

화석연료 기반 일산화탄소 생산 공정의 전과정평가: 스팀메탄개질과 부분산화법의 비교

노고산^{1†}, 이수현¹, 권유리^{2,3}, 안진주^{2†}

¹충남대학교 응용화학공학과
²한국화학연구원 화학공정솔루션연구센터
³충남대학교 환경공학과

Life Cycle Assessment of Fossil-Fuel based Carbon Monoxide Production: Comparison of Steam Methane Reforming and Partial Oxidation

Kosan Roh^{1*}, Suhyeon Lee¹, Yuree Kwon^{2,3}, Jinjoo An²

¹Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, Chungnam National University, Korea
²Chemical Process Solution Research Center, Korea Research Institute of Chemical Technology, Korea
³Department of Environmental Engineering, Chungnam National University, Korea

ABSTRACT

This study conducts a life cycle assessment (LCA) to compare two fossil fuel-based carbon monoxide production processes: steam methane reforming (SMR) and partial oxidation (POX). For the SMR process, gate-to-gate data was generated through process simulation, while for the POX process, data retrieved from a commercial lifecycle inventory database was modified and utilized. As a result of the cradle-to-gate LCA conducted for South Korea, the SMR process has a lower impact on global warming (1.24 kg-CO₂ eq/kg-CO) compared to the POX process (2.49 kg-CO₂ eq/kg-CO). However, the POX process shows advantages in terms of abiotic depletion and ozone layer depletion indices. These differences are attributed to the distinct raw materials and energy sources used in each process. Additionally, a future scenario analysis using low-carbon electricity suggests that the POX process could have a lower impact on global warming than the SMR process in the long term.

Key words: carbon monoxide, life cycle assessment, steam methane reforming, partial oxidation, process simulation

요약

본 연구에서는 화석연료 기반의 일산화탄소 생산 공정인 스팀메탄개질(SMR)과 부분산화법(POX)의 환경영향을 비교 분석하기 위한 전과정평가를 수행했다. 두 공정의 환경 영향을 분석하기 위해 SMR 공정의 경우 공정모사를 통해 Gate-to-Gate 데이터를 생산했으며, POX 공정의 경우 상용 전과정 목록 데이터베이스를 수정하여 활용하였다. 국내를 대상으로 Cradle-to-Gate 시스템 경계에 대해 전과정평가를 수행한 결과, SMR 공정(1.24 kg-CO₂ eq/kg-CO)은 지구 온난화 관점에서 POX 공정(2.49 kg-CO₂ eq/kg-CO)보다 유리하였으나, 자원 고갈 및 오존층 파괴 지수에서는 POX 공정이 더 유리한 것으로 분석되었다. 이는 각각의 공정이 사용하는 주요 원료와 에너지원의 차이에서 기인한 것이다. 또한, 미래의 저탄소 전력을 사용하는 시나리오 분석에서는 POX 기반의 일산화탄소 생산 방식이 장기적으로 더 낮은 지구 온난화 효과를 보일 것으로 전망된다.

주제어: 일산화탄소, 전과정평가, 스팀메탄개질, 부분산화법, 공정모사

Date Received: Aug. 16, 2024, Date Revised: Sep. 25, 2024, Date Accepted: Sep. 27, 2024

* Corresponding author: Kosan Roh, Tel: +82-42-821-5684, E-mail: ksroh@cnu.ac.kr

† These authors contributed to this work equally.

© Copyright 2024 The Korean Society for Life Cycle Assessment. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

전 세계 석유화학 업계에서는 플라스틱(4.2억 톤/년)과 비료(1.9억톤/년)를 포함한 다양한 석유화학 제품들을 매년 10억 톤 [1,2] 정도 생산하고 있다. 다양한 석유화학 제품을 생산에 활용되는 핵심 물질 중 하나는 바로 일산화탄소(CO)다. 탄소 원자 하나와 산소 원자 하나로 이뤄진 일산화탄소는 산업적으로 매우 활용도가 높은 화학제품이다. 수성가스 전위반응을 통해 생산 가능한 수소부터, 염소와의 반응을 통해 합성하는 포스겐, 메탄올과의 카보닐화 반응을 통해 합성하는 아세트산, 그 외 개미산, 포름산메틸, 아크릴산, 프로피온산 등 다양한 화학제품 합성 시 일산화탄소를 원료로 활용할 수 있다[3]. 또한, 반도체 공정에서는 일산화탄소를 식각가스로 활용하기도 한다[4].

산업적으로 일산화탄소를 생산하는 방법은 다양하다[3]. 스팀메탄개질(steam methane reforming, SMR), 석탄 가스화, 증유와 같은 탄화수소의 부분산화법(partial oxidation, POX) 등을 통해 수소와 일산화탄소의 혼합물인 합성가스를 생산한 후, 이로부터 일산화탄소를 분리하는 방식이 일반적이다. 또한 개미산의 열분해를 통해 고순도 일산화탄소를 생산할 수도 있다. 한편, 철강공정의 고로가스나 탄화 칼슘 생산 공정에서 발생하는 부생가스로부터 일산화탄소를 회수하는 방식으로 일산화탄소를 생산하는 것도 가능하다.

일산화탄소를 포함한 다양한 석유화학 제품을 생산하는 석유화학 산업은 에너지 다소비 산업 중 하나로, 전세계 천연가스 수요의 9% 그리고 석유 수요의 14%를 차지하고 있다[5]. 그 결과, 전 세계 석유화학 산업으로부터 직간접적으로 배출되는 온실가스의 양은 2020년 기준 약 13억 톤 정도로 추산되고 있다[6]. 이에, 석유화학 산업의 탄소중립 달성을 위해 전 세계 다양한 연구기관과 산업체에서 화석연료 기반의 석유화학 제품생산을 대체할 수 있는 신기술 기술 개발을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 산업적으로 활용도가 높은 일산화탄소 역시 온실가스 배출량이 적은 새로운 방식으로 생산하기 위한 주요 대상 제품 중 하나다. 대표적으로 이산화탄소의 전기화학적 환원[7]과 건식메탄개질을 통해 일산화탄소의 비율이 높은 합성가스를 생산하는 방식[8] 등이 있다. 국내에서도 화석연료 기반의 일산화탄소 생산 방식을 대체하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 현재 국내에서는 액화천연가스의 개질 또는 증유의 POX를 통해 일산화탄소를 산업적으로 생산하고 있는데, 이를 전기화학적 이산화탄소 환원 기술 등을 통해 대체하기 위한 노력을 하고 있다[9,10].

기존의 일산화탄소 생산 방식을 대체할 수 있는 신기술을 개발하는 과정에서 기술 대체를 통해 기대할 수 있는 온실가

스 저감 잠재량을 분석하는 것은 매우 중요하다. 이에, 최근 새로운 일산화탄소 생산 기술에 대한 전과정평가(life cycle assessment, LCA) 등을 통해 기존의 일산화탄소 생산방식 대비 신기술의 환경적 이점을 분석하는 연구도 다양하게 수행되고 있다. 대표적으로, 전기화학적 이산화탄소 환원 기술 [11,12,13,14], 건식메탄개질과 역 수성가스 전위반응을 이용한 방식 [15], 그리고 고로가스로부터 일산화탄소를 분리하는 방식[16] 등을 대상으로 온실가스 배출량 분석이 주로 수행되어 왔다.

기술 대체에 따른 온실가스 저감 잠재량을 정확하게 분석하기 위해서는 신기술뿐만 아니라 기존 기술의 온실가스 배출량 정보도 중요하다. 하지만 기존에 보고되고 있는 화석연료 기반 일산화탄소 생산의 온실가스 배출량은 0.05~2.59 kg-CO₂ eq/kg-CO₂으로, 문헌에 따라 값이 매우 상이한 것을 알 수 있다[12,17,18,19]. 또한, 온실가스 배출량 분석 근거가 명확하게 제시되지 않아 결과의 신뢰성이 낮다. 한편, 국내 일산화탄소 생산에 대한 온실가스 배출량 분석 결과는 거의 보고된 바가 없다. 이는, 일산화탄소가 석유화학제품 산업에서 최종 제품이 아닌 중간 산물로 취급되기 때문이다. 최근 국가 전과정목록 데이터베이스(life cycle inventory database, LCI DB)에서 국내에서 포름산을 원료로 사용하는 일산화탄소 생산 방식의 LCI[19]가 제공되고 있는데, 이를 바탕으로 LCA 수행 시 온실가스 배출량(GWP100a, CML-IA baseline)이 약 7.05 kg-CO₂ eq/kg-CO₂로 산정된다. 하지만 포름산 기반 일산화탄소 생산은 기술적 대표성이 매우 낮으며 LCA 결과 역시 다른 문헌에서 보고하는 값을 크게 상회하여 활용도가 매우 낮다. 이에, 국내에서 화석연료 기반 일산화탄소 생산 방식을 새로운 기술로 대체 시 기대 가능한 환경적 이점을 정략적으로 분석하는 데에 큰 어려움이 있다.

본 연구에서는 국내 대표적인 산업적 일산화탄소 생산 방식인 SMR과 증유의 POX 기반의 일산화탄소 생산공정을 대상으로 LCA를 수행하였다. SMR 기반 일산화탄소 생산 공정의 경우 현재 공개되어 있는 LCI가 부재하므로 공정모사를 통해 SMR 공정의 Gate-to-Gate(GtoG) 데이터를 확보했다. POX 공정의 경우 Ecoinvent에서 제공하는 증유의 POX 기반 일산화탄소 생산 공정의 GtoG 데이터를 활용했다. SMR 및 POX 공정의 LCA를 통해 국내 생산 관점으로 세 가지의 전 지구적 환경영향 카테고리(지구온난화, 자원고갈, 오존층파괴)를 비교 분석했다.

2. 대상 공정 설명

SMR 기반의 일산화탄소 생산 공정은 Fig. 1(a)와 같다.

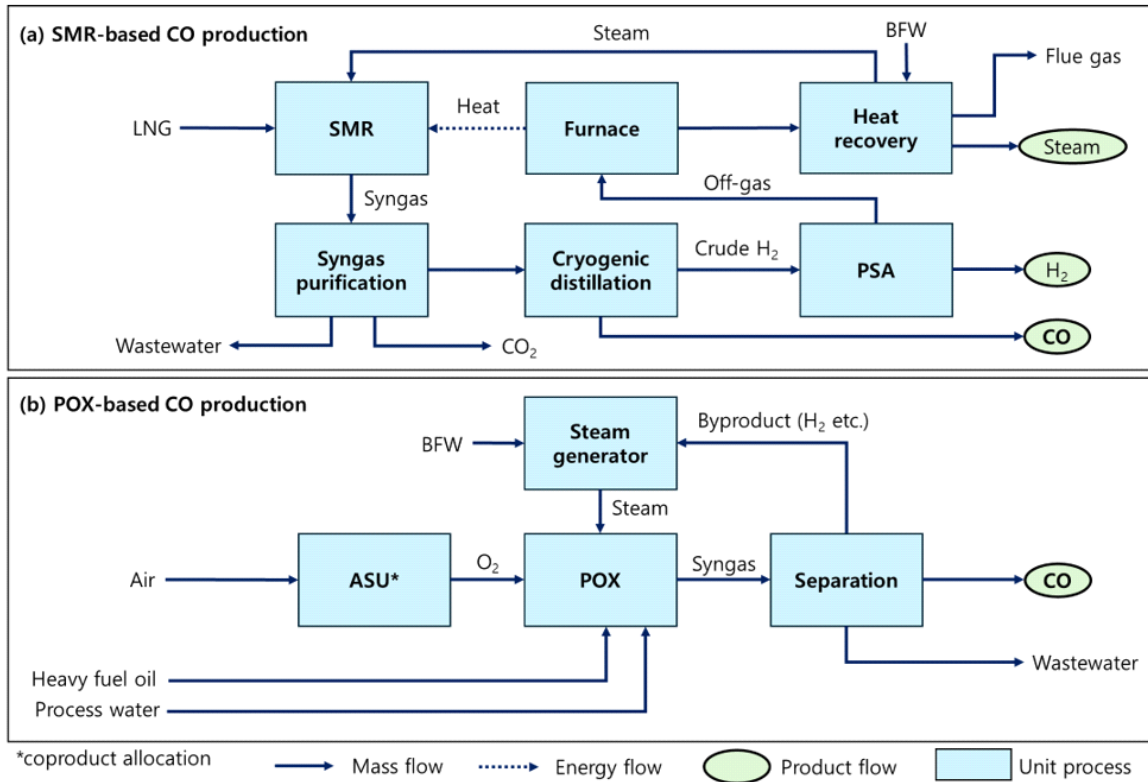


Fig. 1. Block flow diagrams of (a) SMR-based and (b) POX-based carbon monoxide plants.

SMR 공정에서는 액화천연가스(liquid natural gas, LNG)와 물의 SMR 반응($\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}$)을 통해 수소와 일산화탄소의 혼합물인 합성가스를 생산한다. 그리고 합성가스로부터 물과 이산화탄소를 분리하여 건조 합성가스를 생산한다. 이후, 극저온 분별증류(cryogenic distillation)를 통해 합성가스는 일산화탄소, 수소, 그리고 부생가스로 분리된다. 수소는 압력스윙흡착(pressure swing adsorption, PSA)을 통해 고순도로 정제되어 판매된다. 부생가스는 연소되어 SMR 반응에 필요한 열에너지 공급과 스팀 생산에 활용된다. 생산된 스팀 증 공정 내부에서 소비되고 남은 스팀은 판매한다.

POX 기반 일산화탄소 생산 공정은 Fig. 1(b)와 같다. POX 공정에서는 정유공장에서 발생하는 증유와 산소의 POX 반응($\text{C}_n\text{H}_m + 0.5n\text{O}_2 \rightarrow n\text{CO} + 0.5m\text{H}_2$)을 통해 합성가스를 생산한다. 일산화탄소 제품은 생산된 합성가스의 분리정제를 통해 생산되며, 수소 부산물은 전량 연소 후 공정 내부에서 소비된다.

3. 연구 방법

본 연구에서는 ISO 14040/14044[21,22]에 의거하여 SMR 및 POX 기반 일산화탄소 생산을 대상으로 4단계(목적 및 범

위 정의, 전과정 목록 분석, 전과정 영향 평가, 전과정 해석)에 걸쳐서 LCA를 수행했다.

3.1. 목적 및 범위 정의

본 LCA의 수행 목적은 국내 기준 화석연료 기반의 두 가지 일산화탄소 생산 방법(SMR, POX)의 환경영향을 분석하고, 신규 일산화탄소 생산 기술 도입에 따른 환경영향 개선 효과 분석에 활용하는 것이 주된 목적이다. 기능 단위 및 기준 흐름은 일산화탄소 1 kg이며, 시스템 경계(Fig. 2)는 제조 전단계(원료물질 채취 및 수송)와 제조 단계를 포함하는 Cradle-to-Gate(CtoG)다. SMR 공정의 경우 일산화탄소뿐만 아니라 수소와 스팀이 함께 부산물로 생산되는 다중산출 시스템이므로 경제적 할당을 적용했다. 데이터 품질요건의 경우, 이차 데이터(SMR 공정은 공정모사 결과, POX 공정은 Ecoinvent LCI DB 참고)를 활용하여 LCA를 수행했다. SMR 공정의 공정모사는 일차원리(first-principle) 모형을 바탕으로 상용 공정의 공정흐름도 참고하여 수행하여 해당 GtoG 데이터의 신뢰성을 확보했다. SMR 및 POX 공정 모두 국내에서 가동된다고 가정했으며, 그에 따라 상위 흐름 공정에 대해서 국내 LCI DB를

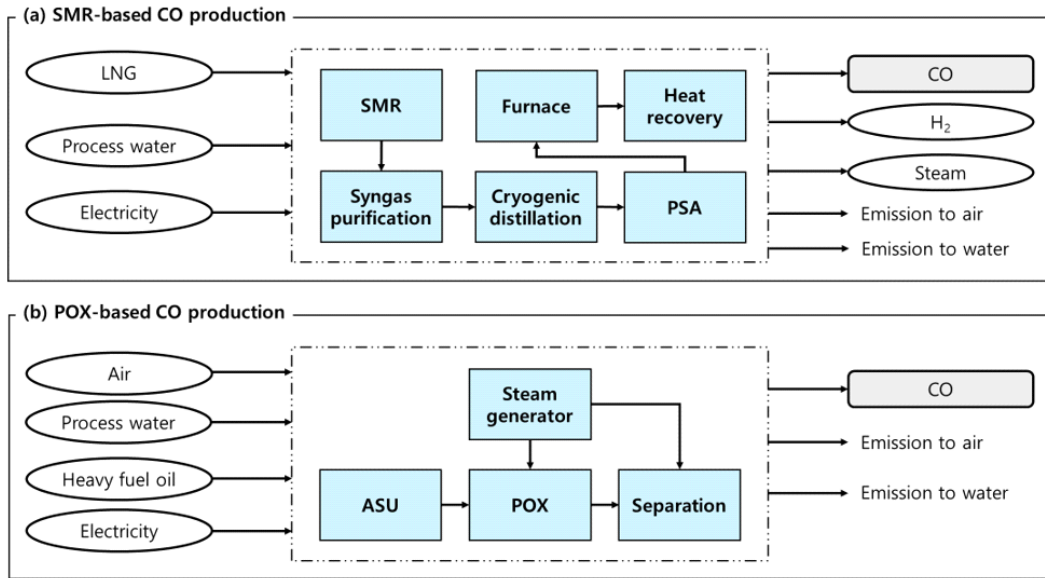


Fig. 2. System boundary of (a) SMR-based and (b) POX-based carbon monoxide production.

우선적으로 사용하였다. 데이터 범주의 경우, 원료물질, 보조 물질, 에너지/유틸리티, 제품, 부산물, 대기 및 수계 배출물, 폐기물로 구분했으며, 공정의 건설은 본 연구에서는 제외했다. SMR 공정의 경우 공정모사 결과를, POX 공정의 경우 1997~2023년에 해당하는 GtoG 데이터[23]를 사용하므로 시간적 범위는 일치하지 않는다. 영향평가 방법론은 CML-IA baseline을 적용했으며, 영향 범주와 지표로서 보편적으로 많이 분석 및 참조되는 지구온난화(GWP100a), 자원고갈, 그리고 오존층파괴를 분석했다.

3.2. 전과정 목록 분석

SMR 기반 일산화탄소 생산 공정의 LCI는 국가 LCI DB나 Ecoinvent 및 Sphera LCA를 포함하는 상용 LCI DB에서 제공하지 않는다. 대안으로, 상용 공정모사기를 활용하여 SMR 기반 일산화탄소 생산 공정을 설계하여 GtoG 데이터를 확보했다. SMR 기반 일산화탄소 생산 공정의 공정흐름도는 Fig. 3과 같다. 일산화탄소 생산 용량은 연 30만 톤 규모이며, 일산화탄소 제품의 순도는 99.1 wt.%다.

SMR 반응기(섭씨 950도, 20 bar)는 평형 반응기 모형을 활용하여 모사했으며, 합성가스 정제에는 3차 아민 중 하나인 N-methyldiethanolamine(MDEA)에 piperazine 첨가제를 추가한 activated MDEA(aMDEA) 용액 기반 아민 탈거와 온도 스윙흡착(temperature swing adsorption, TSA)을 적용하여 합성가스로부터 이산화탄소와 물을 제거했다. 건조 합성가스는 열교환기를 통해 영하 섭씨 200도 수준까지 냉각된 후 분별증

류를 통해 일산화탄소(회수율 91%), 수소, 그리고 메탄이 포함된 부생가스로 분리된다. 분리된 수소 중 58.5%는 PSA를 통한 추가적인 정제(수소 회수율 85% 가정)를 통해 연료전지에 투입 가능한 수준의 고순도 제품으로 변환된다. 극저온 분리공정과 PSA에서 얻어진 부생가스는 SMR 가열로에 투입되어 SMR 반응에 필요한 열에너지 공급에 활용된다. 이후, 뜨거운 배가스의 현열을 이용하여 고압 및 저압 스팀을 생산한다. 고압 스팀은 SMR 반응기의 원료로 투입되며, 저압 스팀은 아민 탈거 장치 내 탈거탑의 열원으로 활용된다. 남은 고압 스팀은 판매된다. 열역학 모형의 경우, 아민 탈거 장치에는 Electrolyte NRTL(non-random two liquid) 모형을, 스팀 생산 장치에는 ASME 1967 기반의 모형을, 그리고 나머지 장치에는 NRTL을 적용했다.

공정모사를 통해 계산한 물질 및 에너지 수치 결과를 바탕으로 SMR 기반 CO 생산 공정의 GtoG 데이터를 계산했다 (Table 1). 대부분의 전기에너지는 극저온 분별증류 과정에서 냉각에너지 공급에 소모된다. 공정 내에서 이산화탄소 직접 배출이 발생하는 것을 알 수 있으며, 이는 합성가스에 포함되어 있던 이산화탄소와 부생가스 연소로 발생한 배기가스 내 이산화탄소로 구성된다.

확보된 SMR 및 POX 기반 일산화탄소 생산 공정의 GtoG 데이터에 원료, 유틸리티, 폐기물에 대응되는 상위 및 하위흐름의 LCI를 연결하여 CtoG 시스템 경계에 해당하는 LCI 분석을 수행했다. POX 기반 일산화탄소 생산 공정과 POX 반응에 필요한 순산소 공급을 위한 공기분리장치(air separation

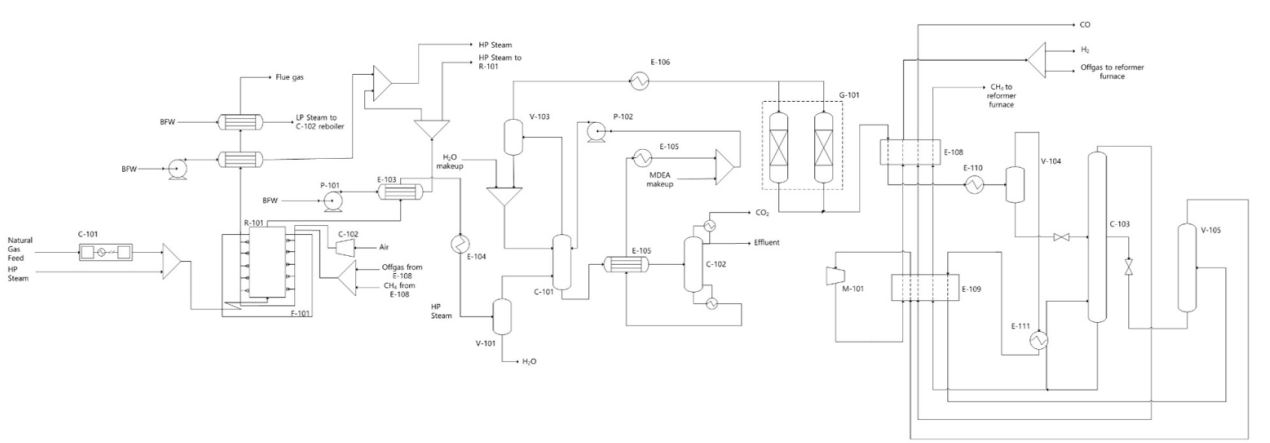


Fig. 3. Process flow diagram of the SMR-based carbon monoxide plant. H₂ PSA unit is omitted.

Table 1. Gate-to-Gate data of the SMR-based carbon monoxide plant calculated by process simulation. The functional unit is 1 kg of CO

Specification	Category	Name	Unit	Value
Input	Raw material	Liquid natural gas	kg	0.849
	Raw material	Process water	kg	22.3
	Energy	Electricity	MJ	1.969
Output	Product	Carbon monoxide	kg	1.00
	Byproduct	Hydrogen	kg	0.213
	Byproduct	High-pressure steam	MJ	3.901
Emission	To water	Wastewater	kg	0.441
	To air	Carbon dioxide	kg	0.466

unit, ASU)의 GtoG 데이터는 Ecoinvent LCI DB[23]를 참고했다. 두 공정의 GtoG 데이터와 상위 및 하위흐름에 대한 LCI에 대한 정보는 Table 2와 같다.

SMR 기반 일산화탄소 생산 공정은 일산화탄소뿐만 아니라 수소와 스팀이 부산물로 생산되는 다중산출물 시스템이므로 할당을 적용했다. 제품의 가격 차이가 크기 때문에 경제적 할당을 적용하여 LCA를 수행했다. 각 제품의 국내 시장가격과 공정모사 결과를 바탕으로 도출된 할당계수는 Table 3과 같다.

3.3. 전과정 영향 평가

전과정 목록 분석 결과를 바탕으로 전과정 영향평가를 수행했다. CML-IA baseline 영향평가 방법론을 적용하여 두 일산화탄소 생산 방식의 지구 온난화, 자원 고갈, 그리고 오존층 파괴 지수를 분석했다. 그리고 향후 국내 전력망의 재생발전 비중이 점진적으로 증가할 것을 고려하여, 미래 저탄소 전기를

사용하는 시나리오 분석(2050년)을 수행했다.

4. 결과 및 고찰

전과정 영향 평가 결과는 Fig. 4와 같다. 지구 온난화 지수 관점에서는 SMR 방식이, 자원 고갈 및 오존층 파괴 지수 관점에서는 POX 방식이 더 유리한 것을 알 수 있다.

SMR 기반 일산화탄소 생산 방식의 지구 온난화 지수는 POX의 경우 대비 약 49.7% 수준으로 분석되었다. 온실가스 직접배출의 경우, SMR 기반 일산화탄소 생산 공정에서는 연료 연소의 결과로 0.466 kg-CO₂ eq/kg-CO이 발생하는 한편, POX 기반 일산화탄소 생산 공정의 경우 수소 부산물을 전량 에너지원으로 사용하므로 온실가스 직접배출이 발생하지 않는다. 온실가스 간접배출의 경우, POX 기반 일산화탄소 생산 시 3.92 kWh/kg-CO의 전기를 소비하여 간접배출이 과다(2.08

Table 2. List of the life cycle inventory taken from LCI DB (Ecoinvent v3.10 Cutoff)

Name	Geography	Time period	Note	Reference product	Ref.
Oxygen	South Korea ¹⁾	1997-2023	Industrial gases production, cryogenic air separation	Oxygen liquid	[23]
Carbon monoxide	South Korea ¹⁾	1997-2023	Carbon monoxide production	Carbon monoxide	[23]
Liquid natural gas	South Korea	2021	Natural gas to consumer	Liquid natural gas	[24]
Power grid mix	South Korea	2022-2025	Electricity, market mix, including transmission and distribution losses; consumption mix, to consumer	Electricity	[20]
Heavy fuel oil	RoW	2014-2023	Heavy fuel oil production, petroleum refinery operation	Heavy fuel oil	[23]
Process water	South Korea	2022-2025	Industrial water, Production mix, production mix, at plant	Industrial water	[20]
Wastewater	RoW	2010-2023	Treatment of wastewater, average	Wastewater, average	[23]

¹⁾ GtoG data is retrieved from Ecoinvent v3.10 and modified by applying geographically representative background LCI.

Table 3. Allocation factors of three products at the SMR-based carbon monoxide plant

Specification	Carbon monoxide	Hydrogen	Steam
Allocation factor	0.77	0.14	0.09

kg-CO₂ eq/kg-CO)한 반면, SMR 기반 일산화탄소 시 0.547 kWh/kg-CO의 전기만을 소비하여 온실가스 간접배출량이 적다(0.224 kg-CO₂ eq/kg-CO).

자원 고갈과 오존층 파괴 지수의 경우, POX 기반 일산화탄소 생산이 SMR 기반 생산보다 각각 11.2%, 70.2% 낮은 것을 알 수 있다. SMR 반응의 주 원료인 LNG의 자원 고갈 지수 (1.4610⁻⁶ kg-Sb eq)가 증유(3.8610⁻⁷ kg-Sb eq)나 산업용 전기(2.3610⁻⁷ kg-Sb eq) 등에 비해 매우 크기 때문에 SMR 기반 일산화탄소 생산의 자원 고갈 지수가 큰 것으로 분석된다.

LNG의 오존층 파괴 지수(1.0710⁻⁷ kg-CFC-11 eq) 역시 증유 (3.7610⁻⁸ kg-CFC-11 eq)나 산업용 전기(5.4210⁻¹⁰ kg-CFC-11 eq)에 비해 크기 때문에 SMR 기반 일산화탄소 생산의 오존층 파괴 지수 역시 POX 방식 대비 큰 것으로 나타난다.

SMR 및 POX 기반 일산화탄소 생산방식 모두 전기를 소모함에 따라 간접적인 환경영향이 발생한다. 국내 탄소중립 시나리오에 따르면, 2021년 기준 0.529 kg-CO₂ eq/kWh[20]인 국내 산업용 전기의 지구 온난화 지수가 2050년에는 탄소중립 시나리오 B안을 기준으로 0.0879 kg-CO₂ eq/kWh[25]까지 낮아질 것으로 전망된다. 2050년을 기준으로 두 일산화탄소 생산 방식의 지구 온난화 지수는 각각 1.05 kg-CO₂ eq/kg-CO와 0.756 kg-CO₂ eq/kg-CO로, 2021년 대비 각각 15.1%, 69.6% 감소한다. POX 기반 일산화탄소 생산 방식의 전기소비량이 SMR 기반 전기소비량의 약 7.17배 많으므로, 전기의 지구 온

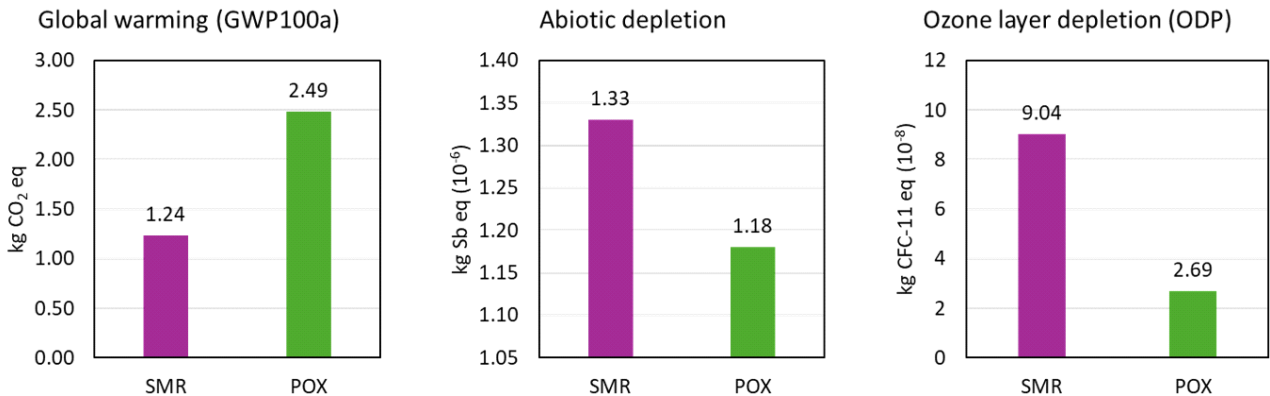


Fig. 4. Life cycle impact assessment results.

난화 지수 감소의 영향을 크게 받는 것을 알 수 있다. 이에, 전기화학적 일산화탄소 환원이나 건식메탄개질 등 신규 일산화탄소 생산기술로 기존 일산화탄소 생산 기술 대체 시, 단기적으로는 POX 기반 생산 방식을, 장기적으로는 SMR 기반 생산방식을 대체하는 것을 목표로 하는 것이 효과적일 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 화석연료 기반의 두 가지 일산화탄소 생산 방식(스팀메탄개질 및 부분산화법)에 대한 전과정평가를 수행했다. 스팀메탄개질과 부분산화법 기반의 일산화탄소 생산 공정의 Gate-to-Gate 데이터는 각각 공정모사와 문헌조사(상용 전과정목록 데이터베이스)를 통해 확보했다. 국내에서의 일산화탄소 생산을 가정하고 전과정평가를 수행한 결과, 지구 온난화 관점에서는 스팀메탄개질 방법이, 자원 고갈 및 오존층 파괴 관점에서는 부분산화법이 환경적으로 더 나은 것으로 분석되었다. 이는 각 생산 방법의 주요 원료 및 에너지원의 차이에서 비롯되었다. 또한, 국내 전력망의 재생발전 비중이 극대화될 2050년에는 전기 소비량이 상대적으로 많은 부분산화법 기반의 일산화탄소 생산의 지구 온난화 지수가 스팀메탄개질 방법보다 낮아질 것으로 전망된다. 본 전과정평가를 통해 도출된 두 가지 일산화탄소 생산 방법의 환경영향 분석 결과는 국내에서 신규 일산화탄소 생산 기술의 기술 대체에 따른 환경적 이점을 정량적으로 분석하는 데에 유용한 참고자료가 될 것으로 기대된다.

사 사

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 Carbon-to-X 기술개발사업(과제번호: 2020M3H7A1096361, 2020M3H7A1096364)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

1. Independent Commodity Intelligence Services. ICIS supply and demand database. Independent Commodity Intelligence Services: Sutton (2021). Available from: <https://www.icis.com/explore/services/analytics/supply-demand-data> (accessed 11 August 2024).
2. International Fertilizer Association. IFASTAT databases. International Fertilizer Association: Paris (2021). Available from: <https://www.ifastat.org/databases> (accessed 11 August 2024).
3. Bierhals, J. Carbon monoxide. In Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Germany. pp. 565–582 (2001). Available from: https://doi.org/10.1002/14356007.a05_203 (accessed 11 August 2024).
4. Bae, J.I. CO for semiconductors demand rises, domestic production in earnest. e4ds news: Korea (2021). Available from: https://www.e4ds.com/sub_view.asp?ch=5&t=0&idx=13348 (accessed 11 August 2024).
5. Meng, F., Wagner, A., Kremer, A.B., Kanazawa, D., Leung, J.J., Goult, P., Guan, M., Herrmann, S., Speelman, E., Sauter, P., Lingeswaran, S., Stuchtey, M.M., Hansen, K., Masanet, E., Serrenho, A.C., Ishii, N., Kikuchi, Y., Cullen, J.M. Planet-compatible pathways for transitioning the chemical industry. Proceedings of the National Academy of Sciences 120(8), e2218294120 (2023).
6. Cullen, L., Meng, F., Lupton, R., Cullen, J.M. Reducing uncertainties in greenhouse emissions from chemical production. Nature Chemical Engineering 1, pp. 311–322 (2024).
7. Kim, K., Lee, W.H., Na, J., Hwang, Y.J., Oh, H.S., Lee, U. Data-driven pilot optimization for electrochemical CO mass production. Journal of Materials Chemistry A 8(33), pp. 16943–16950 (2020).
8. Noureldin, M.M.B., Elbashir, N.O., Gabriel, K.J., El-Halwagi, M.M.A. Process integration approach to the assessment of CO₂ fixation through dry reforming. ACS Sustainable Chemistry & Engineering 3, pp. 625–636 (2015).
9. Park, S.Y. LG Chem-KIST develops reactor to produce carbon monoxide from carbon dioxide. Kyunghyang Newspaper: Korea (2022). Available from: <https://www.khan.co.kr/economy/economy-general/article/202205090852011> (accessed 11 August 2024).
10. Kim, H.K. SK Innotek succeeds in mass production of carbon dioxide to carbon monoxide conversion. Hankyung ESG: Korea (2023). Available from: <https://www.hankyung.com/article/2023120306741> (accessed 11 August 2024).
11. Chae, S.Y., Lee, S.Y., Han, S.G., Kim, H., Ko, J., Park, S., Joo, O.S., Kim, D., Kang, Y., Lee, U., Hwang, Y.J.,

- Min, B.K. A perspective on practical solar-to-carbon monoxide production devices with economic evaluation. *Sustainable Energy & Fuels* 4(1), pp. 199–212 (2019).
12. Lee, J., Lee, W., Ryu, K.H., Park, J., Lee, H., Lee, J.H., Park, K.T. Catholyte-free electroreduction of CO₂ for sustainable production of CO: concept, process development, techno-economic analysis, and CO₂ reduction assessment. *Green Chemistry* 23(6), pp. 2397–2410 (2021).
 13. Kim, J., Ha, T.H., Kim, J., Jeong, G.H., Kim, S.O., Chung, W., Roh, K., Lee, J.H., Oh, J. Design principles for selective and economical CO₂ electrolysis in acids. *Applied Catalysis B: Environmental* 339, p. 123160 (2023).
 14. Roh, K. Life cycle assessment of carbon monoxide production via electrochemical CO₂ reduction: analysis of greenhouse gas reduction potential. *Clean Technologies* 28(1), pp. 9–17 (2022).
 15. Sternberg, A., Jens, C., Bardow, A. Life cycle assessment of CO₂-based C1-chemicals. *Green Chemistry* 19(9), pp. 2244–2259 (2017).
 16. Hense, J., Bachmann, M., Polte, L., von der Aben, N., Jupke, A. Integrated process design and life cycle assessment of carbon monoxide provision from basic oxygen furnace gas. *Chemie Ingenieur Technik* 94(10), pp. 1524–1535 (2022).
 17. Luna, P.D., Hahn, C., Higgins, D., Jaffer, S.A., Jaramillo, T.F., Sargent, E.H. What would it take for renewably powered electrosynthesis to displace petrochemical processes? *Science* 364(6438), p. eaav3506 (2019).
 18. Teuner, C., Neumann, P., Linde, F. CO through CO₂ reforming: The Calcor Standard and Calcor Economy Processes. *Oil & Gas European Magazine* 27(3), pp. 44–46 (2001).
 19. Medrano-Garcia, J.D., Ruiz-Femenia, R., Caballero, J.A. Optimal carbon dioxide and hydrogen utilization in carbon monoxide production. *Journal of CO₂ Utilization* 34, pp. 215–230 (2019).
 20. Global LCA Data Access (GLAD). Korea: Environmental Industry and Technology. Available from: <https://www.globallcadataaccess.org/> (accessed 8 August 2024).
 21. International Organization for Standardization. ISO 14040:2006. International Organization for Standardization: Geneva (2006). Available from: <https://www.iso.org/standard/37456.html> (accessed 11 August 2024).
 22. International Organization for Standardization. ISO 14044:2006. International Organization for Standardization: Geneva (2006). Available from: <https://www.iso.org/standard/38498.html> (accessed 11 August 2024).
 23. Ecoinvent v3.10. Ecoinvent: Switzerland (2003). Available from: <https://ecoinvent.org/> (accessed 11 August 2024).
 24. Maqbool, W., Kwon, Y., Im, M., An, J. Toward sustainable recycled methanol production from CO₂ and steel by-product gases in South Korea: process design and assessment. *Energy* 301, p. 131620 (2024).
 25. An, J., Kwon, Y. Development of life cycle inventory database and GHG reduction scenarios of carbon to X technologies. Korea Research Institute of Chemical Technology: Daejeon. Project No.: 2020M3H7A1096 364 (2024).