

이산화탄소 포집 및 활용을 통한 에틸렌 생산 기술의 온실가스 배출영향 분석 및 방법론 개발 연구

손경진* · 정해권** · 김지용*** · 류정령**** · 민영제***** · 김신*****† · 김형찬*****††

*에코네트웍(주) 그린에너지전략센터 선임연구원, **성균관대학교 화학공학과 석박통합과정학생, ***성균관대학교 화학공학과 부교수, ****에코네트웍(주) 대표이사, *****한국석유관리원 미래기술연구소 선임연구원, *****한국석유관리원 미래기술연구소 책임연구원, *****에코네트웍(주) 그린에너지전략센터장

Research on greenhouse gas emission impact and methodology of captured CO₂ on ethylene production

Son, Kyungjin* · Chung, Hegwon** · Kim, Jiyong*** · Ryu, Jeong Ryung**** · Min, Yong-je***** · Kim, Shin*****† and Kim, Hyoungchan*****††

*Consultant, Green Energy Strategy Institute, Econetwork Co., Ltd., Gyeonggi-do, Korea

**Ph.D Student, School of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University, Seoul, Korea

***Associate Professor, School of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University, Seoul, Korea

****CEO, Econetwork Co., Ltd., Gyeonggi-do, Korea

*****Senior Researcher, Research Institute of Future Technology, Korea Petroleum Quality & Distribution Authority, Chungcheongbuk-do, Korea

*****Principal Researcher, Research Institute of Future Technology, Korea Petroleum Quality & Distribution Authority, Chungcheongbuk-do, Korea

*****Director, Green Energy Strategy Institute, Econetwork Co., Ltd., Gyeonggi-do, Korea

ABSTRACT

As the world seeks effective solutions to mitigate climate change, various carbon mitigation technologies have gained attention for their potential to reduce industrial emissions. Among these, carbon capture and utilization (CCU) has emerged as a promising technology for achieving net-zero emissions and is being developed and implemented globally. CCU captures CO₂ from numerous sources and reuses it in processes such as industrial chemical production. Among industrial sectors, the refinery sector is of environmental interest due to its relatively high CO₂ emissions. Accordingly, the refinery sector requires innovative solutions for carbon recycling and reduction. However, the lack of quantitative analysis on actual carbon reductions and the unintended energy consumption during CCU operations present significant challenges to widespread implementation in conventional refinery plants. Furthermore, the absence of a globally accepted CCU methodology for carbon mitigation complicates the securing of carbon credits. This study aims to analyze the emission impact of CCU processes, focusing specifically on ethylene production. From the perspective of carbon credit and methodology, our analysis examines the key processes and factors that influence emission reductions. For this purpose, we selected and analyzed the ethylene production process using captured CO₂. Ethylene, a critical resource for the petrochemical industry, requires substantial energy input during production. Using CCU technology, ethylene can be synthesized directly from captured CO₂ with the addition of hydrogen (H₂). Our findings indicate that the impact of carbon capture—whether direct air capture or point source capture—and hydrogen utilization in CCU projects varies significantly depending on the energy source (renewable versus

†Corresponding author : shinnala@kpetro.or.kr (33, Yangcheong 3-gil, Ochang-eup, Cheongwon-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do 28115, Korea. Tel. +82-42-240-7932)

††Co-Corresponding author : hckim@econetwork.com (room 306 B, 60, Gwacheon-daero 7na-gil, Gwacheon-si, Gyeonggi-do, Korea. Tel. +82-2-504-1233)

ORCID 손경진 0009-0002-6241-0315

정해권 0000-0002-6103-5325

김지용 0000-0002-9999-736X

류정령 0009-0001-2722-1781

민영제 0009-0008-3089-6035

김신 0009-0004-3249-9667

김형찬 0009-0006-7574-5156

non-renewable). Additionally, we discuss important considerations for developing a robust greenhouse gas reduction methodology, which is essential for successful implementation of CCU technologies in refinery sectors.

Key words : Carbon Capture Utilization (CCU), GHGs Reduction, Carbon Credit, Methodology, Ethylene, Refinery Plant

1. 서론

지구 평균 기온 상승을 산업화 이전 대비 1.5℃ 이내로 억제하기 위해서는 전 지구적 차원의 온실가스 감축 노력이 필수적이다. 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 이를 달성하기 위해 2030년까지 전 세계 온실가스 배출량을 2019년 대비 43% 감축하고, 2050년까지 순배출량(Net-zero)을 달성해야 한다고 권고한다. 그러나 국제에너지기구(International Energy Agency, IEA)가 2023년 발표한 전망에 따르면, 현재 상용화된 기술만으로는 필요한 감축량의 약 25%만 충족할 수 있어, 나머지 75%에 대해서는 아직 실용화되지 않았거나 적용이 제한적인 혁신기술의 개발 및 확산이 긴요하다. IEA는 전기화, 수소, 바이오에너지, 탄소포집·활용·저장(Carbon Capture, Utilization & Storage, CCUS) 등 네 가지를 탄소중립 실현을 위한 핵심 기술로 지목했으며, 이 중 CCUS가 전체 감축 기여도에서 25% 이상을 점유할 것으로 예상된다(IEA, 2023).

한편 CCUS 기술 중에서도 CCU (Carbon Capture & Utilization)는 대기나 산업 공정에서 포집한 이산화탄소를 화학물질, 연료, 건축 자재 등으로 전환하여 활용하는 개념으로서, 온실가스 저감과 동시에 화석연료 기반 원료를 대체할 수 있는 새로운 자원을 창출한다는 점에서 환경적·경제적 잠재력이 높다고 평가된다(World Economic Forum, 2021). 예를 들어, 막대한 화석연료 기반 원료를 소모하는 화학산업에서 이산화탄소, 바이오매스 기원의 수소, 플라스틱 폐기물 등 저탄소·재생 원료를 활용한다면 전반적인 생산 공정에서 상당한 온실가스 감축이 가능하다(IPCC, 2022). Kästelhön et al. (2019)은 유럽 내 주요 20개 화학물질의 생산공정에 CCU 기술을 적용할 경우, 2030년까지 최대 35억 톤의 이산화탄소 배출 감소 효과가 있을 것으로 추정하였다. 이처럼 화학산업 분야에서 CCU는 온실가스 저감과 신규 자원 창출을 동시에 추구할 수 있는 해결책으로 주목받으며, 포집된 이산화탄소를 화학물질이나 연료로 전환함으로써 화석 원료와 경쟁력을 확보할 뿐 아니라, 폐자원을 재순환하는 순환경제(circular

Economy)의 구현에도 기여할 수 있다.

국내에서도 이러한 국제적 동향과 기후 위기에 대응하기 위해, 정부는 2021년 10월 2018년 배출량 대비 40%(약 291백만 톤)를 감축하겠다는 국가온실가스감축목표(Nationally Determined Contribution, NDC) 상향안을 발표하였다. 이 목표를 달성하기 위해 산업 전 부문에 걸친 온실가스 감축이 요구됨에 따라, CCUS 기술의 중요성 역시 급부상하고 있다. 정부는 2030년까지 CCUS를 통해 온실가스 11.2백만 톤을 흡수 및 처리한다는 구체적인 목표를 수립하고, 관련 제도·인프라 및 기술 개발에 주력하고 있다. 이는 2023년 3월에 발표된 탄소중립녹색성장 기본계획(안)에도 반영되었으며, IPCC와 UNFCCC 등 국제기준을 준용한 온실가스 감축 통계 체계 정비와 산정 방법론 마련을 세부 이행목표로 설정하였다(Joint Ministries, 2023). 또한, 2024년 10월에는 『이산화탄소 포집·수송·저장 및 활용에 관한 법률』 및 시행령 제정령안이 입법예고됨으로써, CCU 관련 법제적 기반의 조속한 구축이 예상된다.

그러나 이러한 노력에도 불구하고, 국제 기준에 합치하는 CCU 감축 사업의 방법론을 연구·개발하는 과정은 아직 초기 단계에 머물러 있다. 유엔기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 하의 청정개발체제(Clean Development Mechanism, CDM)에서 다양한 감축사업 방법론이 축적되어 왔지만, CCU 기술을 활용한 정유공정에 직접적으로 적용 가능한 방법론은 아직 마련되지 않은 실정이다. 더욱이, 파리협정 6.4조로 이어지는 차세대 국제 탄소시장 메커니즘 역시 CCU 기술에 대한 구체적 방법론을 개발 중으로, 규제 시장에서 공인받을 수 있는 세부 기준과 지침이 부재하다. 민간 자발적 탄소시장(예: Verra)에서 CCU 기술을 비롯한 다양한 신기술을 다루는 방법론을 준비하고 있으나, 이를 규제 시장에서 공식 인정받기 위해서는 국제사회의 폭넓은 합의와 엄정한 검증이 전제되어야 한다.

이러한 배경에서 본 논문은 CCU 기술을 적용한 에틸렌 생산 공정을 대상으로, 공정별 배출 기여도를 체계적으로 파악하고 방법론 개발 시 고려해야 할 주요 요인을 분석하고자 한다. 본 연구를 통해 국제 기준에 부합하는

Table 1. Ethylene production process and analysis method

CCU technology	Process	Technology option	Data collection
CO ₂ to ethylene production	CO ₂ capture	Direct carbon capture (DAC)	Cuevas-Castillo et al. (2024)
		coal-fired carbon capture	Kim et al. (2012)
	Ethylene production	CO ₂ to C ₂ -C ₄ production	Do et al. (2020)
		C ₂ -C ₄ to ethylene separation	Spallina et al. (2017)
	H ₂ production	Green/brown/grey hydrogen	Kim (2019)

방법론의 주요 요건을 도출함으로써, 향후 개발될 기술에의 실제 적용 가능성을 평가하고, 장차 국제 감축사업으로 확장할 수 있는 근거를 마련하고자 한다. 이는 곧 에틸렌을 비롯한 화학물질 생산 부문에서의 CCU 기술 활성화에 토대를 제공함과 동시에, 후속 연구의 기초자료 역할을 수행할 수 있을 것이다.

2. 연구 방법

2.1. 대상 기술 선정

에틸렌 생산 기술의 세부 공정 및 기술별 에너지 사용량 데이터를 수집한 출처는 Table 1과 같다. 포집된 CO₂를 활용하여 C₂-C₄를 생산하고 이로부터 에틸렌만을 수득하는 분리공정은 문헌에서 제시된 반응속도 식 및 파라미터를 활용하여 상용공정모사기인 Aspen Plus V.12 시뮬레이션을 통해 에너지 사용량 및 온실가스 배출량을 도출하였다. 에틸렌 생산에 투입되는 CO₂ 및 H₂로 인한 배출량은 참고 문헌에서 제시된 CO₂ 및 H₂의 사용량과 CO₂ 및 H₂의 배출 원단위를 이용하여 산정하였다. 에틸렌 분리공정에서 에틸렌 이외에 부산물인 탄화수소는 인접한 열병합발전소(CHP)에서 사용됨을 가정하였다.

온실가스 방법론 개발을 위한 고려사항 도출을 위해서는 CDM의 주요 구성 요소별 검토 항목을 아래와 같이 설정하였다. 먼저, 베이스라인 시나리오(Baseline scenario)는 에틸렌 생산 기술 선택과 보수성을 기반으로 설정되며, 이를 통해 베이스라인 배출량(Baseline emission)을 산정한다. 베이스라인 배출량에서는 베이스라인 시나리오 설정과 배출 계수 선택이 중요한 요소로 작용한다. 프로젝트 배출량(Project emission)은 에틸렌 생산 프로젝트 내에서의 직접 배출량을 산정한다. 누출(Leakage)은 프로젝트 외부에서 간접적으로 발생할 수 있는 배출량을 검토하며, 원료인 H₂ 생산 중 발생하는 배출과 포집되지 않은

Table 2. Major consideration for methodology development

Methodology	Main contents	Consideration
CDM under UNFCCC	Baseline scenario	<ul style="list-style-type: none"> • Baseline ethylene production technology selection • Conservativeness
	Baseline emission	<ul style="list-style-type: none"> • Emission factor selection
	Leakage	<ul style="list-style-type: none"> • Emission from H₂ production • Emission from not captured CO₂
	Emission reduction	<ul style="list-style-type: none"> • Downstream CO₂ storage
	Monitoring	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoring of captured CO₂ • Monitoring of additional H₂ input

CO₂ 배출을 포함한다. 배출 감축(Emission reduction)은 다운스트림 CO₂ 저장을 통해 감축된 배출량을 평가하며, 이는 장기적인 감축 효과를 고려한다. 마지막으로 모니터링(Monitoring)은 포집된 CO₂와 추가적인 H₂ 투입을 포함하여 프로젝트가 계획에 따라 진행되고 있는지를 확인한다. 이러한 구성 요소는 CDM 방법론의 정확성과 신뢰성을 높이고, 온실가스 감축 효과를 체계적으로 평가하기 위한 기준을 제공한다.

2.2. 베이스라인

본 연구에서 다루는 핵심 기술은 포집된 이산화탄소를 활용하여 에틸렌을 생산하는 공정이며, 비교 대상으로 설정되는 베이스라인은 원유 정제를 통해 얻어진 납사(naphtha)를 원료로 에틸렌을 생산하는 기존 기술이다. 에틸렌은 전 세계적으로 천연가스나 납사 등 다양한 원료에서 생산되지만, 국내의 경우 주로 석유 정제 과정에서 획득한 납사를 활용한다. 이때 납사는 석유화학 플랜트인 납사크래킹센터(NCC, naphtha cracking center)에 투입되

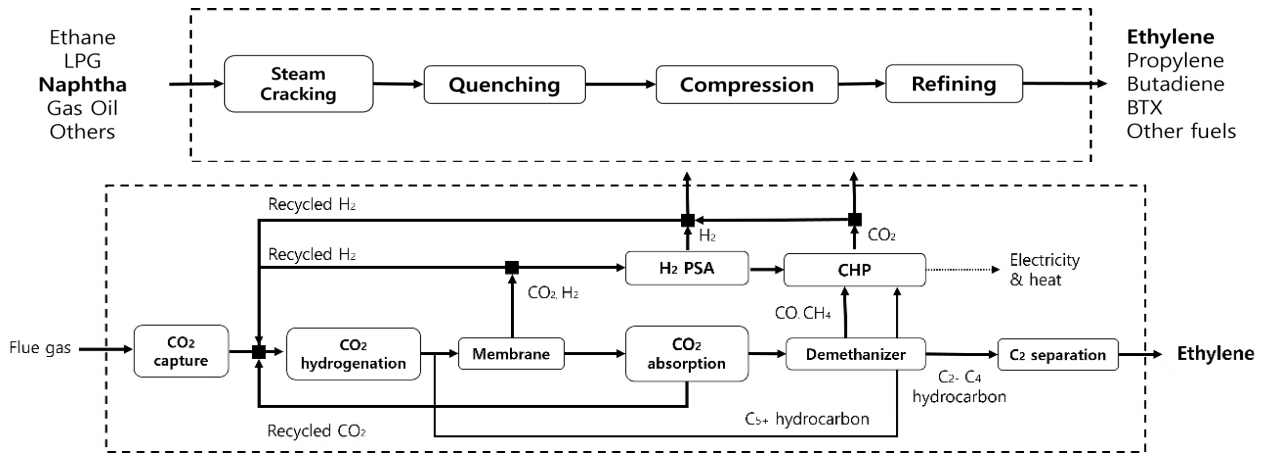


Fig. 1. Ethylene production from naphtha (top) and flue gas CO₂ capture (bottom)

어, 수증기가 존재하는 환경에서 열분해 반응(스팀 크래킹, steam cracking)을 거쳐 최종적으로 에틸렌으로 전환된다. 구체적으로 NCC 공정에서는 포화 탄화수소가 약 800도에 달하는 고온 조건에서 크래킹되어 불포화 탄화수소인 에틸렌으로 변환된다. 이러한 고온의 고에너지 반응 조건으로 인해 NCC 공정은 석유화학 산업 내에서도 에너지 소모가 특히 큰 공정으로 알려져 있다. 실제로 에틸렌 생산 공정 전반에서 소요되는 총 에너지 중 약 60%가 NCC 공정에 할당된다는 연구 결과도 제시된 바 있다 (Ren et al., 2008). 이러한 배경은 기존 납사 기반 에틸렌 생산과 비교했을 때, 포집된 CO₂를 활용한 에틸렌 생산 공정이 갖는 잠재적 이점을 강조해준다.

2.3. 대상 기술

본 연구에서는 Do et al. (2020)이 제시한 C₂-C₄ 탄화수소 생산공정 모델을 기반으로, 에틸렌의 수득을 극대화하기 위한 추가 분리공정을 도입하여 CO₂ 포집부터 에틸렌 생산까지 전체 공정의 물질·에너지 수지를 도출하였다. Do et al. (2020)의 모델은 석탄발전소 배가스에서 포집된 CO₂와 수전해를 통해 생산된 수소(H₂)를 활용하여 C₂-C₄ 탄화수소를 합성하는 개념으로, 포집된 CO₂는 ‘직접수소화(direct hydrogenation)’ 과정을 거친다. 구체적으로 직접 수소화는 역수성가스화(Reverse Water Gas Shift, RWGS) 반응을 통해 CO₂를 일산화탄소(CO)로 환원한 뒤, 피셔-트롭쉬(Fischer-Tropsch) 반응을 통해 투입된 수소와 함께 탄화수소를 생성하는 방식이다. 본 공정에서는 CO₂ 및 H₂를 다운스트림에서 재활용하는 전략과 더불어, 반응 과정에서 전환되지 못한 일산화탄소(CO) 및 메탄(CH₄)을 열

병합발전(CHP, Combined Heat and Power)에 활용하는 전략을 병행한다. 이는 CO₂와 H₂의 재활용을 통해 목표 물질(C₂-C₄)에 대한 수득률을 높이는 동시에, 부산물로 발생하는 C₃⁺를 CHP에 추가적으로 활용함으로써 공정 효율을 증진시키는 데 기여한다. 아울러 CO₂는 분리막 및 아민 흡수제(Monoethanolamine, MEA)를 사용하여 포집하고, H₂는 PSA(Pressure Swing Adsorption) 공정을 통해 회수하여 재사용함으로써 자원 순환을 극대화하고 공정 전반의 에너지 효율을 제고하고자 하였다.

3. 분석 결과

3.1. 기술단계별 온실가스 배출량

에틸렌 생산 기술에 대해 이산화탄소 포집, 수소 생산, 에틸렌 생산 공정의 세 가지 주요 공정으로 구분하여, 각 공정별 분석 대상 기술과 에틸렌 1 kg 생산당 온실가스 배출량을 아래와 같이 분석하였다(Table 3). 이산화탄소 포집 기술 중 대기 직접 포집(Direct Air Capture, DAC) 기술은 1 kg의 에틸렌 생산당 1.40 kg CO₂-eq의 배출량으로 가장 낮은 값을 보이며, MEA(석탄 화력 발전소 기반)는 10.76 kg CO₂-eq로 상대적으로 높은 배출량을 보였다. 수소 생산에서는 Green H₂(재생에너지 기반)가 0.35 kg CO₂-eq로 가장 낮고, Grey H₂(석탄 가스 기반)가 14.59 kg CO₂-eq로 가장 높은 배출량을 나타냈다. 에틸렌 생산 공정은 10.86 kg CO₂-eq의 배출량을 나타내며 전체 배출량에 큰 영향을 미침을 확인하였다. 이를 통해 친환경적 생산을 위해서는 Green H₂와 DAC 등과 같은 저탄소 기술의 활용이 중요함을 알 수 있다.

Table 3. Emission source of ethylene production process

Process	Technology	Emission (kgCO ₂ -eq/kg _{ethylene})	Reference
CO ₂ capture	DAC (Atmosphere)	1.40	Cuevas-Castillo et al. (2024)
	MEA (Coal fired plant)	10.76	Kim et al. (2012)
H ₂ production	Green H ₂	0.35	Kim (2019)
	Brown H ₂ (NCC by-product)	7.99	Kim (2019)
	Grey H ₂ (Coal oven gas)	14.59	Kim (2019)
CO ₂ to C ₂ -C ₄	Ethylene production	10.86	Do et al. (2020), Spallina et al. (2017)

3.2. 인자별 배출기여도

3.2.1. 탄소 포집 기술에 따른 배출기여도

본 연구에서는 대상 기술(에틸렌 생산공정)에 대하여 다양한 탄소 포집 기술 및 수소 생산 기술을 결합한 시나리오별로 총 배출량 기여도를 산정하였다. 석탄화력발전소에서 MEA 기반 기술을 적용하여 포집된 탄소를 에틸렌 생산공정에 투입하는 경우, 브라운 수소와 그린 수소를 활용할 때 각각 36%, 49%의 배출 기여도를 확인하였다(Fig. 2(a), (c)). 반면 대기 직접 포집(DAC, Direct Air Capture) 기술을 통해 확보한 이산화탄소를 사용한 시나리오에서는 브라운 수소와 그린 수소 조건에서 각각 7%, 11%의 기여도가 도출되었다(Fig. 2(b), (d)). 또한 동일한 브라운 수소 활용 조건에서, MEA 기반 탄소 포집 기술과 DAC를 비교한 결과 전체 배출 기여도가 각각 36%, 7%로 큰 차이를 보였다(Fig. 2(a), (b)). 그린수소 활용 조건에서도 MEA와 DAC는 각각 49%, 11%의 배출 기여도를 나타내어(Fig. 2(c), (d)), 포집 기술의 선택이 에틸렌 생산에서 차지하는 온실가스 배출에 상당한 영향을 미침을 알 수 있다.

3.2.2. 수소 공급원에 따른 배출기여도

MEA 기반 탄소 포집 기술을 통해 포집된 탄소를 에틸렌 생산공정에서 활용할 경우, 브라운 수소, 그린 수소, 그레이 수소를 공급원으로 설정하였을 때 각각 27%, 2%, 40%의 배출 기여도를 확인하였다(Fig. 2(a), (c), (e)). 반면 대기 직접 포집 기술(DAC)을 적용할 경우에는 브라운 수소, 그린 수소, 그레이 수소 활용 시 각각 39%, 3%, 54%의 배출 기여도가 도출되었다(Fig. 2(b), (d), (f)). 이는 수소 공급원의 탄소 집약도와 탄소 포집 기술의 적용 방식이 상호 결합되어, 에틸렌 생산 공정에서 발생하는 온실가스 총배출량을 유의미하게 좌우한다는 점을 시사한다. 다시 말해, 포집 공정이 동일하더라도 수소 생산 경

로(브라운, 그린, 그레이)에 따라 배출 기여도가 달라지며, 나아가 동일한 수소 생산 경로에서도 탄소 포집 기술(MEA 또는 DAC)의 선택에 따라 상대적 배출 기여도가 변동함을 알 수 있다.

4. 방법론 개발 및 감축효과 산정 시 고려사항

4.1. 베이스라인 시나리오 설정

에틸렌 생산 기술은 전 세계적으로 매우 다양하게 구현되고 있으며, 원료 및 공정별로 에너지 사용량과 배출 특성이 상이하다. 일반적으로 석유 정제 과정에서 확보되는 납사(naphtha), 액화석유가스(LPG), 중질유, 프로판 등을 열분해(steam cracking)하여 에틸렌을 생산하는 방식, 천연가스나 석탄 가스를 활용한 경로, 촉매반응 기반 공정 등 여러 대체 기술들이 존재한다. 이처럼 서로 다른 제조 기술과 투입 원료에 따라 에너지 투입량과 에너지원이 달라지고, 이는 결국 총 탄소 배출량에도 직접적인 영향을 미치게 된다. 이에 따라, CCU 기술을 적용한 에틸렌 생산 프로젝트에서 실제로 발생하는 온실가스 감축량을 타당성 있게 산정하기 위해서는, 해당 프로젝트 활동이 없었을 경우 합리적으로 예상되는 에틸렌 생산 방식을 정의하는 과정(베이스라인 시나리오 설정)이 필수적이다. 즉, 대상 프로젝트 활동의 감축 효과는 ‘대안적인 에틸렌 생산 시나리오(예: 납사 기반 열분해 공정)’와 비교하여 산출되므로, 어떤 베이스라인 시나리오를 채택하느냐에 따라 실제 감축량의 추정치가 달라질 수 있다.

특히 베이스라인 시나리오를 정하기 위해서는 먼저 범·제도적 제약 및 지역적 특성 분석이 필요하다. 분석 대상 프로젝트 활동이 이루어지는 지역(또는 국가)에서, 법률이나 정책적 규제, 에너지·원료 인프라 등으로 인해 적용 가능하거나 불가능한 생산 기술들이 존재한다. 예를 들어, 특정 국가에서는 LNG(액화천연가스) 기반 에틸렌 생산이

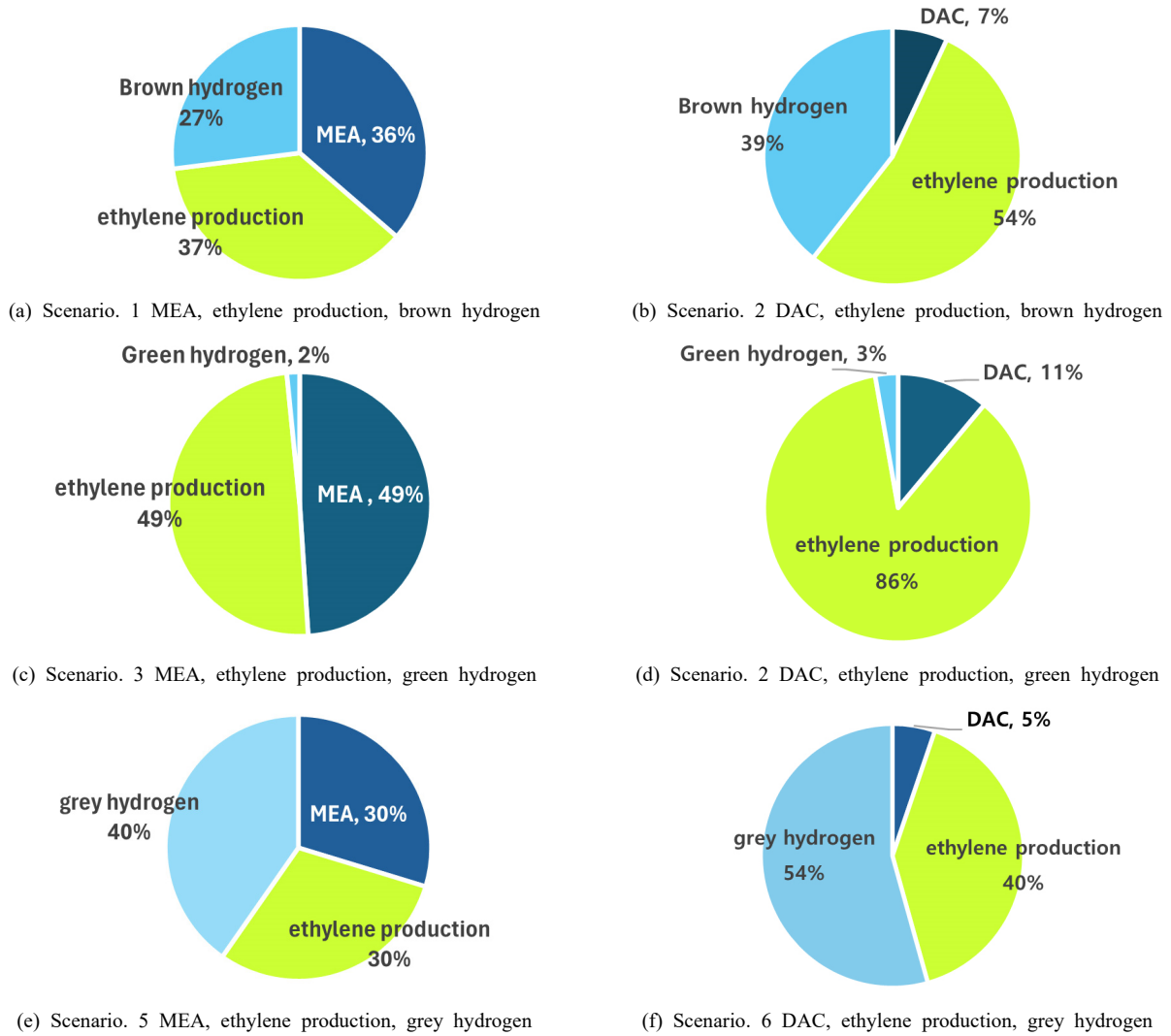


Fig. 2. Emission contribution analysis of ethylene production process

보편화되어 있는 반면, 다른 지역에서는 납사 기반 공정 위주로 시장이 형성될 수 있다. 따라서 이러한 지역적 특성을 종합 고려해 ‘실질적으로 적용 가능한(availability) 에틸렌 생산 기술’을 도출해야 한다. 다음으로 기술·경제적 타당성 평가가 요구된다. 여러 기술 중 법·제도적 제약에서 배제되지 않고 적용 가능성이 있는 생산 기술이 복수로 도출된다면, 이들 대안 기술들의 재무·경제적 지표(예: 제조원가, 내부수익률, 투자비용, 수익성 등)를 비교·검토해야 한다. 이를 통해 경제적 측면에서 가장 매력적인(가장 낮은 원가 또는 높은 수익성을 보이는) 대안이 “가장 타당한 베이스라인 시나리오”가 된다. 왜냐하면 실질적으로 새로운 프로젝트 활동이 일어나지 않았을 경우,

일반적으로 시장 참여자들은 가장 경제성이 높은 방식을 선택하여 에틸렌을 생산할 가능성이 높기 때문이다.

이렇듯 베이스라인 시나리오를 합리적으로 설정하는 작업은 CCU 기술을 활용한 에틸렌 생산의 감축 효과를 정확히 산정하기 위한 기초 단계이며, 프로젝트가 수행될 지역의 규제 환경, 원료 수급 여건, 그리고 생산 기술들의 경제성 평가 결과를 종합적으로 고려하여 가장 현실성이 높은 대안을 선정해야 한다. 이는 추후 탄소 크레딧 발행이나 국제 감축 사업 등록 시, 해당 프로젝트의 추가성(additionality)을 검증하는 과정에서도 핵심적인 근거로 활용될 수 있다.

Table 4. Emission factors for different ethylene production

Product	Emission factor	Reference	Note
Naphtha cracking 1	1.73	2006 IPCC guideline	West Europe
Naphtha cracking 2	0.26	Youk et al. (2018)	Adjusted with West Europe matrix
Naphtha cracking 3	0.40	Youk et al. (2018)	Adjusted with Japan matrix
Gas oil	2.29	2006 IPCC guideline	-
Ethane	0.95	2006 IPCC guideline	-
Propane	1.04	2006 IPCC guideline	-
Butane	1.07	2006 IPCC guideline	-

4.2. 에틸렌 생산의 베이스라인 배출계수

에틸렌 생산 공정에 대한 배출계수는 2006 IPCC 가이드라인에서 제시하고 있으나, 이는 서유럽 지역의 데이터를 근거로 하여 산정된 결과이므로 국내 실제 상황과는 일정 부분 차이가 존재한다. Youk et al. (2018)은 IPCC가 제시한 에틸렌 배출계수를 국내 산업 구조에 보다 부합하도록 보정한 바 있으며, 이 과정에서 나프타 기반 에틸렌 생산이 주를 이루는 우리나라와 유사한 생산방식을 채택하고 있는 서유럽·일본의 투입물 및 산출물 매트릭스를 비교·분석하여 조정값을 도출하였다. 나아가 IPCC 가이드라인은 나프타 이외에도 가스오일(gas oil), 에탄(ethane), 프로판(propane) 등 다양한 원료로부터 생산되는 에틸렌에 대해 배출계수를 제시하고 있어, 개별 국가·산업 특성에 따른 공정별 배출량 산정 시 이를 참조하거나 보완하여 활용할 수 있다. 이러한 자료들은 향후 국제감축사업 방법론 개발 시 베이스라인 산정을 위한 근거값으로서 중요한 역할을 할 수 있을 것이다.

4.3. 프로젝트 활동 배출에 대한 누출량 고려

CCU 기술을 적용해 에틸렌을 생산하기 위해서는, 배가스 및 이산화탄소와 더불어 수소가 촉매 반응을 통해 결합해야 하는데, 통상적으로 수소 생산 시설의 배가스에 함유된 수소만으로는 양이 부족하므로 추가적인 수소 투입이 필요하다. 이때, 수소 생산 방식(예: 그린수소, 그레이수소, 브라운수소)과 원료(예: 전기, 천연가스, 석탄)에 따라 온실가스 배출 특성이 달라지므로, 추가로 투입되는 수소의 양 뿐 아니라 저탄소 방식(그린수소 등)의 채택 여부가 프로젝트의 총 온실가스 감축량에 유의미한 영향을 미칠 수 있다. 아울러, 프로젝트 활동 과정에서 시스템 경계 밖에서 발생하는 수소 생산·공급 관련 배출량(누출량)이 존재할 수 있으므로 이를 철저히 파악하고 반영할 필

요가 있다. 또한, CCU 공정 내 투입된 CO₂ 가운데 반응하지 않고 잔류·배출되는 분량이 발생할 수 있다면, 이 역시 누출량으로 간주하여 감축량 산정에서 고려해야 한다. 결국, 시스템 경계 설정 시 상류부문 배출량, 프로젝트 활동 및 누출량이 상호 연동되어 감축량 산정에 영향을 미치는 만큼, 각 배출원을 명확히 구분·관리하고 신뢰도 높은 배출계수와 데이터를 확보하는 것이 중요하다.

4.4. 감축량 산정방법 설정 및 모니터링 방법론

온실가스 감축량은 베이스라인 시나리오의 배출량에서 프로젝트 활동에 따른 배출량과 시스템 경계 밖에서의 누출량을 차감하여 산정된다. 따라서 시스템 경계 설정을 통해 식별된 배출원별로 온실가스 배출량을 산정하기 위한 산정식과 각 인자를 정의하고, 각 인자에 대한 데이터 모니터링 방법이 검증 가능한 방식으로 제시되어야 한다. 특히, 공정 배가스 기반의 CCU 기술을 적용한 프로젝트 활동에서는 배가스 내 이산화탄소와 추가 투입원인 수소에 대해 신뢰할 수 있는 데이터 측정 및 모니터링 방안이 필요하다.

4.4.1. 배가스 내 이산화탄소 활용에 따른 탄소 격리 효과

배가스 내에 포함된 CO₂가 에틸렌 생산의 원료로 활용되므로, 프로젝트 활동이 없었을 경우, 대기 중으로 배출되었을 배가스 내 CO₂의 양을 온실가스 감축 효과에 반영할 수 있는 지에 대한 판단 기준과 방법론이 제시될 필요가 있다. 이 때, 배가스 내 이산화탄소에 포함된 탄소가 공정 반응을 통해 생산되는 에틸렌 성분에 포함되는데, 에틸렌 성분이 다시 최종 사용 제품 생산에 투입된 후, 다시 대기 중으로 배출되지 않고, 얼마나 오래 격리될 수 있는 지 여부가 감축 효과 주장의 타당성에 중요한 요소이다. 또한, 대기 중으로 배출되지 않고 영구히 격리되거나, 충분히 장기 간 격리된다는 것을 입증하기 위해 에틸렌

성분을 활용한 제품 생산 하류 부문에 대해 적용 가능한 객관적인 모니터링 방법이 필요하다.

Verra의 탄소 포집을 통한 플라스틱 생산의 방법론 (VCM0040 「Methodology for Greenhouse Gas Capture and Utilization in Plastic Materials」)에 따르면 베이스라인에서의 탄소저장효과 산정 방식을 제시하고 있으나, 규제 시장의 방법론 상에서 위와 같은 제품에의 탄소 저장에 대한 감축량 산정을 제시한 바가 없어, 현 단계에서 탄소를 함유하는 제품에 대한 탄소 저장 효과를 주장하기에는 어려움이 있다. 따라서, 이는 추후 이루어지는 국제사회의 논의를 지속적으로 검토하여 반영여부를 결정할 필요가 있다.

4.4.2. 보수적 베이스라인 배출량 산정

파리협정에서는 제6조에 따른 온실가스 감축 실적에 대한 국가 간 이전을 통한 감축 협력 사업 추진 시에 보수적인 베이스라인 설정을 통해 과대평가된 감축량을 방지하고, 실제로 의미있는 감축이 이루어지도록 강화된 지침을 제시하고 있다. 특히, 과거 교통의정서 청정개발체제에서 적용된 베이스라인 설정 기준과 달리, 과거 역사적 배출량이나 기존 실제 배출량을 적용하는 경우에도 연도별로 하향 조정된 배출량을 베이스라인으로 설정하도록 하였다. 아직 이에 대한 구체적인 방법론과 가이드라인이 제시되어 있지 않지만, 향후 파리협정이 요구하는 방침에 부합하는 베이스라인 설정을 위해서는 기존 화석연료 기반 원료를 활용한 에틸렌 생산 공정의 과거 배출 수준에서 연도별 하향 조정된 배출량을 적용하는 방안이 검토가 필요하다.

5. 결론

CCU 기술은 국제사회의 2050 넷제로 달성을 위해 필수적인 기술로 주목받고 있으며, 해당 기술의 감축효과를 정량화 하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 한편, 이러한 감축량 산정 연구 외적으로 실제적인 탄소 크레딧을 확보할 수 있는 온실가스 감축사업의 수행을 위해 국제 기준에 부합하는 방법론의 개발이 필요한 상황이다. 이에 본 논문에서는 에틸렌 생산 기술을 대상으로 세부 공정별 배출 기여도를 분석하여 원료에 따른 감축 잠재력을 확인하고, 해당 기술을 바탕으로 CCU 기술의 온실가스 방법론 개발 시 주요 고려사항을 도출하였다.

분석 결과 에틸렌 생산의 주 원료인 CO₂ 및 H₂의 수급 원에 따라 에틸렌 생산 기술의 전체 온실가스 배출량에 유의미한 영향을 줄 수 있음을 확인하였다. 재생에너지 기반의 그린수소를 활용하나, 석탄화력 발전소에서 포집된 탄소를 활용할 경우 탄소포집으로 인한 배출량이 전체 배출량의 약 49%의 배출 기여도를 나타내었으며, 반대로 재생에너지 기반의 대기 직접 탄소 포집 기술을 적용하더라도 납사 분해공정의 부생수소인 브라운 수소를 활용할 경우 수소 생산으로 인한 배출이 총 배출량의 39%를 차지함을 확인하였다. 이는 CCU 기술이 적용되지 않았을 시 대기 중으로 배출되었을 CO₂를 활용함으로써 기존 석유 기반의 에틸렌 생산을 대체할 경우, 해당 CCU 기술로 인한 배출이 반드시 환경에 긍정적인 효과를 수반하는 것이 아님을 시사한다. 특히 기술에 따라 추가적인 수소의 투입량이 많을수록 수소의 공급원에 따른 배출영향을 더욱 커질 것으로 예상할 수 있다.

CCU 기술이 지속가능한 기후기술로 자리잡기 위해서는 탄소 포집, 에틸렌 생산, 수소 생산의 주요 기술별 에너지 사용의 효율성을 확보하고, 전력의 수급을 위한 에너지원을 재생에너지 기반으로 전환하는 노력이 높은 수준으로 요구될 것으로 보인다. 다만, 본 연구에서는 탄소 포집과 수소생산이 에너지 사용량 및 이에 따른 온실가스 배출량을 기존 연구 사례를 기반으로 분석하였으므로 통합적인 공정 설계 시 추가적으로 에너지 효율을 달성하거나, 반대로 추가적인 배출이 발생할 수 있다. 이에 따라 추후 수행될 CCU 기술에 대한 연구를 통해 면밀한 감축 효과 분석이 가능할 것으로 사료된다.

사사

본 연구는 2024년도 정부(산업자원부)의 재원으로 CCU 기반 합성연료의 품질 기준 개발 및 상용화 전략 (20224C10300040)의 지원을 받아 수행되었습니다.

Reference

- Cuevas-Castillo GA, Michailos S, Akram M, Hughes K, Ingham D, Pourkashanian M. 2024. Techno economic and life cycle assessment of olefin production through CO₂ hydrogenation within the power-to-X concept. *J Cleaner Prod* 469: 143143. doi: 10.1016/j.jclepro.2024.

- 143143
- Do TN, Kim J. 2020. Green C₂-C₄ hydrocarbon production through direct CO₂ hydrogenation with renewable hydrogen: Process development and techno-economic analysis. *Energy Convers Manage* 214: 112866. doi: 10.1016/j.enconman.2020.112866
- International Energy Agency (IEA). 2023. Net Zero Roadmap: A global pathway to keep the 1.5°C goal in reach. Paris, France: IEA.
- IPCC. 2022. Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, NY: Cambridge University Press.
- Joint Ministries. 2023 Mar. Basic Plan for Carbon Neutrality and Green Growth.
- Kätelhön A, Meys R, Deutz S, Suh S, Bardow A. 2019. Climate change mitigation potential of carbon capture and utilization in the chemical industry. *PNAS* 116(23): 11187-11194. doi: 10.1073/pnas.1821029116
- Kim J, Johnson TA, Miller JE, Stechel EB, Maravelias CT. 2012. Fuel production from CO₂ using solar-thermal energy: System level analysis, *Energy Environ Sci* 5: 8417-8429. doi: 10.1039/C2EE21798H
- Kim JK. 2019. Challenges for the implementation of the hydrogen economy: Determining an appropriate hydrogen production portfolio. *KEEI Energy Focus* 16(4): 31-38.
- Ren T, Patel MK, Block K. 2008. Steam cracking and methane to olefins: Energy use, CO₂ emissions and production costs. *Energy* 33: 817-833. doi: 10.1016/j.energy.2008.01.002
- Spallina V, Campos Velarde I, Medrano Jimenez JA, Godini HR, Gallucci F, Van Sint Annaland M. 2017. Techno-economic assessment of different routes for olefins production through the oxidative coupling of methane (OCM): Advances in benchmark technologies, *Energy Convers Manage* 154: 244-261. doi: 10.1016/j.enconman.2017.10.061
- World Economic Forum. 2021. Back to the future: The story behind the IEA's Net Zero Roadmap; [accessed 2024 Oct 2]. <https://www.weforum.org/agenda/2021/06/the-story-behind-iea-net-zero-roadmap/>
- Youk SK, Jeon EC, Yoo KS. 2018. Methodology of CO₂ emission factor verification and quantitative assessment in ethylene product processes. *J Clim Change Res* 9: 69-74. doi: 10.15531/KSCCR.2018.9.1.69