24E+11g CO<sub>2</sub>-eq가 배출된다. 따라서 이산화탄소 1ton의 수송에 의한 지구온난화 발생량은 3.68E-02 ton CO<sub>2</sub>-eq로 나타낼 수 있다. 이와 같은 방법으로 저장단계에서 이산화탄소 1ton 지중저장시 3.53E-03 ton CO<sub>2</sub>-eq의 지구온난화 영향이 나타나게 된다.

포집단계에서는 1ton의 이산화탄소를 포집하기 위해 1.77E+03g CO<sub>2</sub>-eq가 발생하며, 포집단계에서는 9.98E+06g CO<sub>2</sub>-eq의 회피효과를 얻을 수 있다. Table 4는 1ton의 이산화탄소 포집, 수송, 저장의 시나리오 적용에 따른 특성화 결과를 나타낸 것이다.

Table 4. Characterization results of CCS system with scenarios

Impact Category	Unit	Capture	Transportation	Storage
자원고갈	1/yr	7.40E+00	7.08E+08	1.94E+04
지구온난화	g CO <sub>2</sub> -eq	1.77E+03	1.14E+11	6.20E+06
오존층파괴	g CFC-11 eq	2.06E-04	7.95E+02	1.24E-01
광화학산화물생성	g ethylene	2.50E+00	6.58E+07	9.01E+03
산성화	g SO <sub>2</sub> eq	3.16E+00	6.98E+08	3.63E+04
부영양화	g PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq	4.86E-01	6.36E+07	5.38E+03
인간독성	g 1,4-DCBeq	2.61E+01	9.38E+08	4.92E+04
생태독성	g 1,4-DCBeq	3.19E+01	5.45E+08	4.52E+04

단계별 가중치 결과 지구온난화 범주에서 포집단계 9.21E-05Pt, 수송단계 5.94E+03Pt, 저장단계 3.23E-01Pt의 환경영향이 나타나는 것으로 분석되었다.



Table 5. Weighted results of CCS system with scenarios

Impact Category	Weighting Factor	Unit	Capture	Transportation	Storage
자원고갈	9.28E-03	Pt	6.87E-05	6.58E+03	1.81E-01
지구온난화	5.21E-05	Pt	9.21E-05	5.94E+03	3.23E-01
오존층파괴	7.17E+00	Pt	1.48E-06	5.71E+00	8.88E-04
광화학산화물생성	6.31E-03	Pt	1.58E-05	4.15E+02	5.69E-02
산성화	9.05E-04	Pt	2.85E-06	6.31E+02	3.28E-02
부영양화	2.90E-03	Pt	1.41E-06	1.84E+02	1.56E-02
인간독성	7.09E-05	Pt	1.04E-05	3.74E+02	1.96E-02
생태독성	1.33E-01	Pt	1.06E-04	1.81E+03	1.50E-01
합 계		Pt	2.99E-04	1.59E+04	7.80E-01

### 4.3 CCS 연구 결과의 적용

본 연구결과를 적용하여 현재 국내에서 계획하고 있는 500MW급 화력발전소에서의 CCS 설비를 도입하여 얻어지는 지구온난화 회피효과를 분석하였다.

500MW 전력생산을 위해 요구되는 유연탄의 량은 180,722.89kg(24.9MJ/kg)으로 전력(9MJ/KWh) 발열량을 기준으로 적용하였다. 유연탄 180,722.89kg의 발전설비 연소에 발생하는 온실가스는 427.89ton CO<sub>2</sub>-eq로 24시간 365일 운전시 3,748,290ton CO<sub>2</sub>-eq이 발생하게 된다. 이때 포집되는 이산화탄소는 3,373,461ton CO<sub>2</sub>-eq(90% 포집율)이다. 발전소에서 이산화탄소 포집을 하지 않을 경우 3.75E+12 g CO<sub>2</sub>-eq의 지구온난화가 발생하게 되나, 포집하여 지중에 저장함으로써 지구온난화의 회피효과를 얻을 수 있다. 이때 포집된 이산화탄소를 수송, 저장시 발생하는 이산화탄소를 제외한 실질적인 지구온난화 회피효과는 약 2.9백만톤 CO<sub>2</sub>-eq로 분석되었다.

Table 6. Avoided CO<sub>2</sub> from CCS system with scenarios

Impact Category	Unit	Capture	Transportation	Storage
Global warming	g CO <sub>2</sub> -eq	3.75E+12	1.24E+11	1.13E+10
CCS	g CO <sub>2</sub> -eq	3.37E+12	3.37E+12	3.37E+12
Avoid Impact	g CO <sub>2</sub> -eq	2.86E+12*		
* 회피효과 = CCS - 발생량 CCS(3.37E+12)- [포집(3.75E+12-3.37E+12) + 수송(1.24E+11) + 저장(1.13E+10)]				

각 단계별 전과정평가 특성화 결과 포집단계에서 유연탄의 연소에 의해 지구온난화는 3.75E+12g CO<sub>2</sub>-eq으로 분석되었으며, 이때 포집된 CO<sub>2</sub>(3.37E+12g CO<sub>2</sub>-eq)를 수송할 때 1.24E+11g CO<sub>2</sub>-eq가 발생하며, 저장단계에서 1.13E+10g CO<sub>2</sub>-eq가 배출되는 것으로 각각 분석되었다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 이산화탄소 1ton의 포집, 수송, 저장을 통해 0.849 ton CO<sub>2</sub>-eq의 지구온난화 회피효과를 얻을 수 있다.

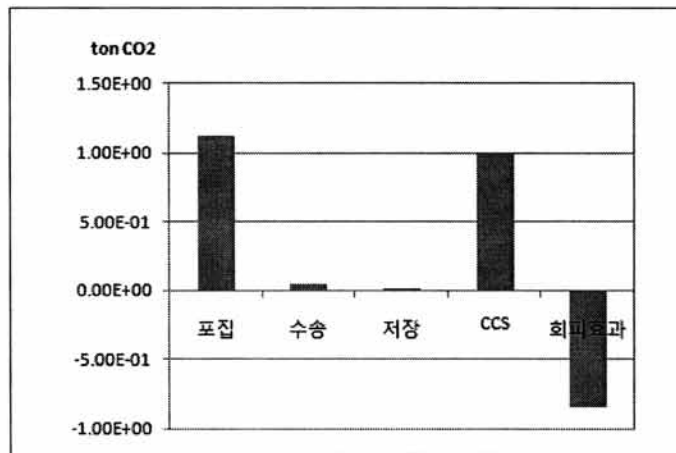


Fig 3. Avoided CO<sub>2</sub> from CCS system with scenarios

4.4 CCS의 비용평가

CCS의 포집, 수송, 저장의 통합시스템의 포집(연소후 포집, 연소전 포집, 순산소 연소)비용은 \$125~150/ton CO<sub>2</sub> 정도이며, 시스템 단계 중 가장 많은 비용이 소요된다. 운송은 파이프라인, 도로, 철도, 선박으로 \$25/ton CO<sub>2</sub>(파이프라인)의 비용이 발생하게 된다. 파이프라인 수송비용은 도관의 길이와 직경에 의존하게 되는데 100km 이내는 \$1~5/ton CO<sub>2</sub>, 수송선을 이용한 먼거리(5,000km)는 \$15~25/ton CO<sub>2</sub>정도이며, 저장비용은 \$5/ton CO<sub>2</sub> 로 알려져 있다. 국내의 경우 포집 이산화탄소의 지중저장의 비용을 예측한 결과 이산화탄소를 포집할 때 \$30~50/ton CO<sub>2</sub>, 저장 할 때 \$0.5~8/ton CO<sub>2</sub>의 비용이 소요되는 것으로 예측하고 있다.

Table 8. Estimated cost for underground storage and mineral carbonation of domestic CO<sub>2</sub> capturing system [6]

	지중저장 (\$/ton CO <sub>2</sub> )	Mineral Carbonation (\$/ton CO <sub>2</sub> )
1. CO <sub>2</sub> Capture	30~50	0~50
2. CO <sub>2</sub> Transportation (Distance)	30~601) (5,000~8,000km)	<5 (100km 내외)
3. CO <sub>2</sub> Storage	0.5~8	50~1002)
4. Monitoring, Measuring, Verification	0.1~0.3	×
5. Mineral Carbonation	×	-α3)
6. Waste treatment	×	-β4)
합계	60~120	55~155(-α-β)

1) Max 5000km based, IPCC : \$30, RITE : \$60  
 2) Mineral Carbonation에 의한 이산화탄소저장(IPCC) : 채광비용 포함, 전처리 및 탄산화 반응조건에 따라 비용차이 큼  
 3) α : 고부가가치의 CaCO<sub>3</sub> 가격이 10~30만원/톤  
 4) β : 산업폐기물 처리에 수반되는 비용(예 : 폐콘크리트 2만원/톤, 석면 30~60만원/톤)

본 연구에 적용된 석탄발전의 경우 해양저장비용은 46~72US\$/ton CO<sub>2</sub>인 반면 지중저장의 경우 41~50US\$/ton CO<sub>2</sub>의 비용이 발생하는 것으로 Table 9에서 보는 바와 같으며, 일반적으로 지중저장이 해양저장에 비해 경제적인 것을 알 수 있다. 포집 및 저장에 관한 구분은 2.2절, 2.3절에 자세히 설명되어있다.

Table 9. Capturing and storing cost for each electricity generation technology [1], [6]

구분	Coal generation	가스복합발전	순산소 연소	IGCC
CCS 비용(해양) ( US\$/ton CO <sub>2</sub> )	46~72	59~84	36~61	25~50
CCS 비용(지중) ( US\$/ton CO <sub>2</sub> )	41~50	54~61	31~39	20~28

호주 ZeroGen 프로젝트의 경우 초기 사업금액은 10억US\$ 이었으나 FutureGen 프로젝트와 마찬가지로 17억US\$까지 늘어난 사례가 있다. 미국의 듀크에너지 630 MW 석탄 IGCC 사업의 경우 2007년 5월 19.85억US\$ 건설비에서 2008년 5월 23.5억US\$로 1년 사이 18.4% 증가된 바가 있다. [11]

국내 500MW급 석탄발전 시설의 경우 6.8억 US\$ 정도의 건설 비용이 소요되며, CCS 도입시 10.45억 US\$의 비용을 예상하고 있다. 석탄발전에 따른 CCS 운영비는 연간 1.54~2.67억 US\$로 추정하고 있으며 이를 20년 운영시 발생하는 비용을 산출하였다. CCS 운영비는 연간 약 350만톤의 이산화탄소를 포집하는 비용으로 톤당 포집비용을 약 40US\$를 적용하였다. 비용산출을 위해 LCC 분석기간은 20년으로 할인율은 실질 사회적 할인율 5.5% (한국개발연구원에서 제시한 적정 실질 사회적 할인율)를 기준으로 산출하였다. 석탄발전에서의 연소후 포집방식으로 CCS의 20년간 총 비용의 현재가치는 42.36억 US\$로 분석되었다. 향후 CCS 포집기술의 발전을 통해 비용절감적인 CCS 기술확보가 연구 되어져야 할 것이며, 또한 이산화탄소의 사회적 비용평가 연구가 지속되어야 할 것이다.

## 5. 결론

본 연구에서 기후변화의 대응을 위한 방안으로 CCS를 전과정평가 방법을 이용하여 환경영향을 정량화 하였다. 현재 CCS는 계속 연구 개발 중이며 전과정의 환경영향과 경제적인 측면을 동시에 고려해야 할 것이다.

CCS 단계별 전과정 영향평가 결과 수송에 따른 환경영향이 1.59E+04Pt로 가장 높게 나타났으며, 포집단계에서 2.99E-04Pt, 저장단계에서 7.80E-01 Pt의 환경부하가 발생하는 것으로 분석되었다. 지구온난화 범주에서 수송단계의 영향이 1.14E+11g CO<sub>2</sub>-eq, 포집단계에서는 1.77E+03 g CO<sub>2</sub>-eq가 발생하며, 저장 단계에서는 6.20E+06g CO<sub>2</sub>-eq으로 나타났다. 500MW 유연탄 화력발전소에 연구결과를 적용시 약 2.9백만톤 CO<sub>2</sub>-eq의 지구온난화 회피효과가 나타나는 것으로 분석되었다.

전과정 비용분석 결과 500MW급 석탄발전과 CCS 도입시 예상되는 비용은 10.45억 US\$, 운영비는 연간 1.54~2.67억 US\$로 추정하고 있으며, 이에 대한 LCC 분석 결과 20년간 총 비용의 현재가치는 42.36억 US\$로 분석되었다.

향후 경쟁력있는 CCS발전을 위해 전과정측면을 고려한 환경평가와 비용평가가 동시에 이루어져야 할 것이다. 또한 친환경적인 CCS의 인프라 시설 구축을 통해 지구온난화의 회피효과를 극대화함으로써 기후변화에 효과적으로 대응할 수 있을 것이다. 향후, CCS의 저장에 따른 지중 및 해양 생태계에 미치는 영향과 안전성에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 환경부의 “환경기술개발사업-이산화탄소 육상지중 저장을 위한 탐사·평가시 환경안정성 평가 기반 조성에 관한 연구(2010-12001-0072-0)” 의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] IPCC, "IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage", 15-61 (2005)
- [2] IEA, "Technology Roadmap Carbon Capture and Storage", 27-35 (2009)
- [3] Florides, G.A. and Christodoulides, P., "Global warming and carbon dioxide through sciences", Environmental International, Vol. 35, 390-401 (2009)
- [4] U.S. Environmental Protection Agency, "Framework for ecological risk assessment", Washington, DC: Risk Assessment Forum, U.S. EPA. EPA/630/R-92/001 (1992)
- [5] IMO, "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", (2007)
- [6] LG ERI, "저탄소 경제로 가기 위한 교두보, CCS", LG Business Insight Weekly Focus, 2009.8.19, (2009)
- [7] Tae Seob Choi and Jung-Suk Lee, "Scheme on Environmental Risk Assessment and Management for Carbon Dioxide Sequestration in Sub-seabed Geological Structures in Korea", Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering Vol. 12, No. 4. pp. 307-319, November (2009)
- [8] Caroline Wildbolz, "Life Cycle Assessment of Selected Technologies for CO2 Transport and Sequestration", PSI Diploma Thesis July 2007, No. 2007MS05
- [9] Martin Peht, Johannes Henkel, "Life cycle assessment of carbon dioxide capture and storage from lignite power plants", international journal of greenhouse gas control 3, 49-66 (2009)
- [10] 한국환경산업기술원, "전과정평가 이론과 실무", 143-285 (2009)
- [11] 윤용승, 이승종 "석탄발전소 발생 CO2의 지하저장 기술개발 현황, 고등기술훈련연구원 플랜트엔지니어링센터. KIC News, Volume 12, No. 2. 2009