전과정평가학회지 제 21권 제 1호, p. 27-31, (2020년 12월) ISSN 1229-599X
Korean Journal of LCA, v. 21, no. 1, p. 27-31, (December 2020)

CO_2 수소화 기술을 활용한 합성 나프타 생산시스템의 환경성 평가

안진주[1] · 이광원[2] · 최지나[1,‡]
[1]한국화학연구원 환경자원연구센터
[2](주)엔스타알앤씨

Life Cycle Assessment of Synthetic Naphtha by CO_2 hydrogenation Technology

Jinjoo An[1] · Kwangwon Lee[2] · Jina Choi[1,‡]
[1]Environment & Sustainable Resources Research Center, Korea Research Institute of Chemical Technology (KRICT)
[2]Enstar R&C Inc.

요 약

본 연구는 전과정평가(LCA)를 활용하여 CCU 기술에 기반한 합성 나프타 생산 시스템의 환경영향을 평가하는데 그 목적이 있다. 본 연구에서는 보다 자세한 환경적 주요 이슈 규명을 위하여 Cradle-to-Gate 관점에서 전과정평가 연구를 수행하였으며, 기존 석유화학 공정에서의 나프타 생산 시스템과의 비교를 통해 환경영향 저감 효과를 확인하였다. 또한 CCU 기술에 기반한 합성 나프타 합성 시스템의 단위공정 분석을 통해 개선 방향을 제안하였다.

주제어: 이산화탄소 전환, 탄소 포집 및 활용, 전과정평가(LCA), 나프타

ABSTRACT: This study aims at evaluating the environmental impacts stemmed from an new synthetic naphtha production system by CO_2 hydrogenation technology, using Life Cycle Assessment (LCA) methodology. In this study, both LCI and LCIA study were conducted with a perspective of cradle-to-gate in order to figure out more detailed environmentally significant issues. For the purpose of making this study easier to be understood, the comparative approach with existing commercial naphtha production system were applied in this study.

Key words: CO_2 Conversion, CCU (Carbon Capture and Utilization), Life Cycle Assesment, Naphtha

1. 서 론

이산화탄소 포집 및 활용(Carbon Capture and Utilization, CCU) 기술은 산업공정 등에서 배출되는 이산화탄소를 포집하여 이를 유용 물질의 원료로 활용하는 기술로써, 기후변화 대응 및 탄소순환경제의 핵심 기술 중 하나이다. 파리협정에 따라 제출된 주요국의 장기 저탄소 발전전략에서도 CCU 기술이 온실가스 감축 및 산업 자원의 효율성을 촉진할 수 있는 주요 기술 전략으로 제시되고 있다.

이산화탄소 포집 및 활용 기술의 적용에 있어 이산화탄소의 사용이 온실가스 감축을 반드시 보장하는 것은 아니므로 기술 전주기를 고려한 전과정평가의 수행이 필요하다. CCU 기술에서 이산화탄소 포집효과 및 유용 자원 생산 대체로 인한 회피효과의 합이 해당기술의 전과정 온실가스 배출 효과보다 클 때만 해당 기술의 온실가스 감축 효과가 있다고 판단할 수 있다. 이와 같은 맥락에서 전 세계적으로 전과정평가를 활용하여 CCU 기술, 또는 CCU 기술적용을 통해 생산되는 이산화탄소 전환 제품의 환경적 편익을 정량화하는 노력이 활발하게 이루어지고 있다. 특히 현재 개발단계에 있는 CCU 기술에 대하여 전과정평가 수행을 통해 기술개발에 따른 환경적 편익을 예측, 비교하고, 이를 기술개발의 우선순위를 결정하거나 기술개발의 방향성을 점검하는 데에 폭넓게 활용하고 있다.

이에 본 연구에서는 현재 연구단계에 있는 이산화탄소 직접 수소화 기술을 적용한 합성 나프타 생산 시스템의 전과정평가를 통하여 해당 CCU 기술의 온실가스 감축효과를 분석하고, 환경성 개선의 기회를 모색하고자 하였다.

본 연구에서는 CCU 기술적 특성이 고려되어 발간된「CCU 기술의 전과정평가 수행 가이드라인」을 활용하여 전과정평가를 수행하였다.[1)]

‡ Corresponding author: 최지나, Tel: 042-860-7396, Email: jchoi@krict.re.kr

2. 이산화탄소 직접 수소화 기술 개요

본 연구는 이산화탄소 직접 수소화 반응을 통하여 합성 나프타를 제조하는 CCU 기술을 대상으로 하였다. 해당 기술은 현재 연구단계에 있는 기술로, 연구자를 대상으로 이산화탄소 수소화 반응의 기초 데이터를 확보하고 이를 토대로 Fig. 1과 같이 상용급 공정 개념설계를 수행하였다. 이산화탄소 수소화 공정의 기본 반응식은 아래와 같다.

$$nCO_2 + 3nH_2 \rightarrow -(CH_2)_n- + 2nH_2O$$

CCU 기술 기반 합성 나프타 생산 시스템은 포집 이산화탄소 및 수소의 촉매 반응을 통하여 합성 나프타(Synthetic Naphtha)를 생산하고, 미반응 가스의 추가 수소 촉매반응을 통하여 합성 가스(Synthetic gas)를 부제품으로 동시에 생산하고, 전체 시스템 효율화를 위하여 폐열회수를 통한 발전 공정을 추가로 포함하여 설계하였다. 설계 규모는 포집 이산화탄소 사용량 기준 연간 약 38만 톤, 합성 나프타 생산량 기준 연간 9만 톤 상용급 플랜트시스템이다.

아울러, 이산화탄소 포집 기술은 국내에서 개발된 포집제인 Kosol을 이용하여 유연탄 화력발전소에서 배출되는 이산화탄소 습식포집 공정을 적용하는 것으로 가정하였다. Kosol을 이용한 이산화탄소 포집기술은 국내 한국전력(전력연구원)에서 개발하고 있는 이산화탄소 포집 기술로 10MW급 파일롯 플랜트 운영 실적을 보유하고 있다. Kosol 흡수제의 주요 조성 물질로는 IPAE (Isopropylamino ehtanol) 및 IPDEA (Isoproplyaminodiethanolamin) 등이 있으며, 이산화탄소 포집 공정은 Kosol 흡수제를 이용하여 발전 배가스에 포함된 이산화탄소의 약 90%를 포집하는 시스템을 기준으로 설계되었다.

3. 전과정평가 수행

3.1 목적 정의

본 연구의 목적은 유연탄 화력발전소에서 포집된 이산화탄소를 원료로 사용하여 합성 나프타를 생산하는 CCU 시스템에 대하여 전과정평가를 수행하여 이산화탄소 직접 수소화 공정에 대한 환경영향을 평가하고, 이를 화석원료 기반의 나프타 생산 시스템에서의 환경영향과 비교하여 개발 단계에 있는 CCU 기술의 환경성 개선 효과를 확인하고자 함에 있다.

3.2 시스템 및 기능단위

본 연구의 대상 시스템은 CCU 기술에 기반한 합성 나프타 생산시스템으로, Table 1과 같이 기능단위는 CCU 기술 적용을 통해 생산된 합성 나프타 1톤으로 정의하였다.

본 CCU 시스템의 경우, 주제품인 합성 나프타 외에 합성 가스 및 전기가 부산물로 생산되며, 이와 같은 부가 기능의 경우 기발간된 「CCU 기술의 전과정평가 수행 가이드라인」[1]에 따라 avoided burden 방법을 적용하였다.

3.3 시스템경계

시스템 경계는 원료를 채취하여 합성 나프타를 생산하는 원료물질부터 제품제조(Cradle to gate)로 정의하였으며, CCU 시스템 확장을 통하여 화력발전소에서의 이산화탄소 포집 공정을 포함하였다. 한편, 실험실 규모의 연구결과인 점을 고려하여 수송은 포함하지 않았다.

3.4 데이터 수집

본 연구의 데이터범주는 일반원칙에 따라 원료물질, 보조물질, 에너지, 제품, 부산물, 대기 및 수계 배출물, 폐기물로 구분하였다. 투입물의 누적질량 기준 95%까지 포함하

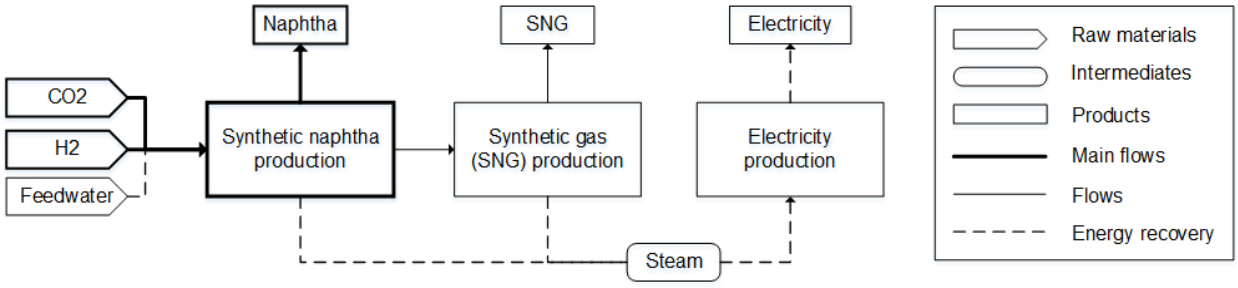

Fig. 1. 이산화탄소 직접 수소화 공정흐름도.

Table 1. 연구대상의 기능 및 기능단위.

구분	CCU 공정	기존 상용 공정
기능	포집된 CO_2와 수소를 전환하여 합성 나프타 (C3+ 화합물) 생산	화석원료를 기반으로 나프타 (C3+ 화합물) 생산
기능단위	합성 나프타 생산	나프타 생산
기준흐름	합성 나프타 1톤	나프타 1톤

Table 2. CCU 기술 기반 합성 나프타의 입산출물 목록 및 활용 DB.

구분				단위	값	DB 출처	DB 명
투입물	원료물질	포집 CO_2		ton	4.23	KRICT	Kosol 기반 유연탄 화력발전소의 CO_2 포집
		H_2		ton	0.60	환경부	수소
	유틸리티 /에너지	용수	보일러용수	ton	0.17	Ecoinvent	Water production and supply, decarbonised, RER
			냉각수	ton	0.90	환경부	공업용수(2013)
산출물	제품	합성 나프타		ton	1.00		
	부산물	합성 가스		ton	0.33	Ecoinvent	Natural gas production, unprocessed, at extraction, GLO
		전기		kWh	141.90	KRICT	Electricity grid mix (2017)
	폐기물	폐수	H_2O	ton	3.42		미반영
	배출물	대기	CO_2	kg	68.67		
			H_2	kg	0.08		
			H_2O	kg	0.54		
			CO	kg	0.08		
			CH_4	kg	1.16		
			C_2H_4	kg	1.46		
			C_2H_6	kg	0.15		
			C3+	kg	4.93		
		수계	보일러용수	ton	0.17		
			냉각수	ton	0.90		

였으며, 상위 및 하위 공정의 기술계 흐름에 대하여는 공개된 일반 데이터를 활용하였다. 데이터베이스(DB)의 선택은 국가 LCI DB를 우선 활용하였으며, 국가 DB가 없을 시 해외 LCI DB를 활용하였다.

이산화탄소 수소화 단위공정에 대해서는 연구자가 제공한 실험실 규모 반응연구 결과를 바탕으로 상용 공정모사기인 Aspen Plus를 활용하여 단위공정 개념설계를 수행하고 자료를 수집하였으며, 최종 대상제품 생산을 위하여 필요한 주변 공정 등도 공정 모사를 통하여 주요 데이터를 확보하였다. 한편, 개발단계의 이산화탄소 수소화 촉매는 내구성 소비재에 해당하며, 촉매의 수명을 상용 촉매 수준으로 가정하였을 때 누적질량 기준에서 제외되어 촉매사용에 따른 환경영향을 고려하지 않았다.

이산화탄소 포집 공정에 대해서는 신규로 확보한 Kosol 흡수제 기반 유연탄 화력발전소 배기가스 중 이산화탄소 포집 공정의 LCI DB를 활용하여 상위 흐름을 연결하였다. 포집 이산화탄소 LCI DB 확보를 위하여 최근 발표된 문헌자료 및 특허 자료 등을 활용하였다.

3.5 전과정 환경영향 평가

환경부 환경성적표지 영향평가 방법론을 사용하여 지구온난화(Global warming), 자원고갈(Adiabatic resource depletion), 산성화(Acidification), 부영양화(Eutrophication), 오존층파괴(Ozon depletion), 광화학적산화물생성(Photochemical ozone creation)의 6대 환경영향을 평가하였다. 목록분석 및 영향평가를 위하여 GREENDELTA 社의 OpenLCA ver. 1.10.1 소프트웨어를 활용하였다.

4. 전과정평가 결과

4.1 전과정목록 분석

Table 2는 이산화탄소 수소화 공정에 기반한 합성 나프타 제품의 입·산출물 목록이다. 약 4.2톤의 포집 이산화탄소가 투입되어 1톤의 합성 나프타를 생산하고, 부산물로 약 0.3톤의 합성 가스 및 142kWh의 전력이 생산된다. 사용 전력은 부산물로 생산한 전력을 통해 충당하고 잔여 전력량만을 표기하였다. 아울러 약 68kg의 미전환된 원료 이산화탄소가 재배출되는 것으로 나타났다.

한편, 비교 전과정평가를 위하여 화석원료 기반 나프타는 다수의 CCU LCA 분석 가이드라인[2,3]에 근거하여 Market 나프타의 LCI DB를 적용하였다. 부산물 중 전기의 avoided burden 접근법[1]을 적용하기 위하여, 2017년 국내 발전원별 비율을 고려해 그리드믹스 전기 LCI DB를 신규 구축하여 적용하였다. 부산물인 합성가스(SNG)는 추출 천연가스 LCI DB를 적용하였다.

4.2 전과정 영향평가 분석

Table 3은 CCU 기술 기반 합성 나프타 생산시스템 및

1) 부산물이 동일 기능을 가지는 기존 생산 제품을 대체(substitute)함으로써 환경적 부담(burden)을 회피(avoided)하는 방법론

Table 3. CCU 시스템 및 기존 시스템의 전과정 영향평가 결과 비교.

영향 범주	단위	기존 시스템 (A)	CCU 시스템 (B)	증감율 (B-A)/A×100
지구온난화(GWP)	kg CO_2 eq.	5.08E+02	-1.12E+03	-321.0%
자원소모(ADP)	kg Sb eq.	2.53E+01	5.35E+01	111.6%
산성화(AP)	kg SO_2 eq.	5.14E+00	7.16E+00	39.5%
부영양화(EP)	kg PO_4^{3-} eq.	9.65E-01	5.18E+00	436.9%
오존층파괴(ODP)	kg CFC-11 eq.	6.84E-04	6.87E-06	-99.0%
광화학적산화물생성(POCP)	kg C_2H_4 eq.	8.70E-01	8.49E-01	-2.4%

Table 4. 국내외 주요 수소 LCI DB와 기술분류.

구분	출처	LCI DB 명	기술분류
개질1	KEITI	나프타 스팀개질 수소	개질/크래킹
개질2	KRICT	NG 개질 수소(분산생산, 자체구축)	개질/크래킹
크래킹1	Ecoinvent	hydrogen cracking, APME	개질/크래킹
부생1	Ecoinvent	2,4-dinitrotoluene production	부생수소
부생2	Ecoinvent	chichibabin amination	부생수소
부생3	Ecoinvent	chichibabin pyridine synthesis	부생수소
부생4	Ecoinvent	dehydrogenation of butan-1,4-diol	부생수소
부생5	Ecoinvent	hydrogen production, gaseous, petroleum refinery operation	부생수소
전해1	Ecoinvent	chlor-alkali electrolysis, diaphragm cell	전기분해
전해2	Ecoinvent	chlor-alkali electrolysis, membrane cell	전기분해
전해3	Ecoinvent	chlor-alkali electrolysis, mercury cell	전기분해
전해4	Ecoinvent	potassium hydroxide production	전기분해

기존 나프타 생산시스템의 6대 환경영향을 보여주고 있다. 지구온난화, 오존층파괴, 광화학적산화물생성 환경영향은 개선되거나 유사한 것으로 나타났으며, 특히 지구온난화 환경영향이 크게 개선되는 것으로 분석되었다. 그러나, 자원소모, 산성화, 부영양화 환경영향은 오히려 증가하는 것으로 나타났다.

지구온난화 영향의 경우, CCU 시스템은 그 자체로 음의 값을 가지고 있어 해당 시스템이 온실가스를 배출하는 것이 아닌 흡수하는 공정인 것으로 분석되었다. 단위공정별 기여도를 분석한 결과, 이산화탄소 수소화 단위공정에서는 온실가스 배출이 증가되나, 포집 이산화탄소를 원료로 사용하였기 때문에 전체적으로 온실가스 감축이 가능한 것으로 분석되었다(Fig. 2). 또한, 합성 가스 및 전기 등의 부산물 생산에 의한 회피 효과도 존재하나 그 기여도는 상대적으로 높지 않은 것으로 분석되었다.

또한, CCU 기술 기반 합성 나프타 생산 시스템을 기존 나프타 생산 시스템과 비교할 경우, 약 1톤의 합성 나프타 생산 시 기존 나프타 생산 시스템 대비 약 1.6톤의 온실가스 감축 효과가 있는 것으로 분석되었다.

한편, 자원고갈의 경우, 이산화탄소 수소화 공정의 기여도가 이산화탄소 포집 공정 대비 매우 큰 것으로 나타났다.

이산화탄소 수소화 단위공정의 온실가스 환경영향에 대한 주요 물질별 기여도를 살펴본 결과, 수소의 환경영향 기여도가 95% 이상인 것으로 분석되었다(Fig. 2). 즉, 포집 이산화탄소를 원료로 활용하여 전환하는 CCU 공정이지만, 또 다른 주요 원료인 수소에 의한 환경영향이 전체 공정에 미치는 정도가 매우 높음을 확인할 수 있었다.

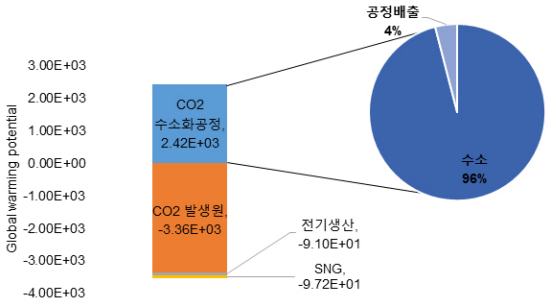

Fig. 2. CCU 시스템 및 CO_2 수소화 단위공정의 지구온난화지수 기여도 분석(kgCO_2eq.).

이산화탄소 수소화 단위공정에서 수소에 의한 지구온난화 기여도가 95% 이상을 차지하고 있음을 고려해 볼 때, 본 CCU 시스템의 환경영향 개선효과를 높이기 위해서는 환경영향이 비교적 낮은 수소 생산경로를 선정하는 것이 매우 중요하다고 볼 수 있다. 이와 같은 점을 고려하여, 국내외 다양한 생산 방식으로 생산된 수소 LCI DB를 활용하여 이산화탄소 수소화 기술에 기반한 합성 나프타 제품의 환경영향을 비교해 보았다. Table 4는 국내외 주요 수소

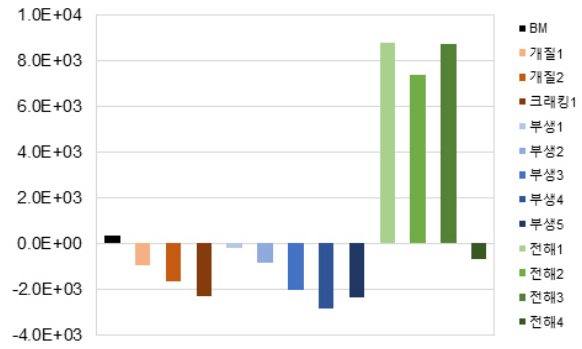

Fig. 3. 수소 생산경로에 따른 CCU 시스템의 지구온난화 지수 ($kgCO_2eq.$).

LCI DB를 정리한 것으로, 현재 국가 LCI DB에서 활용되고 있는 방식인 나프타 스팀 개질 방식 외에 LNG 개질 수소, 부생수소, 수전해 수소에 대한 LCI DB를 적용하였다.

Fig. 3에서 보는 것과 같이 일부 산업 부생수소를 활용하는 경우 기존 시스템(BM) 대비 온실가스 감축 효과가 있는 것으로 나타났고, 반면 수전해를 통해 생산된 수소를 활용할 경우에는 기존 시스템 대비 오히려 환경영향이 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 현재 수전해 수소의 LCI DB는 그리드 전력을 활용한 공정을 기준으로 산출되어 소비 전력에 따른 환경영향이 크기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 유연탄 화력발전소 배가스로 배출되는 이산화탄소를 포집하여 이산화탄소 직접 수소화 공정을 통해 합성 나프타를 생산하는 시스템에 대한 전과정평가를 수행하였다. 이를 위하여 포집 이산화탄소, 최신 그리드 전력에 대한 LCI DB를 신규로 확보, 분석에 활용하였으며, 부산물로 생산되는 합성 가스 및 전기에 대해서는 avoided burden 방식을 적용하여 전과정평가를 수행하였다.

전과정평가 결과 해당 CCU 기술의 적용을 통하여 합성 나프타 1톤 생산 시 약 1.2톤의 온실가스 감축이 가능하며, 기존 석유화학 기반 나프타 생산 시스템과 비교할 경우 약 1.6톤의 온실가스 감축 효과가 있는 것으로 분석되었다. 아울러, 이산화탄소 수소화 단위공정의 물질별 기여도 분석 결과 수소에 의한 영향이 95% 이상으로 매우 높음을 확인할 수 있었으며, 수전해 방식으로 생산된 수소 등과 같이 환경부하가 높은 수소를 원료로 활용할 경우에는 CCU 시스템의 지구온난화 환경영향이 크게 증가하며 기존 나프타 생산 시스템 대비 온실가스 배출이 오히려 증가할 수 있는 것으로 분석되었다.

본 연구는 개발단계 기술의 공정모사를 통한 설계 데이터를 이용하였으므로, 일정한 불확도가 존재한다는 한계점을 가지고 있다. 그러나, 개발단계의 기술에 전과정평가를 적용하여 환경영향 저감 효과를 확인하고, 개선 방향을 제안하고 있다는 점에서 전과정평가의 유용성을 보여주고 있다. 향후 결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 개발단계 기술 전과정평가의 불확도 추정 방법론에 대한 연구도 필요하다.

사 사

본 연구는 과기정통부에서 시행하는 사업의 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다(2020R2A1A1074797).

REFERENCES

1) 한국화학연구원, “CCU 기술 전과정평가 수행 가이드라인” (2019).
2) CO_2 Global Initiative, “Techno-Economic Assessment & Life Cycle Assessment Guideline for CO_2 Utilization” (2018).
3) NETL, “Carbon Dioxide Utilization Life Cycle Analysis Guideline for the U.S. DOE Office of Fossil Energy” (2019).