

이산화탄소 포집 수송 저장 누출의 전과정평가 연구

A Study on LCA(Life Cycle Assessment) of Leakage from CCS(Carbon Capture and Storage)

박기학¹, 강헌², 윤성택³

¹(주)에코피엔지, ²수원대학교, ³고려대학교

Park Ki Hak¹, Kang Hun², Yun Seong Taek³

¹Eco P&G, ²University of Suwon, ³Korea University

사단법인 한국전과정평가학회

The Korean Society for Life Cycle Assessment

이산화탄소 포집 수송 저장 누출의 전과정평가 연구

박기학¹, 강현^{2*}, 윤성택³

¹에코피엔지, ²수원대학교, ³고려대학교

A Study on LCA(Life Cycle Assessment) of Leakage from CCS(Carbon Capture and Storage)

Park Ki Hak¹, Kang Hun^{2*}, Yun Seong Taek³

¹Eco P&G, ^{2*}University of Suwon, ³Korea University

Abstract

This study was set the scenario that carbon dioxide of 3 million ton per year emitted by coal-fired power plant was captured and compressed to a level of 95%, and stored underground. The composition of the impurities(5%) in the capture materials was assumed including the general air pollutant, such as CH₄, N₂O, NO_x and Hg, etc, emitted by coal-fired power plant. Features of this study is not the purity of carbon dioxide, examine the magnitude of the environment impact on the 1~5% of impurities. In particular, the environmental impact of these impurities that appear high is examined.

Through the CCS, net avoidance effect of global warming was 3.88E+09 kg CO₂-eq/kg.

Weighting result due to leakage in the case of 1% leakage was 3.03E+05 Pt in the water system and 5.77E+03 Pt in the soil system. And Weighting result due to leakage in the case of 5% of leakage was 2.88E+04 Pt in the water system and 1.51E+06 Pt in the soil system. The cause of the environmental impact of the soil system is higher than the water system appeared by mercury(Hg) and weighting factor of mercury was larger caused in the soil system. According to the weighting results of the environmental impact, excepting mercury, 5% of leakage was 5.42E+03 Pt in the soil system. In this case, the avoidance effect was 3.38E+05 Pt. That is, excluding mercury, it was analyzed that CCS can reduce the environmental load.

In the future, there is a need to further study the presence or absence of including an environmental impact assessment quantification of impurities and collecting materials for safe CCS. Also, it must quantify the environment effect of lower pH due to carbon dioxide and be a lot of research on the prediction of changes in the ecosystem.

Keywords: LCA(Life Cycle Assessment), CCS(Carbon Capture and Storage), GWP(Global Warming Potential), GHGs(Greenhouse Gases)

* 교신저자: 강현 교수, (18323) 화성시 봉담읍 와우안길 17 수원대학교 환경에너지공학과 Tel: 031-220-2146 Fax: 031-220-2533, Email: hkang@suwon.ac.kr

1. 서론

선진국을 비롯하여 개발도상국까지 신기후변화체제에 참여하며 각국의 온실가스 감축에 많은 노력을 기울이고 있다. 상향식 감축목표를 설정하여 2021년 이후 적용됨에 따라 우리나라는 2030년 기준으로 BAU(Business As Usual) 대비 37%의 온실가스 감축이라는 정책으로 각 산업계의 노력을 촉구하고 있는 상황이다. 우리나라의 온실가스 배출량은 2013년 기준 694.5백만 톤으로 이중 CO₂가 차지하는 양은 653.6백만 톤으로 전체 배출량의 91.5%를 차지하고 있다. 또한, 분야별 온실가스 배출량은 에너지 분야에서 2013년 기준 606.2백만 톤 CO₂-eq으로 전체 배출량의 87.3%를 차지하고 있으며, 1990년 대비 251.22%의 증가를 나타내고 있다. 제 7차 전력수급기본계획에 의하면 2029년까지 석탄 발전에 기반을 둔 전력공급을 32.3%로 늘려 온실가스의 배출량은 더욱 증가할 것으로 예상된다. 이러한 온실가스의 저감을 위한 노력과 현실적인 저감방안으로 CCS기술이 대두되고 있으며, IEA(국제에너지기구)에 의하면 2050년 전세계 CO₂ 배출량 규모는 약 620억 톤이 넘을 것으로 추정하고 있으며 CCS와 같은 에너지 기술이 적용될 경우 이 수치는 140억 톤으로 감축할 수 있을 것으로 전망하고 있다. 이때 CO₂ 감축 예측량 420억 톤 중 14%에 해당하는 70억 톤이 CCS 기술을 통해 감축할 것 이라고 전망하고 있다. 우리나라는 CO₂ 배출량의 약 83%를 차지하는 에너지 분야에 CCS 기술을 응용할 계획으로 다양한 연구와 실험이 이루어지고 있다. 향후 CCS 기술은 온실가스 감축목표 달성을 위한 중요한 기술로 자리 잡을 것이다. 그러나 현재 CCS의 연구는 온실가스의 감축이라는 목표에만 집중되어 있으며 이외에 발생할 수 있는 환경적 영향은 정량적으로 이끌어 내지 못하고 있다. 불순물에 의한 환경영향은 발전소의 배출가스 특성, 시멘트 공장의 배출가스 특성에 따라 달라질 수 있으며, 이를 고려하여 목록분석 한 후 전과정평가를 수행해야 할 것이다. 다양한 분야에 적용될 CCS의 기술 특징을 고려하고 불순물의 포함 여부를 확인함으로써 환경영향을 최소화해야 할 것이다.

2. 전과정평가 수행

2.1 목적 및 범위정의

2.1.1 목적 정의

본 연구는 이산화탄소 포집, 수송, 저장의 환경영향을 정량적으로 분석하고 누출 시 발생할 수 있는 환경영향을 시나리오를 통해 분석하였다. 적용대상은 500 MW급 화력발전소에 의해 배출되는 이산화탄소 300만 톤/년을 순수 이산화탄소 95%로 포집하는 것으로 설정하였다. 기타 조성 가스 성분의 5%는 일반적으로 석탄발전에서 배출되는 오염물질로 구성하였으며, CCS 이후 누출 시나리오를 1~5%로 설정하였다. 이산화탄소와 기타 오염물질의 누출은 각각 토양과 수계 누출을 가정하여 환경영향을 분석하였다. 본 연구의 목적은 이산화탄소 저장을 위한 각 단계별 포집, 수송, 저장과 관련하여 CCS에 의한 지구온난화 회피효과 분석과 불순물의 환경영향을 예측하였다. 본 연구는 향후 CCS의 순도 기준과 조성에 대한 기준을 마련하기 위한 자료로 활용 될 수 있으며, 또한 환경영향 범주별 분석을 통해 CCS 기술 적용 시 미포함 물질에 대한 결과와 미포함 물질의 제거 기술 개발도 더 연구 되어야 할 것이다.

본 연구에서 적용된 프로그램은 환경부 TOTAL Ver.4.1.5를 활용하였으며, 특성화 인자의 지구온난화는 IPCC1996, 토양독성 impact category: Terrestrial ecotoxicity reference: TETP inf.(Huijbregts, 1999 & 2000), 수계독성 (1) impact category: Marine aquatic ecotoxicity (2)

reference: MAETP inf. (Huijbregts, 1999 & 2000)의 인자 값을 적용하였다.

2.1.2 범위 정의

2.1.2.1 기능단위

연구의 범위는 500 MW급 석탄 화력발전에서 배출되는 이산화탄소 300만 톤을 95% 포집하여 50 km의 수송과 저장의 CCS의 전과정을 포함한다. 수송의 경우 파이프라인은 거리 50 km(그림 1의 ①), 파이프 직경 95 cm 이며 차량공로 수송과(그림 1의 ②), 선박의 수송(그림 1의 ③)을 고려하여 각각 비교분석 하였다. 이후 누출은 95%의 이산화탄소와 5%의 불순물을 포함한 포집물이 1~5% 누출하는 것을 가정하였으며, 누출되는 모든 물질이 토양계와 수계로 각각 동일한 양이 누출되는 환경영향을 정량화 하였다.

2.1.2.2 가정 및 제한사항

본 연구에서는 CCS에서 사용되는 에너지의 환경부하와 포집 후 영구 저장되는 온실가스에 대해 환경회피효과(환경이익)을 비교평가 하였다. 또한 누출 시 환경이익이 소멸되는 량(지구온난화의 재발생)을 살펴보았다. 누출의 경로는 토양을 통해 수계로 이동하거나, 또는 수계를 거쳐 토양으로 이동하는 것은 고려하지 않았다. 이후 토양 및 수계에 누출되는 물질이 대기 중으로 재 방출되는 것은 고려되지 않았다. 기능단위는 CCS 300만 톤 이며, 가정 및 제한사항으로는 CCS는 발전소 이외에 다량의 이산화탄소가 배출되는 모든 시설에 적용이 가능하다. 예를 들면 시멘트, 정유, 화학, 철강 등에 적용될 수 있으며, 본 연구에서는 석탄 화력발전에서 의한 CCS를 대상으로 하였으며 포함하고 있는 불순물(오염물질)은 국가마다 다를 수 있으며, 특히 해당국가의 발전 기술에 따라 크게 달라질 수 있다. 본 연구에서는 석탄 화력발전에서 배출되는 배출물의 특성은 문헌을 통해 산정하였으며, 이후 대기오염물질 제거 기술의 개발과 국내 배출물의 자료를 인용할 경우 본 연구의 결과와는 상이할 것으로 사료된다. 또한, 본 연구에서는 포집시설의 설비, 차량 및 선박의 제조, 파이프라인의 설치 등은 제외하였다. CCS의 저장은 영구저장을 목표로 하고 있으며, 누출시 경제적인 부분은 CDM과 연계하여 고려할 수 있다. 모니터링 기간(30년 이상) 중 누출이 확인 될 때 CER을 받을 수 없는 상황이며, 공학적으로 누출을 막을 수 있는 방안은 현재 개발되어 있지 않은 상황이다. 이에 따라 경제적인 효과분석 및 저장기간을 고려하지 않았으며, 누출에 따른 토양 및 수계의 영향만을 분석하였다. 지질학적 특성을 갖춘 저장지의 공극에 이산화탄소 스트림이 저장됨에 따라 지하수의 유동과 토양의 단층에 따른 이동경로 모니터링을 통해 수계와 토양계에 미치는 영향을 각각 분석하여 환경영향을 예측하는 것이 더욱 필요할 것이다.

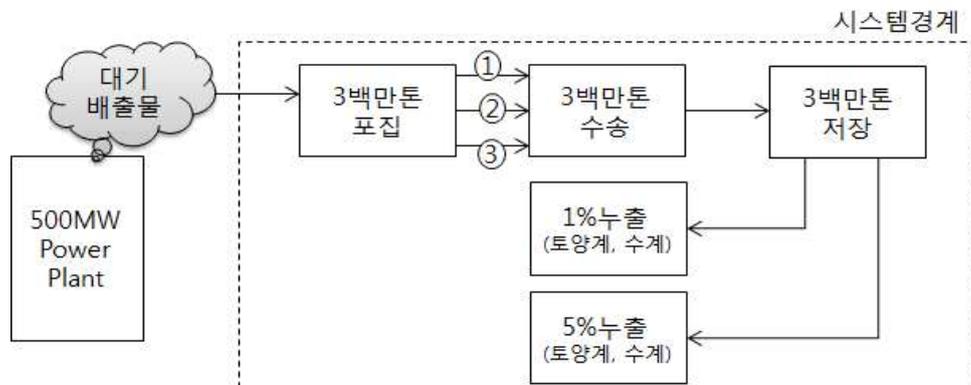


Figure 1. System Boundary

3. 목록분석

석탄 화력발전에서 배출되는 대기배출물의 조성은 이산화탄소 95%와 5%의 기타 오염물을 포함하고 있다. 석탄발전에 의한 전력 1 MJ 생산 당 배출되는 오염물질은 CH₄ 1.00.E+00 mg/MJ, N₂O 3.97.E+00 mg/MJ, SO₂ 6.56.E+01 mg/MJ, Formaldehyde 5.80.E-05 g/MJ, Mercury(Hg) 4.10.E+00 μg/MJ를 포함하고 있다.

Table 1. Gate to gate inventory analysis results

Input			Output	
Input	Unit	Amount	leakage	
Capture	CO ₂	ton	2,850,000	28,500.00
	CH ₄	ton	991	9.91
	N ₂ O	ton	3,936	39.36
	SO ₂	ton	65,037	650.37
	NOx	ton	61,567	615.67
	CO	ton	7,931	79.31
	PM < 2.5	ton	4,689	46.89
	PM > 10	ton	5,235	52.35
	PM 2.5~10	ton	551	5.51
	Formaldehyde	ton	58	0.58
	Mercury(Hg)	ton	4	0.04
Capture energy	Energy (capture)	kW	70,800,000	-
	Energy (Compression)	kW	333,000,000	-
Transportation		km	50	-
Storage	Energy (Injection)	kW	21,000,000	-

출처 : Dan Jakob Wangen. Life Cycle Assessment of Power Generation Technologies with CO₂ Capture. Master of Energy and Environmental Engineering. 2012.

이산화탄소 300만 톤/년을 저장하기 위해 포집되는 조성 물질은 95%의 CO₂ 2,850,000 톤, CH₄ 991 톤, N₂O 3.936 톤, NOx 61,037 톤, Formaldehyde 58 톤, Mercury(Hg) 4 톤이며, 포집에 요구되는 전력은 2.36E+01 kWh/tCO₂ 이다. 압축 에너지는 파이프라인 수송을 포함하고 있으며, 파이프라인의 길이는 50 km 수송을 의미한다. 파이프라인 직경은 95 cm이며 압력손실은 0.006 Mpa/yr로 무시될 수 있는 범위이다.

4. 영향평가

4.1 포집단계 환경영향

CCS를 통해 얻어지는 환경 회피효과는 산성화 1.08E+08 kg SO₂-eq 부영양화 8.00E+06 kg PO₄³⁻-eq, 지구온난화 4.09E+09 kg CO₂-eq, 인체독성 3.891E+07 kg 1,4-DCB eq, 토양 독성 1.133E+08 kg 1,4-DCB eq의 환경영향이 감소하는 것을 분석되었다. 전력사용에 의한 환경영향

발생과 온실가스의 포집과 저장에 따른 회피효과를 고려한 순 회피효과(환경이득)을 살펴본 결과 자원고갈의 환경영양과 오존층파괴는 각각 $-1.22E+05$ 1/yr, $-8.07E-04$ kg CFC 11-eq로 나타나 환경이익이 없는 것으로 분석되었으며, 산성화는 $1.08E+08$ kg SO_2 -eq, 부영양화 $7.99E+06$ kg PO_4^{3-} -eq, 지구온난화 $3.89E+09$ kg CO_2 -eq, 토양 독성 $1.13E+08$ kg 1,4-DCB eq이 환경영향에 이익이 되는 것으로 분석되었다.

지구온난화의 경우 환경영향 발생은 포집 및 압축에 의한 에너지 사용을 분석하였다.

Table 2. Characterization result of the capture stage

Impact categories	Environmental Impact	Environment al credit	Net Environmental credit	Unit
ADP	1.22E+05	-	+1.22E+05	1/yr
AP	5.93E+04	-1.08E+08	-1.08E+08	kg SO_2 -eq
EP	1.10E+04	-8.00E+06	-7.99E+06	kg PO_4^{3-} -eq
GWP	2.00E+08	-4.09E+09	-3.89E+09	kg CO_2 -eq
HTP	7.84E+03	-3.891E+07	-3.89E+07	kg 1,4-DCB eq
ODP	8.07E-04	-	+8.07E-04	kg CFC 11-eq
POCP	2.43E+04	-3.37E+06	-3.35E+06	kg ethylene eq
TETP	1.42E-03	-1.133E+08	-1.13E+08	kg 1,4-DCB eq.

4.2 수송단계 환경영향

파이프라인 수송(50 km)에 의한 환경영향은 전력 사용에 의한 환경부하 발생이며, 각 범주별로 살펴볼 때 자원고갈 $5.74E+05$ 1/yr, 산성화 $2.79E+05$ kg SO_2 -eq, 토양독성 $6.66E-03$ kg 1,4-DCB eq.을 발생시키는 것으로 분석되었다.

육로 수송의 경우 자원고갈 $6.49E+04$ 1/yr, 산성화 $6.30E+04$ kg SO_2 -eq, 지구온난화 $7.91E+06$ kg CO_2 -eq, 인체독성 $3.35E+06$ kg 1,4-DCB eq., 토양독성 $7.59E+01$ kg 1,4-DCB eq.을 발생시키는 것으로 분석되었다.

선박의 경우 LNG tanker 100dwt와 Tanker 500~20,000 톤급으로 분석하였으며, 선박의 용량이 클수록 환경영향이 작게 나타나는 것으로 분석되었다. Tanker 500~20,000 톤급 선박의 경우 자원고갈 $9.20E+03$ 1/yr, 지구온난화 $6.02E+04$ kg CO_2 -eq, 인체독성 $4.89E+05$ kg 1,4-DCB eq. 토양독성 $1.08E+01$ kg 1,4-DCB eq.을 발생시키는 것으로 분석되었다.

Table 3. Characterization result of transportation stage

Impact category	Pipeline	25 ton land transportation	Ship		Unit
			LNG tanker 100dwt	Tanker 500~ 20,000 ton	
ADP	5.74E+05	6.49E+04	1.11E+05	9.20E+03	1/yr
AP	2.79E+05	6.30E+04	3.42E+05	2.19E+04	kg SO ₂ -eq
EP	5.19E+04	1.11E+04	3.08E+04	4.19E+02	kg PO ₄ ³⁻ -eq
GWP	1.65E+08	7.91E+06	1.40E+07	6.02E+04	kg CO ₂ -eq
HTP	3.69E+04	3.35E+06	5.74E+06	4.89E+05	kg 1,4-DCB eq
ODP	3.80E-03	2.40E+00	4.09E+00	3.40E-01	kg CFC 11-eq
POCP	1.14E+05	9.34E+03	2.56E+04	3.21E+04	kg ethylene eq
TETP	6.66E-03	7.59E+01	1.30E+02	1.08E+01	kg 1,4-DCB eq.

4.3 저장단계 환경영향

저장단계에서는 주입 시 에너지가 사용되며, 전력사용에 의한 환경영향이 발생하게 된다. 전력사용에 의한 저장단계의 특성화 결과 자원고갈이 3.62E+04 1/yr, 산성화 1.76E+04 kg SO₂-eq/kg, 지구온난화 1.04E+07 kg CO₂-eq, 인체독성 2.32E+03 kg 1,4-DCB eq., 오존층파괴 2.39E-04 kg CFC 11-eq, 광화학산화물 7.20E+03 kg ethylene eq., 토양 독성 4.20E-04 kg 1,4-DCB eq.가 각각 배출되는 것으로 나타났다.

Table 4. Characterization result of storage stage

Impact category	Environmental impact	Unit
ADP	+3.62E+04	1/yr
AP	+1.76E+04	kg SO ₂ -eq
EP	+3.27E+03	kg PO ₄ ³⁻ -eq
GWP	+1.04E+07	kg CO ₂ -eq
HTP	+2.32E+03	kg 1,4-DCB eq
ODP	+2.39E-04	kg CFC 11-eq
POCP	+7.20E+03	kg ethylene eq
TETP	+4.20E-04	kg 1,4-DCB eq.

4.4 전과정 결과해석

CCS 전과정의 특성화 결과 환경부하 발생량은 자원고갈 7.33E+05 1/yr, 산성화 3.56E+05 kg SO₂-eq, 지구온난화 2.10E+08 kg CO₂-eq, 인체독성 4.70E+04 kg 1,4-DCB eq., 오존층파괴 4.84E-03 kg CFC 11-eq, 광화학산화물 1.46E+05 kg ethylene eq., 토양 독성 8.50E-03 kg 1,4-DCB eq.로 분석되었으며, CCS를 통해 얻어지는 환경 회피효과는 산성화 1.08E+08 kg SO₂-eq, 부영양화 8.00E+06 kg PO₄³⁻-eq, 지구온난화 4.09E+09 kg CO₂-eq, 인체독성 3.891E+07 kg 1,4-DCB eq., 광화학산화물 3.37E+06 kg ethylene eq., 토양 독성 1.133E+08 kg 1,4-DCB eq.로 나타났다. 포집물의 처리과정에서 Hg를 제거하였을 경우 인체독성과 토양 독성은 각각 1.49E+07 kg

1,4- DCB eq., 5.45E+04 kg 1,4-DCB eq.의 회피효과가 있는 것으로 나타났다.

Table 5. Characterization results of CCS life cycle

Impact category	Unit	Occurring environmental impact	Environmental credit	Environmental credit (except mercury)
ADP	1/yr	7.33E+05	-0.00E+00	-0.00E+00
AP	kg SO ₂ -eq	3.56E+05	-1.08E+08	-1.08E+08
EP	kg PO ₄ ³⁻ -eq	6.62E+04	-8.00E+06	-8.00E+06
GWP	kg CO ₂ -eq	2.10E+08	-4.09E+09	-4.09E+09
HTP	kg 1,4-DCB eq	4.70E+04	-3.891E+07	-1.49E+07
ODP	kg CFC 11-eq	4.84E-03	-0.00E+00	-0.00E+00
POCP	kg ethylene eq	1.46E+05	-3.37E+06	-3.37E+06
TETP	kg 1,4-DCB eq.	8.50E-03	-1.133E+08	-5.45E+04

5. 누출의 환경영향

CCS를 통해 누출되는 물질은 수계, 또는 토양계로 누출이 이루어질 수 있으며, 이는 대기배출 특성 이외에 다른 영향범주에서 환경문제를 일으킬 수 있다. 누출에 의한 영향은 전과정평가 결과 산성화와 인체독성, 토양 독성의 영향범주에 환경문제를 일으켰으며, 수계의 누출영향보다 토양계의 누출이 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 수계 누출의 경우 인체독성 범주에서는 5.80E+04 kg 1,4-DCB eq., 토양 독성에서는 3.78E+04 kg 1,4-DCB eq.로 나타났다. 토양계의 누출은 인체독성에서 4.52E+04 kg 1,4-DCB eq., 토양 독성 범주에서 2.28E+06 kg 1,4-DCB eq.인 것으로 각각 분석되었다.

Table 6. Characterization result of exposure(1%)

Impact category	Unit	Water exposure (CCS 1%)	Land leak (CCS 1%)
ADP	1/yr	0.00E+00	0.00E+00
AP	kg SO ₂ -eq	0.00E+00	0.00E+00
EP	kg PO ₄ ³⁻ -eq	2.59E+05	2.59E+05
GWP	kg CO ₂ -eq	0.00E+00	0.00E+00
HTP	kg 1,4-DCB eq	5.80E+04	4.52E+04
ODP	kg CFC 11-eq	0.00E+00	0.00E+00
POCP	kg ethylene eq	0.00E+00	0.00E+00
TETP	kg 1,4-DCB eq.	3.78E+04	2.28E+06

6. 결론 및 연구의 한계

본 연구에서는 CCS의 환경영향을 전과정평가 기법을 통해 분석하였으며, CCS 저장이후 발생할 수 있는 누출에 대해 시나리오를 설정하여 분석하였다. 500 MW급 석탄 화력발전에서 배출되는 연간 300만 톤의 이산화탄소를 95% 수준으로 포집 압축하여 지중 저장하는 시나리오를 설정하였으며, 포집물중 불순물(5%)의 조성은 석탄화력발전에서 배출되는 일반적인 대기오염물질 CH₄, N₂O, NO_x, Hg 등이 포함된 것으로 가정하였다. 저장 이후 누출에 대한 환경영향은 이산화탄소에 의한 pH에 따른 환경영향이 주로 연구되었으나, 전과정평가를 통해 누출시나리오를 해석한 사례는 거의 없는 것으로 나타났다. 본 연구의 관점은 90%~99%의 이산화탄소의 순도가 아닌 1~5%의 불순물의 환경영향의 크기가 어느 정도인지 살펴보고 특히, 이들 불순물 중 환경영향이 높게 나타나는 물질은 어느 것인지 검토하였다. CCS를 통해 지구온난화의 순 회피효과는 3.88E+09 kg CO₂-eq (회피효과 - 환경부하 발생량) 으로 나타났으며, 지구온난화의 영향 범주에서 물질별로 분석한 결과 CO₂ 2.85E+09 kg CO₂-eq, CH₄ 2.08E+07 kg CO₂-eq, N₂O 1.22E+09 kg CO₂-eq 인 것으로 나타났다.

CCS를 통해 누출되는 물질은 수계, 또는 토양계로 누출이 이루어질 수 있으며, 이는 대기배출 특성 이외에 다른 영향범주에서 환경문제를 일으킬 수 있다. 1%의 CCS 누출에 의한 영향은 수계의 누출영향보다 토양계의 누출이 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 수계 누출의 경우 부영양화는 2.59E+05 kg PO₄³⁻-eq으로 나타났고, 인체독성 범주에서는 5.80E+04 kg 1,4-DCB eq., 토양 독성에서는 3.78E+04 kg 1,4-DCB eq.로 나타났다. 토양계의 누출은 부영양화 범주에서 2.59E+05 kg PO₄³⁻-eq, 인체독성에서 4.52E+04 kg 1,4-DCB eq., 토양 독성 범주에서 2.28E+06 kg 1,4-DCB eq.인 것으로 각각 분석되었다.

본 연구의 한계점은 이산화탄소에 의한 수계 및 토양생태계의 산성화 정도를 평가하지 못하였고, 토양 및 수계의 pH 변화에 따른 생물종의 사멸과 생태독성 인자로서의 영향을 정량화 하지 못한 한계를 갖고 있다. 향후 이산화탄소에 의한 pH 변화에 따른 생태계에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 기법과 연구가 이루어져야 할 것이다.

7. 사사

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

8. 참고문헌

1. 온실가스종합정보센터. 2015 국가 온실가스 인벤토리 보고서. 2015. 12.
2. 박기학. 생태독성을 고려한 CCS 전과정 영향평가 방법론 개발 연구.
3. 강현 외 9명, 이산화탄소 육상지중 저장을 위한 탐사·평가지 환경안정성 평가 기반 조성에 관한 연구, 한국환경산업기술원, 2011.
4. Dan Jakob Wangen. Life Cycle Assessment of Power Generation Technologies with CO₂ Capture. Master of Energy and Environmental Engineering. 2012.
5. MAETP inf. (Huijbregts, 1999 & 2000)