

## 원료 전환에 따른 Fischer-Tropsch 연료 생산 공정의 온실가스 배출 특성 분석

김란희<sup>1</sup>, 권민경<sup>1</sup>, 최종화<sup>1</sup>, 류정령<sup>1</sup>, 정해권<sup>2</sup>, 김지용<sup>2</sup>, 김신<sup>3</sup>, 김형찬<sup>1\*</sup><sup>1</sup>에코네트웍(주), <sup>2</sup>성균관대학교 화학공학과, <sup>3</sup>한국석유관리원 미래기술연구소

## Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics of Fischer-Tropsch Fuel Production Processes under Feedstock Substitution

Ranhui Kim<sup>1</sup>, Minkyung Kwon<sup>1</sup>, Jonghwa Choi<sup>1</sup>, Jeongryung Ryu<sup>1</sup>, Hegwon Chung<sup>2</sup>, Jiyong Kim<sup>2</sup>, Shin Kim<sup>3</sup>, Hyoungchan Kim<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Econetwork Co.,Ltd, Korea, <sup>2</sup>School of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University, Korea,<sup>3</sup>Principal Researcher, Research Institute of Future Technology, Korea Petroleum Quality & Distribution Authority, Korea

## ABSTRACT

As global temperature rise exceeds 1.5°C and climate change intensifies, achieving carbon neutrality has emerged as an urgent challenge, and carbon capture and utilization (CCU) has attracted increasing attention as a key strategy for the transition toward net-zero emissions. This study quantitatively compares greenhouse gas (GHG) emission characteristics of Fischer-Tropsch (FT)-based diesel production processes under feedstock substitution, using natural gas and CCU-derived captured CO<sub>2</sub> as alternative inputs, within a gate-to-gate system boundary. The gate-to-gate approach was adopted to isolate and evaluate the impact of feedstock substitution and process configuration on emissions within the fuel production stage, excluding upstream and downstream influences. Aspen Plus-based process simulations were employed to establish a conventional natural gas-based FT process as the reference case, and four scenarios were developed, including captured CO<sub>2</sub> utilization, additional CO<sub>2</sub> recovery within the process, combined heat and power (CHP) integration, and an integrated configuration. The results indicate that feedstock substitution and process configuration significantly alter the emission structure of FT fuel production, with energy consumption—particularly electricity and steam—identified as the dominant contributor to total emissions. Scenarios applying captured CO<sub>2</sub> as feedstock (Scenarios 1 and 2) reduced the contribution of direct process emissions (Scope 1) to approximately 5% and 1%, respectively; however, increased electricity and steam demand led to an expanded share of indirect emissions (Scope 2). The CHP-integrated scenario (Scenario 3) achieved the lowest overall emissions by minimizing external energy dependence through internal energy self-sufficiency. In contrast, the fully integrated scenario (Scenario 4) exhibited increased emissions due to higher process complexity and additional energy requirements. While the gate-to-gate framework enables a focused assessment of process-level emission characteristics, it does not capture emissions associated with upstream feedstock production, CO<sub>2</sub> capture, energy supply, or downstream fuel use. Therefore, future work should extend this analysis to a full life cycle assessment (LCA) to comprehensively evaluate system-wide emission impacts and the overall implications of feedstock substitution.

**Key words:** carbon capture utilization (CCU), GHGs reduction, CO<sub>2</sub> reduction, Fischer-Tropsch, LCA

Date Received: Feb. 24, 2026, Date Revised: Feb. 27, 2026, Date Accepted: Apr. 30, 2026

\* Corresponding author : Hyoungchan Kim, Tel: +82-2-504-1233, E-mail: hckim@econetwork.com

© Copyright 2026 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.

## 요약

지구 평균기온 상승이 1.5 °C를 넘어 기후변화가 심화됨에 따라 탄소중립 달성이 시급한 과제로 대두되고 있으며, 주요 온실가스 저감 기술 중 하나인 탄소 포집 및 활용(Carbon Capture and Utilization, CCU)은 넷제로 전환을 위한 핵심 전략으로 주목받고 있다. 본 연구는 FT(Fischer-Tropsch) 합성 기반 디젤 생산 공정을 대상으로, 천연가스와 CCU 기반 포집 CO<sub>2</sub>를 각각 원료로 적용한 경우의 공정 내부 온실가스 배출 특성을 gate-to-gate 시스템 경계에서 정량적으로 비교·분석하였다. Gate-to-gate 접근법은 연료 생산 단계에 한정하여 원료 전환 및 공정 구성 변화가 배출 특성에 미치는 영향을 집중적으로 평가하기 위해 적용되었으며, 원료 생산 및 연료 사용 등 공정 외부 단계의 영향은 제외하였다. Aspen Plus 기반 공정모사를 활용하여 기존 천연가스 기반 FT 공정을 기준 시나리오로 설정하고, 포집 CO<sub>2</sub> 적용, 공정 내 CO<sub>2</sub> 회수, 열병합발전(CHP) 도입 및 통합 공정을 포함한 총 네 가지 시나리오를 구성하였다. 분석 결과, 원료 전환과 공정 구성 변화에 따라 FT 연료 생산 단계의 배출 구조가 크게 달라지는 것으로 나타났으며, 특히 전력 및 스팀 소비를 포함한 에너지 사용 특성이 총 배출량을 지배하는 주요 요인으로 확인되었다. 포집 CO<sub>2</sub>를 원료로 적용한 시나리오 1과 공정 내 발생 CO<sub>2</sub>를 추가 회수한 시나리오 2는 FT 공정 내 Scope 1의 기여도를 각각 약 5% 및 1% 수준으로 낮추는 반면, 전력 및 스팀 사용 증가로 인해 Scope 2의 비중이 확대되었다. CHP를 도입한 시나리오 3은 공정 내부 에너지 자급을 통해 외부 에너지 의존도를 최소화함으로써 모든 시나리오 중 가장 낮은 총 배출량을 나타냈다. 반면, CO<sub>2</sub> 포집, CHP 운영 및 CO<sub>2</sub> 재투입을 모두 통합한 시나리오 4는 공정 복잡성 증가와 추가 에너지 소비로 인해 오히려 배출량이 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구는 FT 합성 기반 연료 생산 공정에서 원료 구성, 에너지 공급 방식 및 공정 내 에너지 회수 전략이 온실가스 배출 특성을 결정하는 핵심 요인임을 정량적으로 제시하였다. 다만, 본 연구는 gate-to-gate 시스템 경계에 기반한 분석으로서 원료 생산, CO<sub>2</sub> 포집, 에너지 공급 및 연료 사용 단계에서의 배출은 반영하지 못하는 한계를 가진다. 따라서 향후 연구에서는 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)를 통해 원료 전환에 따른 시스템 전반의 배출 구조를 보다 종합적으로 평가할 필요가 있다.

**주제어:** 탄소 포집 및 활용, 온실가스 감축, 이산화탄소 저감, FT 공정, 전과정평가

### 1. 서론

지구 평균 기온은 현재 1.5°C 이내이지만, 2024년 한 해를 관측하였을 때 전 지구 온도가 1.55°C까지 상승한 것으로 나타났다[1]. 이에 기후변화 대응과 탄소중립 실현은 전 세계가 직면한 가장 중대한 과제 중 하나이다. 산업화 이전 대비 지구 평균 기온 상승을 1.5°C 이내로 제한하기 위해 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)는 2030년까지 2019년 대비 전 세계 온실가스 배출량을 43% 감축하고, 2050년까지 순 배출량이 'zero' 수준에도 달하여야 한다고 제안하였다[2]. 이와 같은 전 지구적 기후위기 대응 흐름 속에서 모든 산업 부문에서의 구조적 전환이 요구되고 있으며, 산업 전반에 걸친 탈탄소 전환은 선택이 아닌 필수 과제가 되었다. 국제에너지기구(IEA, International Energy Agency)가 2023년에 발표한 분석에 따르면, 현재까지 상용화된 감축 기술만으로는 전체 온실가스 감축 목표의 약 25% 수준만을 달성할 수 있으며, 남은 75%는 아직 상용화되지 않았거나 기술적 적용 범위가 제한된 혁신 기술에 의존해야 하는 상황이다[3]. 이러한 기술 격차를 해소하고 2050년 탄소중립 목표를 달성하기 위해, IEA는 전기화(electrification), 수소(hydrogen), 바이오에너지(bioenergy), 그리고 탄소포집·활

용·저장(CCUS, carbon capture, utilization and storage, 이하 CCUS) 기술을 4대 핵심 수단으로 제시하고 있다[4]. 이 중에서도 CCUS는 전체 감축 기여도에서 25% 이상을 담당할 것으로 전망되며, 특히 중장기적 감축 목표 달성을 위한 핵심 기술 중 하나로 부각되고 있다. CCUS 기술은 산업공정, 전력 생산, 수소 제조 등 다양한 분야에 적용 가능하며, 특히 중장기적 감축 목표 달성의 핵심 기술로 간주되고 있다.

이와 같은 전 지구적 전환의 흐름 속에서 정유 공정은 고탄소 배출 산업 부문 중에서도 높은 감축 잠재력을 가진 부문으로 주목받고 있다[5]. 정유 공정은 원유를 정제하여 휘발유, 디젤, 나프타 등의 제품을 생산하는 고 에너지 소비 공정으로, 이 과정에서 다량의 온실가스가 배출되고 있다[6]. 이 중 대부분은 미 활용된 채 배출되고 있어, 이를 포집하여 합성 연료를 생산하는 기술 적용 가능성이 매우 높다. 한편, 탄소 포집 및 활용(carbon capture and utilization, 이하 CCU) 기술을 적용하는 공정에서 각종 원료 및 에너지 투입으로 인한 온실가스 배출이 발생할 수 있는데, 미활용 탄소의 활용을 통한 온실가스 배출 감축 잠재력을 실현하기 위해서는 CCU 기술 적용 공정 운영 과정에서의 온실가스 배출을 최소화하는 것이 매우 중요하다.

이에 본 연구는 FT(fischer-tropsch) 합성 기반 액체연료 생

산 공정을 대상으로, 천연가스를 원료로 사용하는 경우를 베이스라인으로 설정하고, 정유공정에서 배출되는 CO<sub>2</sub>를 포집하여 원료로 사용하는 다양한 CCU 공정 설계 시나리오의 온실가스 배출 특성을 정량적으로 비교·분석하고자 한다. FT 연료 생산 단계의 직접배출(Scope 1)과 전력·스팀 사용에 따른 간접배출(Scope 2)을 산정하였으며, 이를 바탕으로 원료 전환과 공정 설계 변화가 온실가스 배출 구조에 미치는 영향을 분석하고, CCU 기반 연료 전환 공정 설계를 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 FT 합성 기반 액체연료 생산 기술 시나리오

본 연구에서는 정유공정에서 미 활용된 CO<sub>2</sub>를 포집하여 액체연료를 생산하는 FT(Fischer-Tropsch) 합성 기반 공정의 원료 사용한 경우와 기존 화석연료 기반 FT 공정을 비교하여

온실가스 배출 특성을 정량적으로 평가하고자 한다. 이를 위해 베이스라인과 공정 시나리오를 설정하였고, 각 시나리오에 대해 참고문헌 및 Aspen Plus v12를 활용한 공정 모사를 기반으로 분석을 수행하였다.

각 시나리오별 공정흐름도는 Fig. 1에 나타내었으며, 베이스라인 공정은 현재 상용화되어 있는 FT 합성 기술을 기준[7]으로 하여 천연가스를 원료로 디젤을 생산하는 체계로 설정하였다. 베이스라인은 공정 내 CO<sub>2</sub> 포집 기술을 적용하지 않은 상태로, 기존 연료 생산 방식의 대표적인 예시로 간주된다. 이를 통해 미 활용 CO<sub>2</sub>를 포집하는 원료 전환에 따른 FT 공정 내부 온실가스 배출량 차이를 확인할 수 있다. 시나리오 1은 포집된 미 활용 CO<sub>2</sub>를 단순히 원료로 사용한 FT 공정을 모사하였고, 시나리오 2는 FT 공정 내에서 추가로 발생하는 CO<sub>2</sub>까지 포집하는 시스템을 포함하였다. 시나리오 3에서는 열병합발전(CHP, combined heat and power) 시스템을 도입하여 공정 내 에너지 효율을 제고하고 간접적인 탄소배출도 저감하

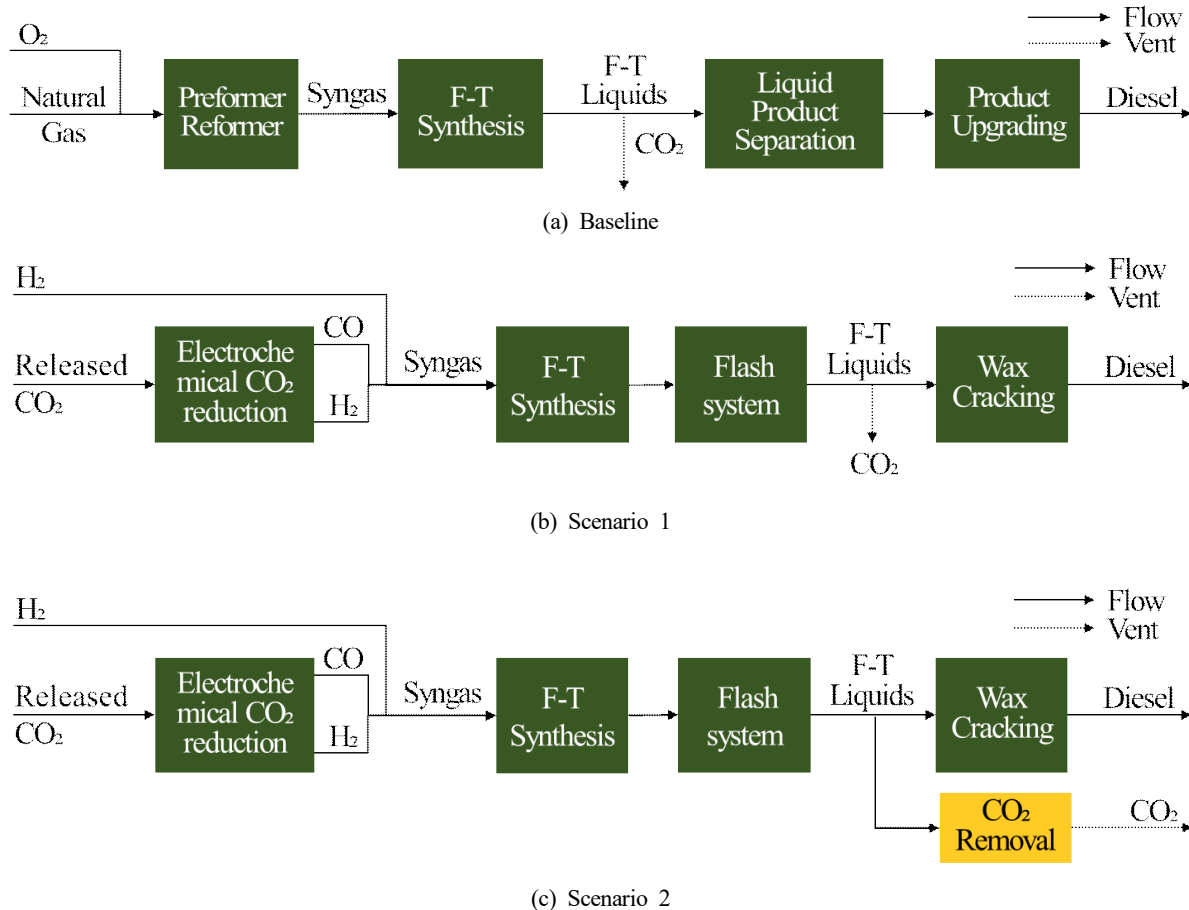
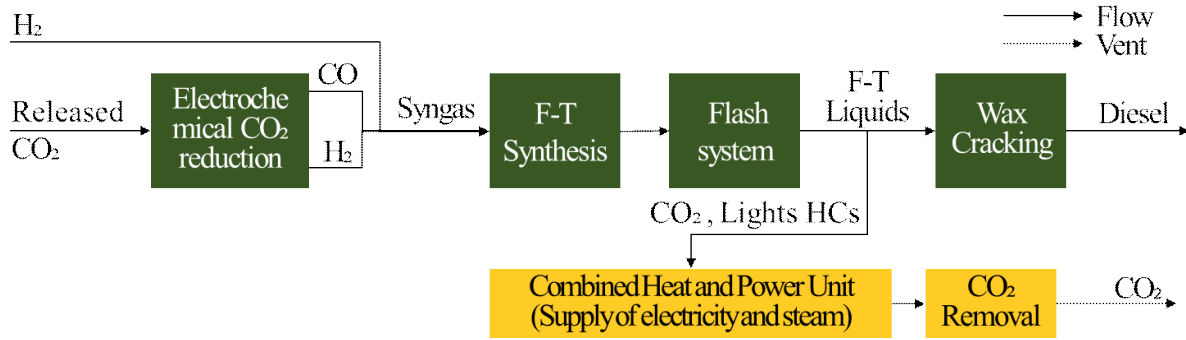
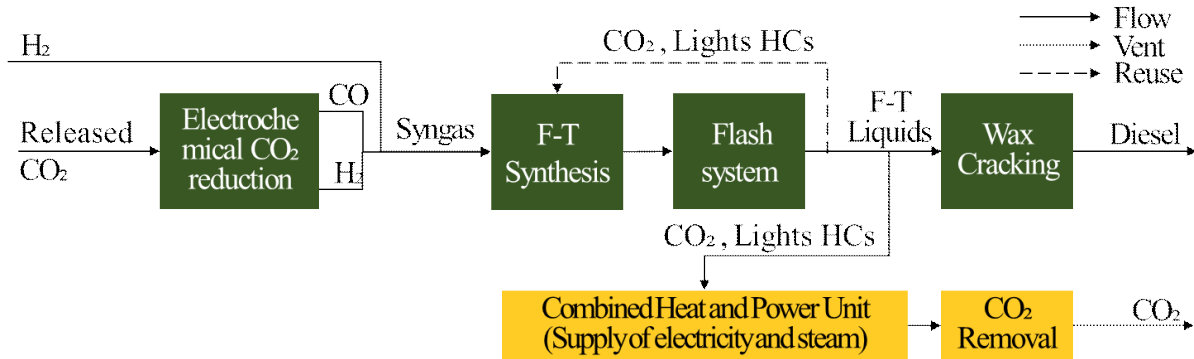


Fig. 1. Flow chart by baseline and scenarios.



(d) Scenario 3



(e) Scenario 4

Fig. 1. Continued

는 전략을 구성하였다. 마지막으로, 시나리오 4는 CO<sub>2</sub> 포집, CHP, 그리고 CO<sub>2</sub>의 일부 재사용 흐름을 포함하였다. FT 공정에서 반응하지 않은 CO<sub>2</sub>와 경질탄화수소(Lights HCs)를 FT 반응기에 재투입하는 종합적인 탄소저감 공정으로, 가장 진보된 형태의 CCU 기반 FT 공정 시나리오로 설정하였다. 각 시나리오는 포집 CO<sub>2</sub> 적용 여부뿐만 아니라 에너지 공급 방식, 공정 내 에너지 회수 수준 및 재투입 루프 구성에 따라 차등화되며, 이러한 공정 구성 요소들이 FT 연료 생산 단계의 온실가스 배출 특성에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다.

본 연구의 시스템 경계는 FT 합성 기반 연료 생산 공정의 제조 단계만을 포함하는 gate-to-gate 범위로 설정하였다. 즉, FT 공정에 투입되는 원료 유입 시점부터 최종 디젤 제품이 공정을 출하하는 시점까지를 분석 대상으로 하였으며, 천연가스 생산, 정유공정 CO<sub>2</sub> 발생 이전 단계 등 원료 생산의 상류 공정과 연료의 수송 및 사용 단계는 시스템 경계에서 제외하였다.

모든 시나리오에서 FT 공정 내 직접배출(Scope 1)과 전력 및 스팀 사용에 따른 간접배출(Scope 2)을 포함하였으며, CHP 도입 시에는 공정 내부에서 생산·소비되는 전력과 열량을 실제 운전 조건에 따라 반영하였다. 설비 건설 및 해체, 축

매 제조, 인프라 구축에 따른 배출은 시나리오 간 동일하다고 가정하여 분석 범위에서 제외하였다.

## 2.2 온실가스 배출량 산정방법

본 연구는 FT(Fischer-Tropsch) 합성 기반 액체연료 생산 공정을 대상으로, 천연가스 및 포집 CO<sub>2</sub>를 각각 원료로 적용한 경우의 공정 내부 온실가스 배출 특성을 gate-to-gate 시스템 경계에서 정량적으로 비교·분석하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 기존 천연가스 기반 FT 합성공정을 베이스라인으로 설정하고, 포집 CO<sub>2</sub>를 원료로 적용한 공정을 시나리오로 구성하여 비교하였다. 모든 시나리오에는 동일한 분석 경계와 산정 기준을 적용하여 결과의 일관성을 확보하였다.

시스템 경계는 FT 공정에 원료가 투입되는 시점부터 최종 제품(디젤)이 공정을 출하하는 시점까지의 제조 단계로 한정하였으며, 천연가스 생산, CO<sub>2</sub> 발생 이전 단계, 원료 전처리, 제품 수송 및 사용 단계는 분석 대상에서 제외하였다. 이러한 접근은 FT 연료 생산 공정 내부의 배출 특성을 중심으로 비교하기 위한 것으로, 외부 변수로 인한 불확실성을 최소화하기 위함이다.

각 시나리오의 온실가스 배출량은 배출 범위에 따라 Scope 1과 Scope 2로 구분하여 산정하였다. Scope 1은 FT 합성공정 내에서 직접 발생하는 온실가스 배출을 의미하며, Scope 2는 공정 운영에 필요한 외부 전기 및 스팀 소비에 따른 간접배출을 의미한다. 온실가스 배출량 산정의 신뢰도를 위해 IPCC 및 국내 배출권거래제 관련 지침에 따른 산정 방법 및 배출계수를 적용하였다. Scope 1 배출량은 FT 합성공정 내에서 직접적으로 발생하는 온실가스 배출을 중심으로 분석하였다. 전기 및 스팀 사용량은 Aspen Plus v12 기반 공정 시뮬레이션 결과를 활동자료로 적용하였다. 이와 같은 방식은 실험 기반이 아닌 시뮬레이션 기반의 공정 연구에서 널리 활용되며, 다양한 기술 조합에 따른 배출 경향 비교에 있어 효율성과 재현성 확보에 유효한 접근으로 평가된다. 온실가스 배출량 계산방법은 GHG Protocol[8] 및 국내 배출권거래제도 지침인 「온실가스 배출권 거래제 배출량 보고 및 인증에 관한 지침」의 [별표6]을 기반으로 산정하였으며, 각 시나리오 내 공정에서의 전기 및 스팀 사용량을 활동자료로 적용하였다. 산정식은 식 (1)을 사용하였으며, 적용된 지침에 따라 대상 온실가스 항목은 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 및 N<sub>2</sub>O이고, 적용 배출계수는 Table 1에 제시하였다.

$$E_{\text{total,CO}_2\text{eq}} = \sum_j (AD \times EF_j \times GWP_j) \quad (1)$$

여기서,

$E_{\text{total,CO}_2\text{eq}}$  : 전기 또는 스팀 사용에 따른 CO<sub>2</sub>\_eq 배출량 (ton CO<sub>2</sub>\_eq)

AD : 외부에서 공급받은 전기 또는 스팀 사용량 (MWh)

EF<sub>j</sub> : 온실가스(j)별 전기 또는 스팀 배출계수 (tGHG<sub>j</sub>/MWh)

GWP<sub>j</sub> : 온실가스(j)별 지구온난화지수 (100<sup>-yr</sup>, IPCC AR4)

j : 배출 온실가스 종류 (e.g., CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O)

또한, 배출되는 온실가스 종류는 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 및 N<sub>2</sub>O로 최종

배출량은 CO<sub>2</sub> 환산값(ton CO<sub>2</sub>\_eq)으로 통일하였으며, 이를 위해 각각의 온실가스 배출량에 적용된 지구온난화지수 (GWP, global warming potential)를 Table 2에 나타내었다. 더불어, 모든 시나리오에서는 공정 내 CO<sub>2</sub> 누출은 발생하지 않는 것으로 가정하였다. 즉, 포집된 CO<sub>2</sub>는 완전히 회수되어 반응 공정에 투입된다는 전제를 두고 분석을 수행하였다. 이러한 전제는 기술의 이상적 구현을 기반으로 감축 잠재력을 정량화하고자 함이며, 실제 기술 구현 시 고려되어야 할 누출률 및 회수율은 추후 민감도 분석을 통해 검토할 필요가 있을 것으로 사료된다. 각 시나리오별로 디젤 생산량이 달라지기 때문에 통일된 온실가스 배출량 비교를 위해 각 시나리오별로 동일한 기능단위(Functional Unit)를 적용하여 결과를 비교하였다. 기능단위는 디젤 1톤 생산을 기준으로 설정되었으며, 이를 기준으로 단위당 온실가스 배출량(ton CO<sub>2</sub>\_eq/ton-diesel)을 도출하였다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1 시나리오별 온실가스 배출량 산정 결과

본 연구에서는 정유공정에서 포집된 CO<sub>2</sub>를 활용하여 FT 합성 기반 액체연료를 생산하는 공정을 설계하고, 기존 천연가스 기반 FT 공정과 비교하여 온실가스 감축 효과를 정량적으로 평가하였다. 배출량은 Scope 1(직접배출)과 Scope 2(간접배출: 전기 및 스팀)을 기준으로 산정하였다. 베이스라인과 4가지 시나리오에 대해 디젤 1톤 생산당 온실가스 배출량을 산정한 결과를 Table 3에 나타내었다. Fig. 2에는 Scope 1과 Scope 2의 배출 기여도를 나타내었으며, 이를 통해 각 시나리오별 공정 특성에 따른 에너지 사용 패턴에 의한 온실가스 배출량 변화를 살펴보았다.

**Table 1.** Emission factors for electricity, heat and steam

Section	Country-specific emission factor					
	CO <sub>2</sub>		CH <sub>4</sub>		N <sub>2</sub> O	
Electricity [9]	0.4517	ton CO <sub>2</sub> /MWh	0.0048	kgCH <sub>4</sub> /MWh	0.0084	kgN <sub>2</sub> O/MWh
Steam [10]	56.373	ton CO <sub>2</sub> /TJ	1.278	kgCH <sub>4</sub> /TJ	0.166	kgN <sub>2</sub> O/TJ

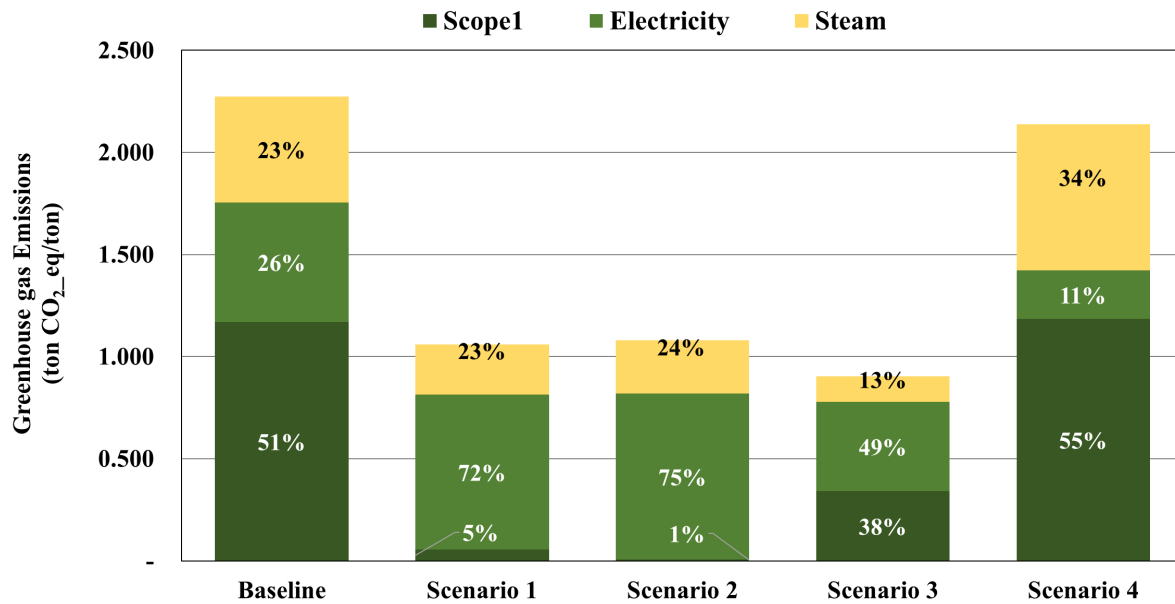
**Table 2.** Global warming potential(100-yr)

Section	Greenhouse gas		
	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Global warming potential(100-yr) [11]	1	27	273

**Table 3.** Scope 1 and Scope 2 greenhouse gas emissions by baseline and scenarios

Unit : ton CO<sub>2</sub>\_eq/ton-diesel

Section	Scope 1		Scope 2				Subtotal	Total	
	Value	Percentage	Electricity	Percentage	Steam	Percentage			
Baseline	1.170	51%	0.585	26%	0.520	23%	1.105	49%	2.275
Scenario 1	0.055	5%	0.759	72%	0.246	23%	1.005	95%	1.060
Scenario 2	0.006	1%	0.814	75%	0.260	24%	1.074	99%	1.080
Scenario 3	0.341	38%	0.437	48%	0.125	14%	0.563	62%	0.904
Scenario 4	1.185	55%	0.236	11%	0.717	34%	0.953	45%	2.138



**Fig. 2.** Emission contribution of Scope 1 and Scope 2 under baseline and scenarios

베이스라인은 천연가스를 원료로 하는 공정으로, 총 배출량은 2.275 ton CO<sub>2</sub>\_eq/ton-diesel로 나타났으며, 이 중 Scope 1은 1.170 ton CO<sub>2</sub>\_eq/ton-diesel로 전체의 약 51%의 배출 기여도를 보였다. 이는 천연가스를 주요 원료로 사용하는 기존 FT 합성공정에서 직접 연소 및 반응 과정에서의 배출 비중이 크다는 점이 반영된 것으로 사료된다. Scope 2에서는 전력 사용으로 인한 배출이 26%, 스팀은 23%를 차지하였다. 따라서 베이스라인은 직접배출이 주를 이루면서도, 에너지 사용에 따른 간접배출 역시 무시할 수 없는 수준임을 확인할 수 있다. 시나리오 1은 포집된 CO<sub>2</sub>를 원료로 치환하여 FT 공정에 투입한 경우로, 총 배출량은 1.060 ton CO<sub>2</sub>\_eq/ton-diesel로 나타났으며, Scope 1이 5%로 매우 낮은 비율을 차지하였다. Scope 2의 전기 사용에 따른 배출이 72%, 스팀이 23%를 차지하였으며, 이는 전기화학적 CO<sub>2</sub> 전환과 FT 공정의 최적화

를 위한 전력과 스팀 에너지 사용에 기인한 것으로 사료된다. 또한, Scope 1이 크게 감소한 반면, 고전력 공정 운전으로 인해 전기 사용량이 대폭 증가한 결과로 보인다. 베이스라인 대비 시나리오 1에서 전기 사용의 증가가 간접 배출 증가로 이어져 Scope 2가 총 배출량의 대부분을 차지하는 공정으로 확인되었다. 시나리오 2는 시나리오 1 공정에 추가로 공정 내부에서 발생하는 CO<sub>2</sub>를 포집하는 경우로, 총 배출량은 1.080 ton CO<sub>2</sub>\_eq/ton-diesel로 나타났으며, Scope 1은 0.006 ton CO<sub>2</sub>\_eq/ton-diesel로 총 배출량의 1%에 불과한 것으로 나타났다. 이에 Scope 2가 99%를 차지하였고, 세부적으로는 전기(75%) 및 스팀(24%)으로 나타났다. 이는 CO<sub>2</sub> 포집기술 및 고효율 합성공정의 도입이 직접배출을 효과적으로 억제하는 반면, 에너지 사용의 증가로 이어져 간접배출은 상대적으로 증가하는 양상을 보인 것으로 사료된다. 특히 시나리오 1보다 직접

배출은 더 감소하였으나, 스팀 사용량이 다소 증가하여 총 배출량은 시나리오 1보다 0.020 ton CO<sub>2</sub>\_eq/ton-diesel 만큼 더 배출된 것으로 나타났다. 시나리오 3은 열병합발전(CHP)을 운영한 경우로, 총 배출량은 0.904 ton CO<sub>2</sub>\_eq/ton-diesel로 나타났다으며, 모든 시나리오 중 가장 적은 배출량을 기록하였다. Scope 1은 38% 수준으로 시나리오 1과 시나리오 2에 비해 높게 나타났으나, 열병합발전(CHP)의 자체 에너지 공급을 통해 Scope 2 배출량을 대폭 감소시켰다. 전력 사용은 48%, 스팀은 14%의 기여도를 보였으며, Scope 2의 배출량은 0.563 ton CO<sub>2</sub>\_eq/ton-diesel로 나타났다. 이는 열병합발전이 외부 에너지 소비를 줄이고, 간접배출을 최소화하는 데 효과적인 수단일 수 있음을 보여준다. 반면, 시나리오 4는 CO<sub>2</sub> 재사용 루프를 추가하여 부산물을 회수·재투입하는 경우로, 총 배출량은 2.138 ton CO<sub>2</sub>\_eq/ton-diesel이며, 4개 시나리오들 중 가장 높은 배출량을 나타내고 있다. Scope 1이 55%로 베이스라인의 Scope 1 기여도보다 높게 나타났으며, 이는 FT 공정에서 생성된 CO<sub>2</sub> 및 경질탄화수소 부산물을 회수하여 공정 내 원료 및 연료로 재사용하면서 직접배출이 증가한 것으로 사료된다. Scope 2에서 전력 사용으로 인한 배출 기여도는 11%로 4개 시나리오들 중 가장 낮았으나, 스팀의 배출 기여도는 34%로 전체 배출량 상승의 주요 요인으로 작용하였다. 시나리오별 배출기여도 분석 결과, 시나리오 1과 시나리오 2는 Scope 1을 크게 저감시키는 공정으로 나타났으나, 전력과 스팀 소비의 증가로 인해 Scope 2 배출량이 증가하여 전체 배출량 감축에 한계를 보여주었다. 반면, 시나리오 3은 일부 Scope 1 배출이 존 재함에도 불구하고, 자체 열병합발전 운영을 통해 Scope 2 배출을 효과적으로 억제하여 총 배출량을 가장 낮추는 공정임을 보여주었다. 시나리오 4는 자체 열병합발전이 외부 구매 전기와 스팀 투입을 감소시키는 반면, FT 반응 후 배출되는 CO<sub>2</sub>를 재투입하기 위한 에너지 추가 투입으로 인해 배출량이 다른 시나리오들보다 높게 나타나 온실가스 감축 측면에서는 효과적이지 않은 공정인 것으로 나타났다. 따라서, FT 공정 내 온실가스 감축을 위해서는 Scope 1 저감과 더불어 에너지 효율

성 향상을 통한 Scope 2 배출 최소화가 동시에 달성되어야 함을 시사하고 있다.

### 3.2 시나리오별 온실가스 감축 효과 및 시사점

시나리오별 온실가스 감축 효과를 살펴보기 위해 베이스라인 대비 시나리오별 온실가스 감축률을 Table 4에 나타내었다. 시나리오 1과 2는 베이스라인 온실가스 배출량 대비 각각 53.4%, 52.5%를 감축하는 것으로 나타났다. 이는 미활용 CO<sub>2</sub>를 포집하여 FT 공정의 원료로 활용하거나, 공정 내 발생하는 CO<sub>2</sub>까지 포집하는 시스템을 도입함으로써 Scope 1 배출량을 억제한 결과로, CCU 기술의 직접적인 온실가스 저감 효과를 확인할 수 있었다. 그러나 두 시나리오 모두 전력과 스팀 사용량 증가로 Scope 2 배출량이 늘어나는 점은 감축률 확대에 구조적 한계로 드러났다. 이는 향후 CCU 기반 연료생산 공정을 설계할 때, 단순한 CO<sub>2</sub> 포집 확대뿐만 아니라 공정의 에너지 효율성 개선이 병행되어야 한다는 점을 보여주고 있다. 시나리오 3은 열병합발전(CHP)을 도입하여 외부 공급 전기 및 스팀 사용을 최소화한 결과, 총 배출량이 0.904 ton CO<sub>2</sub>\_eq/ton-diesel로 시나리오 중 가장 낮았으며, 온실가스 감축률은 60.3%로 가장 높은 성과를 보였다. 이는 CO<sub>2</sub> 포집과 공정 내 탄화수소 부산물을 활용한 에너지 자급형 시스템을 결합할 경우 Scope 2 배출을 감소시켜 총 감축률을 극대화할 수 있음을 보여주었다. 특히, 정유·석유화학 산업은 대규모 에너지 집약적 설비를 보유하고 있어, CHP 및 재생에너지 공급망과의 결합을 통해 감축 성과를 증대할 수 있는 가능성이 있을 것으로 판단된다. 이는 정책적으로도 CCU 기술 도입과 함께 에너지 자급·효율화 설비 구축의 병행이 필요함을 시사한다고 사료된다. 반면, 시나리오 4는 CO<sub>2</sub> 포집, CHP, CO<sub>2</sub> 재사용 흐름까지 모두 포함한 복합적 시스템임에도 불구하고, 총 배출량이 2.151 ton CO<sub>2</sub>\_eq/ton-diesel로 나타나 감축률이 6%에 불과하였다. 이는 미 반응 CO<sub>2</sub> 회수 및 재 투입을 위한 공정 복잡성 증가와 추가 에너지 소비가 오히려 직접 및 간접배출을 동시에 확대하여, 공정 통합이 반드시 높은 감축 효과로 이어지지

**Table 4.** Emission reduction compared to baseline

Section	Total emission (ton CO <sub>2</sub> _eq/ton-diesel)	Emission reduction (ton CO <sub>2</sub> _eq/ton-diesel)	Reduction rate(%)
Baseline	2.275	-	-
Scenario 1	1.060	1,215	53.4
Scenario 2	1.080	1,195	52.5
Scenario 3	0.904	1,371	60.3
Scenario 4	2.138	136	6.0

않을 수 있다는 점을 보여주고 있다. 따라서 정책적 측면에서 CCU 기술을 도입할 때, 무조건적인 공정 통합보다는 배출원 별·공정별 최적화 전략을 수립하여 단계적으로 도입하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

본 연구 결과는 FT 합성 기반 연료 생산 공정에서 원료 구성 및 공정 설계뿐만 아니라, 전력 및 스팀 소비를 포함한 에너지 사용 특성이 온실가스 배출 구조를 결정하는 핵심 요인임을 정량적으로 제시한다. 다만, 본 연구는 gate-to-gate 시스템 경계를 적용하여 연료 생산 단계의 공정 내부 배출 특성에 초점을 맞춘 분석으로, 원료 생산, CO<sub>2</sub> 포집 및 압축, 에너지 공급, 연료 사용 단계에서 발생하는 배출은 고려하지 않았다. 따라서 본 연구에서 도출된 결과는 공정 수준에서의 상대적 배출 특성 비교로 해석되어야 하며, 이를 전체 시스템 차원의 온실가스 감축 효과로 직접적으로 확장하는 데에는 한계가 있다. 아울러, 본 연구는 이상적인 공정 조건을 가정하여 분석을 수행하였으며, CO<sub>2</sub> 포집 효율, 에너지 공급 믹스, 공정 운전 조건 등 주요 변수에 따른 민감도 분석은 수행되지 않았다. 이러한 변수들은 온실가스 배출량 산정 결과에 중요한 영향을 미칠 수 있으므로, 향후 연구에서는 주요 공정 변수 및 에너지 조건 변화에 따른 민감도 분석을 통해 결과의 불확실성을 정량적으로 평가할 필요가 있다.

향후 연구에서는 본 gate-to-gate 분석을 기반으로, 원료 생산, CO<sub>2</sub> 포집, 에너지 공급 및 연료 사용 단계를 포함하는 전과정평가(life cycle assessment, LCA)를 수행함으로써 원료 전환에 따른 시스템 전반의 배출 구조를 종합적으로 평가할 필요가 있다. 또한, 공정 내 에너지 통합 수준과 재생에너지 적용에 따른 배출 특성 변화를 함께 고려함으로써, 보다 현실적인 공정 설계 및 운전 전략 도출이 가능할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는 FT(Fischer-Tropsch) 합성 기반 액체연료 생산 공정을 대상으로, 천연가스와 포집 CO<sub>2</sub>를 각각 원료로 적용한 경우의 공정 내부 온실가스 배출 특성을 gate-to-gate 시스템 경계에서 비교·분석하였다. 연구 결과, 원료 전환과 공정 구성 변화에 따라 FT 연료 생산 단계의 배출 구조가 크게 달라지는 것으로 나타났으며, 특히 에너지 소비 특성이 전체 배출량에 지배적인 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

시나리오 분석 결과, 포집 CO<sub>2</sub>를 원료로 적용한 시나리오 1과 공정 내 발생 CO<sub>2</sub>를 추가로 회수한 시나리오 2는 FT 공정 내 직접배출(Scope 1)의 비중을 각각 5%와 1% 수준으로 낮추는 반면, 전력 및 스팀 사용 증가로 인해 간접배출(Scope

2)의 기여도가 크게 확대되었다. 이는 CO<sub>2</sub> 원료 전환만으로는 FT 공정 전체 배출량을 효과적으로 개선하기 어렵고, 에너지 효율 향상이 병행되어야 함을 시사한다. 열병합발전(CHP)을 도입한 시나리오 3은 공정 내부 에너지 자급을 통해 외부 전기 및 스팀 사용을 최소화함으로써, 모든 시나리오 중 가장 낮은 총 배출량을 나타냈다. 반면, CO<sub>2</sub> 포집, CHP 운영 및 CO<sub>2</sub> 재투입을 모두 통합한 시나리오 4는 공정 복잡성 증가와 추가 에너지 소비로 인해 오히려 배출량이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 기술 요소의 단순한 결합이 배출 특성 개선으로 직결되지 않으며, 공정 통합 수준과 에너지 흐름에 대한 정밀한 최적화가 선행되어야 함을 보여준다.

이러한 결과는 FT 합성 기반 연료 생산 공정에서 원료 구성, 에너지 공급 방식 및 공정 내 에너지 회수 전략이 온실가스 배출 특성을 결정하는 핵심 요인임을 정량적으로 제시하며, 향후 CCU 기반 FT 공정 설계 시 CO<sub>2</sub> 원료 적용뿐만 아니라 에너지 통합 및 공정 단순화를 포함한 종합적인 공정 최적화 전략이 필요함을 시사한다.

향후 연구에서는 두 가지 측면에서 심화된 분석이 필요할 것으로 판단된다. 첫째, 본 연구는 FT 연료 생산 공정 내부를 대상으로 Scope 1 및 Scope 2 배출 특성을 분석하였으나, 향후에는 원료 생산, CO<sub>2</sub> 포집, 에너지 공급 및 연료 사용 단계를 포함하는 전과정 평가(life cycle assessment, LCA)를 통해 원료 전환에 따른 전체 배출 구조를 보다 종합적으로 검토할 필요가 있다. 이를 통해 gate-to-gate 분석 결과를 전과정 관점으로 확장하고, 공정 설계 변화가 시스템 전체에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있을 것이다.

둘째, CO<sub>2</sub> 원료 적용 FT 공정의 배출 특성이 에너지 공급 방식에 크게 의존하는 것으로 나타난 만큼, 향후 연구에서는 재생에너지 연계 공정 운영, 에너지 통합 수준에 따른 배출 변화, 그리고 공정별 경제성 분석을 병행하여 기술적·경제적 최적 운전 조건을 도출할 필요가 있다. 특히 정유 및 석유화학 산업을 대상으로 한 공정 통합 시뮬레이션 및 파일럿 규모 실증 연구를 통해 본 연구 결과의 적용 가능성을 검증하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

#### 사 사

본 연구는 정부(산업자원부)의 재원으로 CCU 기반 합성연료의 품질 기준 개발 및 상용화 전략(20224C10300040)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

1. WMO. State of the Global Climate 2024. WMO-No. 1368 (2025).
2. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647 (2023).
3. IEA. World Energy Outlook (2023).
4. IEA. Energy Technology Perspectives (2020).
5. IEA. Global Hydrogen Review (2024).
6. Paolo Gabrielli, Matteo Gazzani, and Marco Mazzotti. The role of carbon capture and utilization, carbon capture and storage, and biomass to enable a Net-Zero-CO<sub>2</sub> emissions chemical industry. *Journal of Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 59, pp. 7033-7045 (2020).
7. National Energy Technology Laboratory (NETL). Analysis of National Gas-to-Liquid Transportation via Fischer-Tropsch. DOE/NETL-2013/1597 (2013).
8. Greenhouse Gas Protocol. 2015. GHG Protocol Scope 2 Guidance, An amendment to the GHG Protocol Corporate Standard (2015).
9. Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea (GIR). 2022. [https://tips.energy.or.kr/carbon/Ggas\\_statistics\\_03.do](https://tips.energy.or.kr/carbon/Ggas_statistics_03.do) (accessed December 2025).
10. Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea (GIR). country-specific emission factors 2013. <https://tips.energy.or.kr/main/main.do> (accessed December 2025).
11. IPCC, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. (2007).