

온실가스 저감기술에 대한 환경전과정평가

Life Cycle Assessment of an GHG emission reduction technology

김병주¹, 차경훈¹, 허탁², 김범식³, 권순일³, 최지나⁴, 권영국³

¹에코에이블컨설팅(주), ²건국대학교 융합신소재공학과, ³한국화학연구원 탄소자원화연구소 CO₂에너지벡터연구그룹, ⁴한국화학연구원 탄소자원화연구소 탄소자원화정책연구센터

Byung Ju Kim¹, Kyoung Hoon Cha¹, Tak Hur², Beom Sik Kim³, Sun Il Gwon³, Ji Na Choi⁴, Young Kook Kwon³

¹Ecoable consulting company, ²Dept. of Materials Chemistry & Engineering, Konkuk university, ³CO₂ Energy vector research group, Carbon resources institute, Korea research institute of chemical technology, ⁴Carbon resources policy research center, Carbon resources institute, Korea research institute of chemical technology

사단법인 한국전과정평가학회

The Korean Society for Life Cycle Assessment

온실가스 저감기술에 대한 환경전과정평가

김병주^{1*}, 차경훈¹, 허탁², 김범식³, 권순일³, 최지나⁴, 권영국³

¹에코에이블컨설팅(주), ²건국대학교 융합신소재공학과

³한국화학연구원 탄소자원화연구소 CO2에너지벡터연구그룹

⁴한국화학연구원 탄소자원화연구소 탄소자원화정책연구센터

Life Cycle Assessment of an GHG emission reduction technology

Byung Ju Kim^{1*}, Kyoung Hoon Cha¹, Tak Hur²,

Beom Sik Kim³, Sun Il Gwon³, Ji Na Choi⁴, Young Kook Kwon³

¹Ecoable consulting company, 72, Jayangbeonyeong-ro, Gwangjin-gu, Seoul, Korea

²Dept. of Materials Chemistry & Engineering, Konkuk university, 120, Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul, Korea

³CO₂ Energy vector research group, Carbon resources institute, Korea research institute of chemical technology, 141, Gajeongro, Yuseong, Daejeon, Korea

⁴Carbon resources policy research center, Carbon resources institute, Korea research institute of chemical technology, 141, Gajeongro, Yuseong, Daejeon, Korea

Abstract

In this study, the environmental improvement effectiveness of CCU(Carbon capture & utilization) technology is analyzed, based on LCA(Life cycle assessment) methodology. Target CCU technology is synthesis process which uses carbon dioxide as raw material and produces useful materials such as DMC(Dimethyl carbonate), methanol and etc. As a result of LCA performed, 25 g CO₂ eq. of greenhouse gases is reduced during life cycle for treating 1 kg of carbon dioxide. Therefore, target CCU technology produces an effect on greenhouse gas reduction. And electricity consumption of synthesis process is the main issue of GWP results. The improvement of energy type of synthesis process is effective for GWP. 746 g CO₂ eq. of greenhouse gases is reduced by changing energy type of synthesis process. As a result, life cycle GWP reduction is obtained. The scenario analysis about carbon dioxide transportation distance is performed. In case of the distance of carbon dioxide transportation is farther than 97.13 km, the amount of greenhouse gas emission during life cycle is larger than avoid and target CCU technology is ineffective for greenhouse gas reduction. Consequentially, target CCU technology is effective for greenhouse gas reduction. And the region for installing the process should consider the distance of carbon dioxide transportation.

Keywords: Carbon Capture and Utilization(CCU), Life Cycle Assessment(LCA), Global Warming Potential(GWP), Greenhouse Gas(GHG), Dimethyl carbonate(DMC)

* 교신저자: 김병주, (05064) 서울특별시 광진구 자양변영로 72 2층, Tel: 02-6959-3830, Fax: 070-4327-7279, Email: bjkim@ecoable.co.kr

1. 서론

전 지구적 차원으로 발생하는 지구온난화와 이상기후현상으로 인해 기후변화의 주범인 온실가스 감축에 대한 필요성이 대두되었다. 이를 해결하기 위해 전 세계 각국은 1997년 12월, 일본 교토에서 개최된 기후변화협약 제 3차 당사국총회에서 채택된 교토의정서를 기점으로 온실가스를 저감하기 위한 다양한 활동을 펼치고 있다. 온실가스의 저감은 온실가스 배출의 근간이 되는 화석연료의 사용량을 줄이는 것이 주가 되고 있는데, 이는 신재생에너지의 도입, 공정 효율 개선, 에너지원 대체, 신기술 개발 등을 통해 이루어지고 있다. 그러나 신재생에너지 도입의 경우 기술적 한계로 인해 도입을 위한 비용이 지나치게 높거나 전력의 품질이 떨어지는 등 산업 활동 적용에 대한 한계점이 존재하며, 효율 개선, 에너지원 대체, 신기술 개발 등의 노력 역시 그 근본이 되는 산업 활동이 계속되는 한 온실가스 배출을 저감하는데 한계가 존재한다.

이에 화석연료의 사용을 줄여 온실가스를 저감하는 것이 아니라 온실가스 자체를 포집하여 저장하는 기술(Carbon capture and storage, 이하 CCS 기술)이 등장하였는데, 이는 화석연료의 연소로 인해 발생한 이산화탄소(이하 CO₂)가 대기로 배출되기 전에 포집하여 압력을 가해 액체 상태로 저장하는 기술을 의미한다. 그러나 CCS 기술은 포집된 CO₂를 저장할 수 있는 공간 및 인프라가 필요하며 지속적인 관리가 필요하다. 또한 포집된 CO₂를 저장하는 개념이기 때문에 잠재적으로 누출의 가능성을 내포한다. CCS 기술은 액화 CO₂의 저장소 위치에 따라 해양저장, 광물탄산화, 지중저장으로 구분할 수 있으나, 해양 생태계에 부정적인 영향을 미칠 수 있어 국제협약을 통해 해양저장이 금지된 선례를 통해 그 한계점을 가늠할 수 있다.

이러한 배경을 바탕으로 등장한 것이 바로 온실가스 전환기술(Carbon capture and utilization, 이하 CCU 기술)이다. CCU 기술은 포집된 CO₂를 유용자원으로 전환하는 기술을 의미하며 ‘저장’이라는 한계점을 가지고 있는 CCS 기술을 대체할 수 있는 기술이라고 볼 수 있다. 이 때, 이와 같은 기술은 반드시 ‘저감되는 온실가스의 양’과 ‘저감을 위해 직·간접적으로 배출되는 온실가스 양’의 비교를 통해 전과정적인 측면의 저감 효과를 분석해야 한다. 전과정을 고려한 분석을 수행하지 않을 경우, 직접적인 온실가스의 감축을 위해 더 많은 양의 온실가스를 간접적으로 배출하게 되는 상황이 발생할 수도 있기 때문이다. 이에 따라 본 연구에서는 CCU 기술에 대해 원료 채취부터 수송, 제조, 사용 및 폐기를 포함하는 전과정에 걸친 모든 투입물과 배출물을 정량화하여 잠재적인 환경 영향을 평가하는 방법론인 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)를 수행하여 CCU 기술의 온실가스 저감 효과를 확인하고자 한다^{1,2}.

2. 전과정평가 수행

2.1 목적 및 범위정의

2.1.1 목적 정의

본 연구의 목적은 대상 CCU 기술에 대해 전과정평가를 수행하여 대상 CCU 기술이 온실가스의 저감에 효과가 있는지 여부를 살펴보고자 함에 있다. 또한 대상 기술의 환경성 측면의 주요 이슈를 파악하여 보다 환경성을 개선할 수 있는 기회를 모색하고자 한다.

2.1.2 범위 정의

본 연구의 대상 CCU 기술은 한국화학연구원에서 개발 중인 기술로, 포집된 CO₂를 사용하여 Dimethyl carbonate(이하 DMC) 외 유용자원을 합성하는 기술이다. 본 연구 대상 CCU 기술은 크게 3단계에 걸쳐 이루어진다. 첫 번째 단계는 CDR(Carbon dioxide reforming) 공정으로, CO₂와 메탄(이하 CH₄)을 원료로 사용하여 일산화탄소(이하 CO)와 수소(이하 H₂)를 합성한다. 두 번째 단계는 MeOH(메탄올) 합성 공정으로 전환된 CO와 H₂를 메탄올로 합성하며, 마지막 세 번째 단계에서는 앞서 합성된 메탄올과 CO, 산소(O₂)를 원료 물질로 하여 DMC를 합성하게 된다.

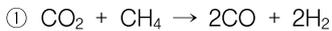
본 대상 CCU 기술은 모든 공정에 걸쳐 전기를 에너지원으로 사용하도록 설계되었으나 환경성 측면의 개선, 향후 대량 생산체계의로의 전환 등을 위해 발열설비, 흡열설비 여부를 고려하여 에너지원의 대체가 가능한 설비에 한해 LNG로의 에너지원의 변경이 이루어졌다. 각 단계별 투입물/배출물은 다음 표와 같다.

Table 1. 대상 CCU 기술 공정별 투입물/배출물

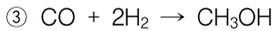
1단계. CDR 공정 ^①			
구분	물질명/에너지명	비고	
투입물	원료물질	CO ₂	
		CH ₄	
	보조물질	CoRuZr 촉매	촉매 수명을 고려하여 투입량 할당
	에너지	전기	
LNG			
배출물	중간흐름 ^②	CO	
		H ₂	
	대기배출물 ^⑤	CO ₂ , CO, CH ₄ , N ₂ O, NO _x , SO _x , THC, PM	LNG 연소에 대해 IPCC 2006, 국립환경과학원 배출계수 적용
	고형폐기물	폐촉매	촉매 수명을 고려하여 배출량 할당
2단계. MeOH 합성 공정 ^③			
구분	물질명/에너지명	비고	
투입물	중간흐름	CO	
		H ₂	
	보조물질	CZA 촉매	촉매 수명을 고려하여 투입량 할당
	에너지	전기	
LNG			
배출물	중간흐름	CH ₃ OH	
	부산물	CO	미반응량 별도 포집
		H ₂	미반응량 별도 포집
	대기배출물 ^⑤	CO ₂ , CO, CH ₄ , N ₂ O, NO _x , SO _x , THC, PM	LNG 연소에 대해 IPCC 2006, 국립환경과학원 배출계수 적용
고형폐기물	폐촉매	촉매 수명을 고려하여 배출량 할당	
3단계. DMC 합성 공정 ^④			
구분	물질명/에너지명	비고	

투입물	중간흐름	CH ₃ OH	
	원료물질	CO	
		O ₂	
	보조물질	CuCl 촉매	촉매 수명을 고려하여 투입량 할당
	에너지	전기	
LNG			
배출물	제품	(CH ₃ O) ₂ CO	
	대기배출물 ^⑤	CO ₂ , CO, CH ₄ , N ₂ O, NOx, SOx, THC, PM	LNG 연소에 대해 IPCC 2006, 국립환경과학원 배출계수 적용
	수계배출물	H ₂ O	
	고형폐기물	폐촉매	촉매 수명을 고려하여 배출량 할당
	부산물	CH ₃ OH	미반응량 별도 포집

※ 본 공정은 연속반응을 염두에 둔 Flow reactor 형태로 구성되어 있으므로 각 단계별 공정 수율을 고려한 미반응량은 연속되는 다음 반응의 원료물질로 사용됨. 이에 Closed loop recycling을 고려하여 미반응량을 보정함.



② 각 단계에서 반응하여 다음 단계의 원료로 사용되는 물질을 중간흐름으로 명명함



⑤ CO₂, CH₄, N₂O : IPCC 2006 배출계수 적용, CO, NOx, SOx, THC, PM : 국립환경과학원 배출계수 적용

본 연구는 대상 CCU 기술에 대한 원료 물질 채취 및 가공, 수송 및 생산을 고려한다. 연구대상 기술의 시스템 경계는 보령화력발전소에서의 화력발전으로 인해 배출된 CO₂를 포집하여 압축한 후, 한국화학연구원으로 수송하여 유용자원으로 전환하는 과정을 포함한다. 연구 대상 CCU 기술의 목적은 CO₂를 유용자원으로 전환하는데 있으므로 'CO₂ 전환'을 기능으로 설정하였다. 기능단위는 'CO₂ 1kg 전환'으로, 기준흐름은 'CO₂ 1kg'으로 설정하였다.



Figure 1. 시스템 경계

2.2 전과정 목록분석

CO₂ 포집 단계의 데이터는 CCS 기술 연구에 대한 벤치마킹을 통해 수집하였으며 3~10, CO₂ 압축 단계의 데이터는 태경화학(주)에서 수집한 현장 데이터를 적용하였다. CO₂ 수송 단계의 경우, 보령화력발전소에서 포집 및 압축된 CO₂가 본 전환기술이 개발 중인 한국화학연구원으로 최단거리 수송된다고 가정하였다. 현재 국내에는 CCU 기술을 위한 CO₂ 수송차량 사례가 존재하지 않으므로 수소 운반을 목적으로 하는 튜브 트레일러 차량을 선정하였으며, 해당 차량이 만차일 경우와 공차일 경우의 연비를 (주)덕양에너지로부터 조사하여 평균값을 적용하였다. 대상 차량의 운행

을 위해 경유가 사용되며, 경유 사용으로 인한 대기배출물은 IPCC 2006과 국립환경과학원 데이터를 적용하였다. 본 연구에서는 별도의 할당이 이루어지지 않았으며, CO₂의 포집, 압축, 수송 과정에서 누출은 고려되지 않았다.

2.3 전과정 영향평가

수집 및 계산된 GtG 데이터를 기반으로 지구온난화 측면에 대해 특성화를 수행하였다. 특성화 결과 도출은 LCA 소프트웨어인 SimaPro 7.1을 기반으로 이루어졌다.

대상 발전소인 보령화력발전소에서 CO₂ 1kg을 포집하고 압축하여 한국화학연구원까지 수송한 후 DMC 등의 유용자원으로 전환하는 전과정에 걸쳐 2.62E+00 kg CO₂ eq.의 온실가스가 배출되는 것으로 분석되었다. 이 때, 포집된 CO₂를 유용자원으로 전환하는 단계의 지구온난화 영향이 1.86E+00 kg CO₂ eq.로, 전체 지구온난화 영향의 70.97%를 차지하는 것으로 나타났다. CO₂ 전환 단계에서는 공정 내 에너지원으로 사용되는 전기의 사용으로 인한 영향이 34.40%로 가장 크게 나타났으며 LNG 연소로 인한 CO₂의 배출이 28.11%로 그 뒤를 이었다.

CO₂ 전환공정의 원료물질 중 하나로 CO₂가 투입되며 이를 위해 화력발전소로부터 포집한 CO₂를 사용하므로 이로 인한 온실가스 감축 효과를 1.00E+00 kg CO₂ eq.만큼 기대할 수 있다. 또한 CO₂ 전환공정의 결과물로 DMC, 메탄올, CO, H₂를 제품 수준으로 생산하므로 이로 인한 신재 생산의 대체가 가능하다. 신재 생산 대체효과를 통해 회피하게 되는 온실가스의 양은 Eco-invent와 환경부의 LCI 데이터베이스를 통해 산정하였으며 그 회피효과는 1.65E+00 kg CO₂ eq.이다.

종합하면 CO₂의 저감을 위해 본 공정을 운영할 경우 전과정 측면에서 2.62E+00 kg CO₂ eq.의 온실가스가 배출되며 총 2.65E+00 kg CO₂ eq.의 온실가스 감축 효과가 있으므로, 결과적으로 1kg의 CO₂ 전환 당 2.51E-02 kg CO₂ eq.의 온실가스가 감축되어 온실가스의 저감이 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

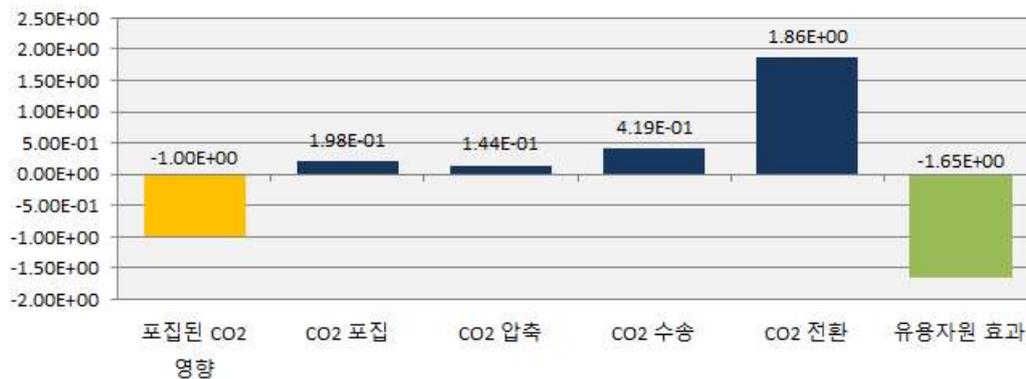


Figure 2. 지구온난화 측면 전과정 영향평가 결과 [단위 : kg CO₂ eq.]

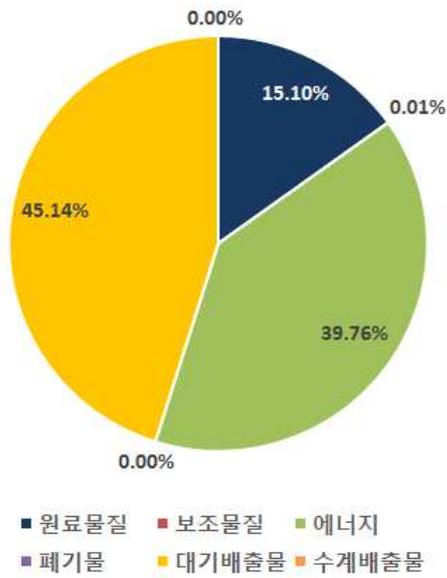


Figure 3. CO₂ 전환단계 지구온난화 기여도

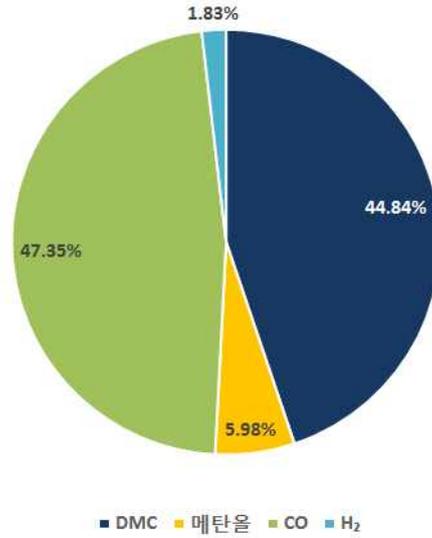


Figure 4. 유용자원 회피효과 기여도

2.4 에너지 개선효과 분석

본 연구의 대상 기술은 전기만을 전환공정의 에너지원으로 사용하는 것으로 출발하였으나, 환경성 개선 및 향후 대량생산 체계로의 전환 등을 고려하여 전기와 LNG를 에너지원으로 사용하는 방식으로 개선이 이루어졌다. 이 때, LNG의 적용을 위해 세부 공정을 발열, 흡열공정으로 구분한 뒤 LNG로의 대체가 가능한 공정을 선정한 후 시뮬레이션을 통해 동일 열량을 위해 필요한 LNG의 연소량을 도출하였다. 전기의 경우 발전소에서 전기를 생산하는 단계에서 연료를 연소하므로 에너지 사용단계에서의 추가적인 환경성 고려가 불필요하지만, LNG의 경우 에너지를 사용하는 단계에서 연소가 이루어지므로 연소로 인한 대기배출물을 추가적으로 고려하였다.

개선 전 전기로 인한 지구온난화 영향은 2.33E+00 kg CO₂ eq./kg CO₂이며, 이를 전기와 LNG를 같이 사용하는 체계로 변경한 결과 1.52E+00 kg CO₂ eq./kg CO₂으로 지구온난화 측면의 개선이 이루어졌다. 동일한 열량을 얻기 위한 에너지원이 각각 사용되었으나 LNG의 적용을 통해 지구온난화 영향이 감소한 것은 LNG 연소로 인한 대기배출물을 추가로 고려하더라도 LNG의 생산을 위한 간접 온실가스 배출량이 전기의 생산을 위한 간접 온실가스 배출량보다 작기 때문으로 분석할 수 있다. 이는 공정 에너지원 측면에서 32.1%의 지구온난화 영향이 개선된 것으로 단순히 전환공정의 개선 뿐 만 아니라 전과정 측면에서도 큰 개선으로 작용한다. 에너지원이 변경되기 전의 전과정 온실가스 배출량은 7.21E-01 kg CO₂ eq./kg CO₂로 전과정 측면에서 온실가스를 배출하기 때문에 기술 자체의 온실가스 감축효과가 없지만, 에너지원이 개선된 후 전과정 온실가스 배출량이 -2.51E-02 kg CO₂ eq./kg CO₂로 개선되므로 전과정 측면의 온실가스 감축효과를 가지게 되기 때문이다.



Figure 5. 전환공정 에너지원 개선으로 인한 지구온난화 개선 효과 [단위 : kg CO₂ eq.]

2.5 운송거리 시나리오 분석

본 연구의 대상 시스템은 보령화력발전소로부터 한국화학연구원까지 CO2를 91.64 km 수송하는 것으로 설정되어 있다. 화력발전소는 발전소의 특성상 많은 양의 용수를 필요로 하므로 바닷가에 위치하는 경우가 많아, 대상 발전소를 변경할 경우 CO2 운송거리가 큰 폭으로 변화할 수 있다. 이에 본 연구에서는 CO2의 운송거리가 환경성에 미치는 영향을 분석하였다.

먼저, 수송거리가 늘어남에 따라 전과정 지구온난화 영향이 변화하는 정도를 분석하였다. 이를 위해 수송을 제외한 전과정 온실가스 배출, 유용자원 회피효과, CO2 포집효과는 그대로 유지한 채 수송거리만을 변경한 경우에 대해 전과정 지구온난화 영향을 도출하였다.

Table 2. 수송거리 변화에 따른 지구온난화 영향 변화

거리 변화	거리	지구온난화 [kg CO ₂ eq.]			
		수송	수송 외	회피효과	합계
기존 거리	91.64 km	4.19E-01	2.20E+00	-2.65E+00	-2.51E-02
+1%	0.92 km	4.23E-01			-2.09E-02
+2%	1.83 km	4.27E-01			-1.67E-02
+3%	2.75 km	4.32E-01			-1.25E-02
+4%	3.67 km	4.36E-01			-8.33E-03
+5%	4.58 km	4.40E-01			-4.14E-03
+6%	5.50 km	4.44E-01			4.97E-05
+7%	6.41 km	4.48E-01			4.24E-03
+8%	7.33 km	4.53E-01			8.43E-03
+9%	8.25 km	4.57E-01			1.26E-02
+10%	9.16 km	4.61E-01			1.68E-02

그 결과, 5% 증가와 6% 증가 사이에서 전과정 지구온난화 영향이 역전되는 것으로 나타났다. 정확한 역전지점의 산정을 위해 거리 1 km 변화당 지구온난화 변화량을 도출한 결과, 4.57E-03 kg CO₂ eq./km으로 나타났으며, 기존 수송거리 대비 약 5.99% 증가할 경우 전과정 지구온난화 영향이 양수(+)로 역전되는 것으로 도출됐다. 이를 거리로 환산하면, CO₂ 운송거리가 총 97.13km(5.49km 증가) 이상이 될 경우 전과정 측면에서 온실가스 감축효과가 없어진다고 해석할 수 있다.

아래 지도에서 확인할 수 있듯이 국내 다수의 기력화력발전소가 바닷가에 위치해있다는 점을 고려하였을 때 포집된 CO₂를 한국화학연구원으로 운송하여 유용자원으로 전환하는 시스템은 전과정 온실가스 감축 측면에서 개선이 필요하다고 해석할 수 있다. 실제 본 대상 CCU 기술을 상용화할 경우 CO₂의 운송거리가 97.13km 미만이 될 수 있도록 지역 거점별로 CO₂ 전환공정을 설치하거나, 또는 각 CO₂ 포집 장소마다 CO₂ 전환공정을 설치하는 등의 고려가 선행되어야 한다. 후자의 경우에는 CO₂ 운송 뿐 만 아니라 CO₂ 압축공정 또한 제외할 수 있으므로 CO₂ 전환공정의 위치와 관계없이 -5.88E-01 kg CO₂ eq./kg CO₂의 온실가스 감축효과를 가질 수 있다.



Figure 6. 수송거리에 따른 지구온난화 경계

3. 결론

본 연구를 통해 온실가스 전환기술을 적용한 CO₂ 1kg의 처리에 대해 전과정평가를 수행하였다. 그 결과, CO₂ 1kg의 처리를 위해 총 2.62E+00 kg CO₂ eq.의 온실가스가 전과정에 걸쳐 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, CO₂ 1kg 포집 및 유용자원(DMC, 메탄올, CO, H₂) 생산으로 인해 총 -2.65E+00 kg CO₂ eq.의 지구온난화 저감효과를 확인할 수 있었다. 결과적으로 CO₂ 1kg의 처리를 위해 2.51E-02 kg CO₂ eq.의 온실가스가 감축되었으므로 궁극적으로 대상 온실가스 전환기술은 실제 온실가스 저감 효과가 있다고 볼 수 있다. 전과정 단계별로 살펴보면 CO₂ 전환공정의 지구온난화 영향이 1.86E+00 kg CO₂ eq.(전체 지구온난화의 70.97%)로 가장 크게 나타났으며, 공정 내 에너지원으로 사용되는 전기의 영향이 가장 큰 영향을 차지하는 것으로 나타났다. 전기에서 LNG와 전기를 같이 사용하는 공정 개선에 대한 효과를 살펴본 결과, 공정 에너지원 측면에서 32.1%의 지구온난화 영향 개선이 이루어졌으며 결과적으로 전과정 온실가스를 감축할 수 있는 시스템으로의 개선이 이루어졌다. 시나리오 분석을 통해 CO₂의 운송 측면을 살펴본 결과, CO₂의 운송거리가 97.13km를 넘을 경우 전과정 측면에서 온실가스 저감 효과가 없어짐을 확인할 수 있었으며, 한국화학연구원에서 CO₂ 전환공정을 운영할 경우, 동해와 남해에 위치한 내륙기력발전소들은 전과정 측면에서 온실가스 저감이 불가능한 것을 확인할 수 있다. 따라서 실제로 대상 CO₂ 전환기술을 운영할 경우 운송거리가 97.13 km 미만인 지역에 대상 공정을 설치하거나 또는 각 포집 장소 별로 공정을 설치하는 등의 고려가 필요할 것으로 보인다.

본 연구의 대상은 가장 대표적인 온실가스인 CO₂를 타 유용자원으로 전환하는 방법으로 온실가스를 저감하는 기술이다. 연구 결과, 해당 기술의 운영을 통해 온실가스의 감축을 지원할 수 있을 것으로 보인다. 그러나 본 연구의 대상기술은 아직 상업화가 이루어지지 않은 기술이므로 가정된

사항들의 변화에 따라 연구의 결과가 및 해석이 달라질 수 있으므로 다양한 시나리오 분석과 함께 주요 이슈에 대한 지속적인 연구가 필요하다. 또한 기술에 대해 한 가지 측면의 영향범주만 고려할 경우, 다른 측면의 환경영향을 간과할 수 있으므로, 향후 지속적인 연구 수행을 통해 다양한 환경영향범주에 대한 영향평가결과를 종합적으로 분석할 필요가 있을 것이며, 나아가 인프라 구축에 대한 실현 가능성, 경제성, 사회성 등과 같은 측면의 분석이 이루어져야 할 것이다.

4. 사사

본 연구는 한국화학연구원에서 수행하는 KK1601-A00(전기화학기반 CCU 융합기술 개발)사업의 협력연구로 수행되었습니다.

5. 참고문헌

1. ISO, "ISO 14040, 2006 : Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework"
2. ISO, "ISO 14044, 2006 : Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines"
3. Ingunn Saur Modahl, Cecilia Askham Nyland, Hanne Lerche Raadal, Olav Kårstad, Tore Andreas Torp and Randi Hagemann, Life cycle assessment of gas power with CCS - a study showing the environmental benefits of system integration, Energy Procedia Vol.4, (2011) p. 2470~2477
4. Zhenggang Nie, Anna Korre, Sevket Durucan, Life cycle modelling and comparative assessment of the environmental impacts of oxy-fuel and post-combustion CO₂ capture, transport and injection processes, Energy Procedia Vol.4, (2011) p. 2510~2517
5. Anna Korre, Zhenggang Nie, Sevket Durucan, Life cycle modelling of fossil fuel power generation with post-combustion CO₂ capture, International Journal of Greenhouse Gas Control Vol.4, (2010) p. 289~300
6. A. Schreiber, P.Zapp, P.Markewitz, S.Vogele, Environmental analysis of a German strategy for carbon capture and storage of coal power plants, Energy Policy Vol.38, (2010) p. 7873~7883
7. Martin Pehnt, Johannes Henkel, Life cycle assessment of carbon dioxide capture and storage from lignite power plants, international journal of greenhouse gas control Vol.3, (2009) p. 49~66
8. Naser A. Odeh, Timothy T. Cockerill, Life cycle GHG assessment of fossil fuel power plants with carbon capture and storage, Energy Policy Vol.36, (2008) p. 367~380
9. Joris Koornneef, André Faaij, Wim Turkenburg, The screening and scoping of Environmental Impact Assessment and Strategic Environmental Assessment of Carbon Capture and Storage in the Netherlands, Environmental Impact Assessment Review Vol.28, (2008) p. 392~414
10. Joris Koornneef, Tim van Keulen, Andre´ Faaij, Wim Turkenburg, Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO₂, international journal of greenhouse gas control Vol.2, (2008) p. 448~467