

# 전력망 탄소 집적도 저감에 따른 국내 미세조류 기반 지속 가능한 항공유의 온실가스 배출 감축에 대한 전과정 평가

송화섭<sup>†</sup>

국립금오공과대학교 기계공학부

## Life Cycle Assessment on the Potential Greenhouse Gas Emissions Reduction from Domestic Microalgae-based Sustainable Aviation Fuels by Implementing Less Carbon-intensive Electricity

HWASUP SONG<sup>†</sup>

School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi 39177, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author :  
hwasup.song@kumoh.ac.kr

Received 14 May, 2025  
Revised 30 May, 2025  
Accepted 12 June, 2025

**Abstract** >> Greenhouse gas emissions of sustainable aviation fuel production from domestic microalgae are quantitatively assessed from a life cycle perspective and compared with a fossil jet-fuel. Results indicate the necessity of reducing carbon intensity of the national electricity grid, as the currently viable production technology is energy intensive. Future scenarios are discussed which adopts less-polluting electricity to the fuel production pathway, thereby emphasizing the use of sustainable aviation fuels for achieving carbon neutrality in the aviation sector.

**Key words** : Life cycle assessment(전과정 평가), Sustainable aviation fuels(지속 가능한 항공유), Microalgae(미세조류), Biomass(바이오매스), Carbon neutrality(탄소중립), Greenhouse gas reduction(온실가스 감축)

## 1. 서론

산업혁명 이후 폭발적으로 증가해 온 화석연료 사용에 의하여 누적된 대기 중의 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 농도는 최근 400 ppm을 돌파하며 관측 사상 최댓값을 계속 경신하고 있다<sup>1)</sup>. CO<sub>2</sub>는 온실효과에 의한 지구 온난화의 주범으로 발전, 수송, 난방 등 일상생활 전 분야에서 골고루 배출되는데 그 가운데 수송 분야에

서 배출되는 CO<sub>2</sub>가 약 1/4 정도를 차지하는 것으로 알려져 있다<sup>2)</sup>. 육상 운송의 경우 전동화 기술과 에너지 저장 기술의 발달, 보조금 지급 정책 등으로 점차 전기자동차 보급률이 증가하고 있으나 해상 및 항공 운송 부문에서는 추력 대 중량비를 감안하였을 때 기존 화석연료 대비 매우 낮은 배터리의 에너지 밀도 때문에 아직 실험적 소규모 선박이나 소형 항공기 외에는 전동화가 요원한 상황이다. 이에 따라 실

질적인 CO<sub>2</sub> 배출 저감을 위한 대안으로 대기 중에 이미 존재하는 CO<sub>2</sub>를 회수하여 신재생에너지 기반 수소(H<sub>2</sub>)와 함께 연료로 재합성하는 전기합성연료(electronic synthetic fuels) 또는 바이오매스나 폐자원 등을 원료로 사용하여 CO<sub>2</sub> 신규 발생을 억제하는 지속 가능한 항공유(sustainable aviation fuel, SAF)의 생산 및 활용이 최근 각광받고 있다. 특히 SAF의 경우 유럽연합(European Union, EU)의 탄소중립 사회구현 계획을 담은 Fit for 55에 따르면<sup>3)</sup> EU 권역 내 취항하는 모든 항공기에 대하여 2025년부터 최소 2%의 SAF를 기존 항공유에 혼합할 것을 의무화하는 조항을 발동하였으며 점차 혼합 비율이 높아져 2050년에는 SAF 비중이 70%가 되도록 규제할 예정이다. 한편 SAF의 경우 기존 항공기 동력 계통이나 연료 공급 계통의 변경 없이 그대로 사용 가능(drop-in)하여야 한다는 조건에 따라 국제 표준화 기구인 ASTM International에서 현시점까지 기술 완성도가 높은 몇 가지 SAF 제조 기술을 공식적으로 인증하였다<sup>4)</sup>. 여기에는 각종 바이오매스를 원료로 한 alcohol-to-jet 공정이나 hydroprocessed esters and fatty acids (HEFA) 공정 또는 Fischer-Tropsch와 같은 CO<sub>2</sub> 기반 재합성 공정이 포함된다<sup>5)</sup>.

전과정 평가(life cycle assessment, LCA)란 어떤 제품이나 서비스에 대하여 투입되거나 발생하는 각종 수치에 대하여 대상의 생애 전주기, 즉 life cycle을 모두 포함시켜 계량화하는 방법론이다<sup>6)</sup>. 예를 들어 내연기관 자동차와 전기자동차의 단위 주행 거리당 CO<sub>2</sub> 발생량을 비교하고자 할 때 차량 주행만을 놓고 보면 전기자동차의 주행 중 CO<sub>2</sub> 발생량을 0으로 볼 수 있으나 LCA 관점에서는 실제 해당 차량을 움직이기 위하여 필요한 전력의 생산 및 송/배전, 충전까지의 전체 과정 동안 발생하는 CO<sub>2</sub> 총량과 각 단계에서의 손실 등 효율을 고려하고 정량적으로 비교함으로써 결국 전기자동차의 도로 주행에서도 CO<sub>2</sub>가 배출된다고 보는 것이다. 내연기관 자동차의 경우에도 마찬가지로 배기구에서 배출되는 CO<sub>2</sub>만이 아니라 연료의 생산과 운송, 정제, 보급, 주유에 이르는 모든 과정 동안의 CO<sub>2</sub> 발생량을 수치화하여 정확

한 비교가 가능하다. 실제 지구 전체에 가해지는 온실효과 잠재력(global warming potential, GWP)의 측면에서는 LCA적 관점이 합리적이며 EU를 비롯한 주요 선진국에서는 배출가스 규제 등에서 점차 LCA 결과를 바탕으로 규제 준수 여부를 판단할 예정이다.

따라서 본 논문에서는 SAF 생산 과정 중 어떤 단계에서 온실가스(greenhouse gas, GHG) 배출이 지배적인지 확인하고 이를 효과적으로 감축하여 기존 화석연료 기반 항공유 대비 SAF 사용의 이점을 극대화하기 위하여 국내 바이오매스 중 미세조류를 이용한 SAF 생산 전과정을 LCA 관점에서 분석하였다. 그리고 이를 통해 국내 항공 운송 부문의 탄소중립 달성을 위한 기술적, 정책적 노력이 집중되어야 하는 부분을 파악하고자 한다.

## 2. 연구 방법론

### 2.1 LCA 도구

연구에 사용한 LCA 도구는 미국 Argonne 국립 연구소에서 개발한 greenhouse gases, regulated emissions, and energy use in technologies (GREET) model이며 가장 최근에 공개된 2024 버전을 이용하였다<sup>7)</sup>. GREET은 LCA 관점에서의 공정 및 생산, 수송 부문 GHG 배출량 관련 연구에 널리 사용되며 그 신뢰성이 이미 입증된 바 있다. GREET 내에 포함된 전력망 GHG 배출량이나 공정 에너지(천연가스, 경유 등) GHG 배출량의 경우 기본적으로 미국 통계 자료 기반 수치가 입력되어 있는데 본 연구에서는 국내 실정을 반영한 GHG 배출량 계산을 위하여 전력망 데이터의 경우 한국전력공사에서 공개하는 연도별 발전원별 발전량 분담률 통계 자료<sup>8)</sup>를 대입하여 수정하였고 공정 에너지의 경우 국내 실정에 맞게 수정된 Korea GREET을 이용한 기존 연구<sup>9,10)</sup>에서 해당 데이터를 인용하여 수정하였다.

## 2.2 미세조류 및 SAF 생산 방법

한국은 삼면이 바다로 둘러싸인 지리적 특성으로 인하여 해양 자원을 활용한 바이오연료 생산에 유리한 조건을 갖추고 있다. 그 가운데 미세조류를 이용하여 생산한 연료는 3세대 바이오연료로 분류되며 식용작물 기반 1세대 바이오연료나 비식용 바이오매스 기반 2세대 바이오연료 대비 식량 공급에 대한 위협 또는 경작지 확대에 따른 부작용을 최소화할 수 있을 뿐 아니라 단위 면적당 지질 함량이 매우 높고 해수에서도 자랄 수 있어 국토가 좁고 경작지가 제한적인 한국 현황에 적합한 대안 에너지원으로 주목 받고 있다. 미세조류로부터 추출한 바이오 오일은 항공유나 선박유와 같은 고밀도 연료로 전환하기 쉬워 에너지 다각화에도 기여한다. Table 1은 지질 함량이 높아 바이오연료용으로 많이 재배되는 주요 바이오매스 대비 미세조류의 우월한 바이오 오일 수율을 보여준다<sup>11)</sup>. 이에 따라 미세조류 배양에 적합한 지역을 선정하고 최적 배양 기술을 적용하여 바이오 오일 수율을 높일 경우 환경 보호와 지속 가능한 에너지 시스템 구축을 동시에 달성할 것으로 예상된다. 또한 바이오매스는 생장 과정에서 광합성에 필요한 CO<sub>2</sub>를 대기 중에서 대량으로 흡수하여 몸체에 고정하기 때문에 화석연료와 달리 대기 중에 CO<sub>2</sub>를 새로 추가하지 않는 탄소중립적 특징을 갖는다.

본 연구에서는 미세조류로부터 추출한 바이오 오일을 HEFA 공정으로 수소화 처리하여 SAF를 생산하는 과정을 고려했다. HEFA 공정에 의한 바이오매스 기반 SAF는 앞서 언급된 ASTM D7566에 의하

여 drop-in fuel로 인증된 것으로 최근 들어 미세조류를 HEFA 공정으로 처리하여 생산한 SAF에 관한 다양한 연구가 많이 발표되고 있다<sup>12,13)</sup>. SAF 생산 및 사용 전 단계에 대한 몇 가지 가정은 다음과 같다.

첫째, 미세조류 생장은 개방형 재배 수조(open pond)에서 이루어지며 원활한 CO<sub>2</sub> 공급과 부패 방지를 위한 수조 내 순환은 일반적으로 널리 사용되는 방식<sup>14)</sup>인 전기를 사용하는 수차에 의하여 진행된다. 재배 수조는 연평균 기온이 상대적으로 높아 연중 생산에 유리한 남부 지방 해안가에 위치하며 미세조류 생장 완료 후 1, 2차 탈수 및 바이오 오일 추출은 모두 재배 수조 바로 옆의 시설에서 진행된다. 바이오 오일 추출은 공업적으로 널리 사용되는 n-hexane 용매 추출법이 적용되며<sup>15)</sup> 공정에 필요한 열량과 전력 중 일부는 용매 추출 후 남은 잔여 바이오매스의 혐기성 소화(anaerobic digestion, AD)에 의하여 생성되는 바이오 가스(67% CH<sub>4</sub> + 33% CO<sub>2</sub>)를 열병합 발전(combined heat and power, CHP) 연료로 사용하여 얻는다<sup>14)</sup>. 만약 열량이나 전력이 부족할 경우에는 각각 소규모 천연가스 보일러를 사용하거나 국가 전력망에서 전력을 공급받는 것으로 가정한다.

둘째, 추출된 바이오 오일은 경유로 움직이는 23톤급 유조차에 실려 400 km 떨어진 인천광역시 내 정유산업단지로 옮겨져 HEFA 공정을 거친다. 공정에 필요한 수소는 천연가스 개질법으로 생산된 것을 사용하며 열에너지 공급에 필요한 천연가스는 국내 수입되는 물량과 동일한 것으로, 공정 가동에 필요한 전력은 국가 전력망에서 공급받는 것으로 가정한다.

셋째, 상기 정유산업단지에서는 인천국제공항과 김포국제공항으로 각각 직결된 50 km 길이의 전용 파이프라인이 있어 생산된 항공유나 SAF를 바로 공항으로 이송한다고 가정한다. 파이프라인 이송 동력은 국가 전력망에서 공급된다.

위 가정들에 따라 각 공정 또는 운송 단계에서 투입 및 배출되는 물질과 에너지, 공정 중의 손실량은 GREET에 기본으로 포함된 데이터를 이용하였으며 기본값이 아닌 데이터를 사용한 경우 Table 2에 값과 출처를 언급하였다<sup>16,17)</sup>. 또한 국가 전력망에서 전력

Table 1. Bio-oil yields from popular biomass

Type of biomass	bio-oil yield (gallons/acre·year)
Soybean	48
Camelina	62
Sunflower	102
Jatropha	202
Palm	635
Microalgae	1,000-6,500

**Table 2.** Mass and energy balance for the domestic microalgae-based SAF production pathway

Process	Value	Reference
Lipid content (dry wt. %)	21.4	25 <sup>14)</sup> , 15-58 <sup>16)</sup>
n-hexane loss during extraction (kg/kg-lipid)	0.055	Wet, 0.025-0.055 <sup>15)</sup> Dry, 0.007-0.015 <sup>15)</sup>
Dewatering (kWh/kg-microalgae)	→	0.041
Bio-oil tank lorry fuel economy (km/L-diesel)	→	3.35
HEFA recovery (kg-lipid/kg-SAF)	→	1.2676 <sup>17)</sup>
Hydrogen supply in HEFA process (MJ/kg-SAF)	→	4.81 <sup>17)</sup>
Natural gas supply in HEFA process (MJ/kg-SAF)	→	0.82 <sup>17)</sup>

을 공급받는 상황이 발생하는 경우 2023년도 기준 국내 발전원별 분담률을 반영하여 계산된 단위 공급 전력량당 GHG 배출계수를 적용하여 해당 단계에서의 GHG 배출을 계산하였다. 이때 고려되는 GHG는 CO<sub>2</sub> 이외에도 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O가 있으며 이들은 여러 경로로 배출되어 대기권에 도달하여 100년간 머무르는 동안 동일한 양의 CO<sub>2</sub> 대비 각각 29.8배와 273배 더 많은 GWP-100를 갖는다<sup>10,18)</sup>. 이를 반영하여 최종적으로 kWh당 CO<sub>2</sub> 배출량은 gCO<sub>2</sub>eq/kWh로 표현할 수 있으며 2023년 국내 발전원별 분담률 기준 배출계수는 494 gCO<sub>2</sub>eq/kWh로 계산된다.

### 2.3 분석 대상 시스템 경계 설정

LCA 과정에서는 분석 대상이 되는 시스템의 경계를 명확하게 설정하여야 한다. 일반적으로 육상 운송 수단에 대한 LCA를 well-to-wheel (WTW)로 부르기도 하는데<sup>6,10)</sup> 이때 well은 문자 그대로 화석연료인 원유, 또는 전기 생산을 위해 사용된 석탄, 액화천연가스, 핵연료 등 발전 연료의 “우물”의 의미로 에너지 전달체의 시작점을 뜻하며 wheel은 최종 단계인

차량의 “바퀴”를 뜻한다. 결국 WTW는 에너지 전달체 채굴 시점으로부터 여러 단계의 에너지 변환, 운송, 공급 및 각 과정 동안의 손실량이나 변환 효율 등을 모두 고려하여 최종적으로 차량 이동 시점에서의 에너지 사용량, GHG 배출량 등을 계산하는 것으로 이해할 수 있다. 같은 맥락에서 항공 운송 수단에 대한 분석의 경우 wheel 대신 날개 후단의 항적(wake)을 의미하는 well-to-wake (WTWa)라는 용어가 널리 사용된다. 또한 보다 세부적인 분석을 위하여 에너지 전달체의 채굴부터 최종 연료 제품 생산 및 운송 수단으로의 주유 직전 단계인 주유기(pump)까지를 well-to-pump (WTP)로, 주유 후 운송 수단 자체의 열효율이나 기계적 효율 등만을 고려한 pump-to-wheel 또는 pump-to-wake (PTWa)로 세분화하기도 한다.

이에 따라 앞서 도입한 국내 미세조류 기반 SAF WTWa 전 단계는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 주목할 점은 항공기 엔진에서 발생한 CO<sub>2</sub>가 대기 중으로 배출된 다음 미세조류 광합성의 원료로 다시 사용된다는 것으로, 이에 따라 PTWa 배출량은 0으로 처리된다. 이는 일반적으로 바이오매스 기반 연료의 사용 단계에서 발생하는 CO<sub>2</sub>는 생물 기원(biogenic)이기 때문에 가능한 상황으로 국제 항공 운송 협회(International Air Transport Association, IATA) 기준을 따르는<sup>19)</sup> 바이오연료 관련 LCA 연구에서 널리 통용된다<sup>20)</sup>. 본 연구에서도 동일한 기준을 적용하였다. 따라서 미세조류 기반 SAF의 WTWa GHG 배출량은 WTP GHG 배출량과 같다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 최근 국내 전력망 탄소 집적도 반영 결과

최종적으로 계산된 SAF 단위 에너지량당 GHG 배출량의 표현 단위는 gCO<sub>2</sub>eq/MJ로 표시되며 이를 functional unit으로 칭한다.

SAF 생산과 사용이 실질적인 GHG 배출 저감에 기여하기 위해서는 SAF의 WTP GHG 배출량이 화석연료 기반 항공유의 WTWa GHG 배출량보다 낮

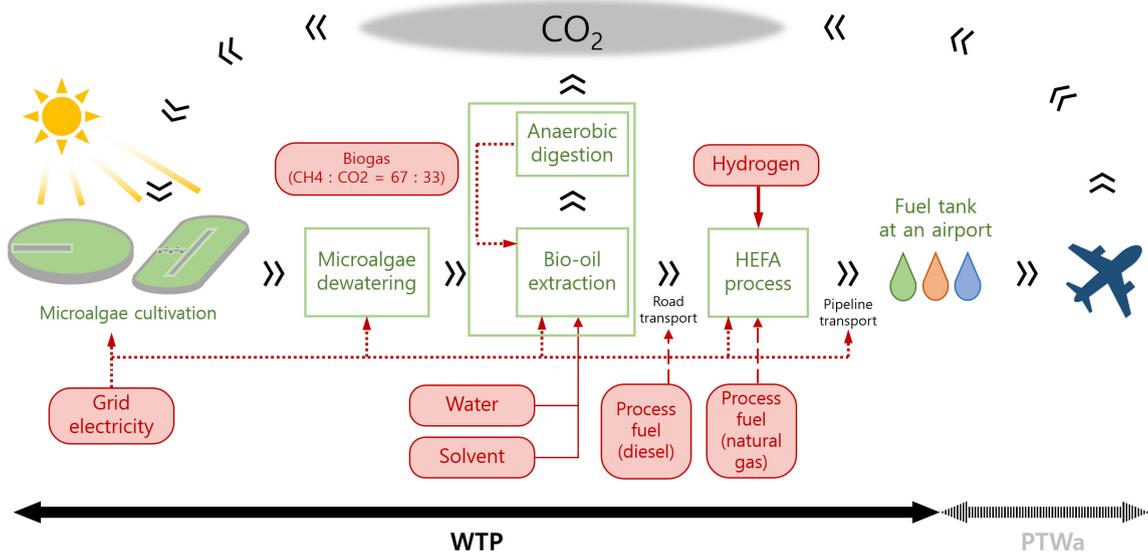


Fig. 1. WTWa scheme of microalgae-based SAF production via HEFA process and its usage. Due to the biogenic nature of the carbon in this life cycle, the PTWa emission is considered zero

아야 한다. 한국 기준 항공유의 최근 WTWa GHG 배출량은 85.0 gCO<sub>2</sub>eq/MJ이며 생산 국가에 따라 81.1부터 94.8 gCO<sub>2</sub>eq/MJ까지의 분포를 가지므로 국내 항공유는 상대적으로 GHG 배출량이 낮은 축에 속함을 알 수 있다<sup>21)</sup>. 현시점의 국내 전력망 기준 국내 미세조류 기반 SAF의 WTP GHG 배출량은 86.95 gCO<sub>2</sub>eq/MJ로 계산되었으며 이에 따라 현재 상태로는 미세조류 기반 SAF 생산과 사용이 국내 항공 운송 분야의 탄소 중립 구현에 도움이 되지 못한다는 사실을 알 수 있다. Fig. 2에 생산공정 단계별 GHG 배출량을 나타냈으며 주로 미세조류에서 바이오 오일을 추출하고 잔류물의 AD 처리에 의한 바이오 가스 획득 과정에서 대량의 GHG가 배출되는 것으로 나타난다. AD에 의한 바이오 가스 획득 시 소량의 CH<sub>4</sub>가 장치 외부로 누설되는 CH<sub>4</sub> leakage가 발생하는데, 앞서 언급한 대로 CH<sub>4</sub>의 GWP가 CO<sub>2</sub> 대비 훨씬 크기 때문에 약간의 누설만으로도 상당한 수준의 CO<sub>2</sub> 배출과 같은 효과가 나타난다. 기존 연구<sup>14)</sup>에서는 이러한 누설을 2%로 가정하고 있으며 본 연구에서도 같은 값을 적용하면 13.58 gCO<sub>2</sub>eq/MJ가 CH<sub>4</sub> leakage에 의한 것으로 계산된다. 이 값은 Fig. 2의 bio-oil extraction 단계에서 발생하는 GHG emission 값인 70.77 gCO<sub>2</sub>eq/MJ

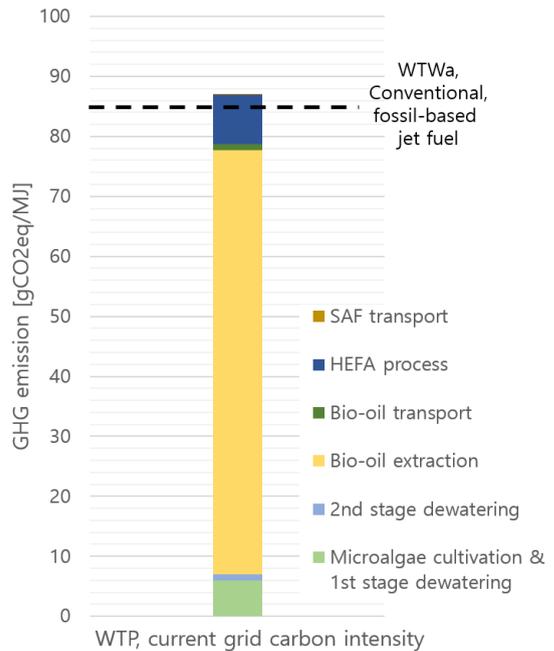


Fig. 2. Breakdown of the WTP GHG emissions of the domestic microalgae-based SAF pathway under the carbon intensity of 494 gCO<sub>2</sub>eq/kWh of current electricity grid

에 포함되어 있다. n-hexane 용매를 이용한 오일 추출 과정은 매우 에너지 집약적인 과정으로<sup>15)</sup> 미세조류 기반 바이오연료 생산 시 바이오 가스를 이용한

CHP 운전에도 불구하고 전력을 추가로 공급받아야 하는 경우가 대부분이다. 예를 들어 GREET을 이용한 미세조류 기반 바이오연료 생산에 관한 기존 연구에서는<sup>14)</sup> 미세조류 추출 바이오 오일 1 kg당 필요한 공정 에너지가 열량으로는 12,996 Btu, 전력량으로는 19,450 Btu인 반면 AD로 얻은 바이오 가스를 이용한 CHP 운전으로 얻는 열량과 전력량은 각각 18,911 Btu와 14,620 Btu로 계산하였다. 따라서 바이오 오일 1 kg당 4,830 Btu의 전력량을 그리드 전력망에서 공급받아야 하며 이는 전체 소요 전력량 중 약 24.8%에 해당한다. 본 연구에서도 같은 가정을 도입하였으며 따라서 바이오 오일 추출 과정에 투입되는 국가 전력망으로부터의 전기에너지가 높은 GHG 배출량을 나타낸다면 SAF 생산 과정에도 지대한 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다. 미국에서의 미세조류 기반 HEFA 공정에 의한 SAF 생산 공정의 WTP GHG 배출량을 LCA 기반으로 분석한 최근 연구 결과<sup>12)</sup>에서는 지역별 전력망 발전원별 분담률에 따라 70.5부터 185.3 gCO<sub>2</sub>eq/MJ 수준의 값을 보이며 따라서 본 연구에서 도출된 수치가 일반적인 미세조류 기반 HEFA 공정에 의한 SAF의 WTP GHG 결과와 일맥상통한다는 점과 미국 현황 대비 상대적으로 낮은 축에 속한다는 점을 알 수 있다. 다만 미국에서의 SAF 생산 과정은 이동 거리 등이 국내 실정과 크게 다를 가능성이 높아 양자 간의 직접적인 비교는 어렵다.

### 3.2 발전 부문 GHG 배출 개선에 의한 효과

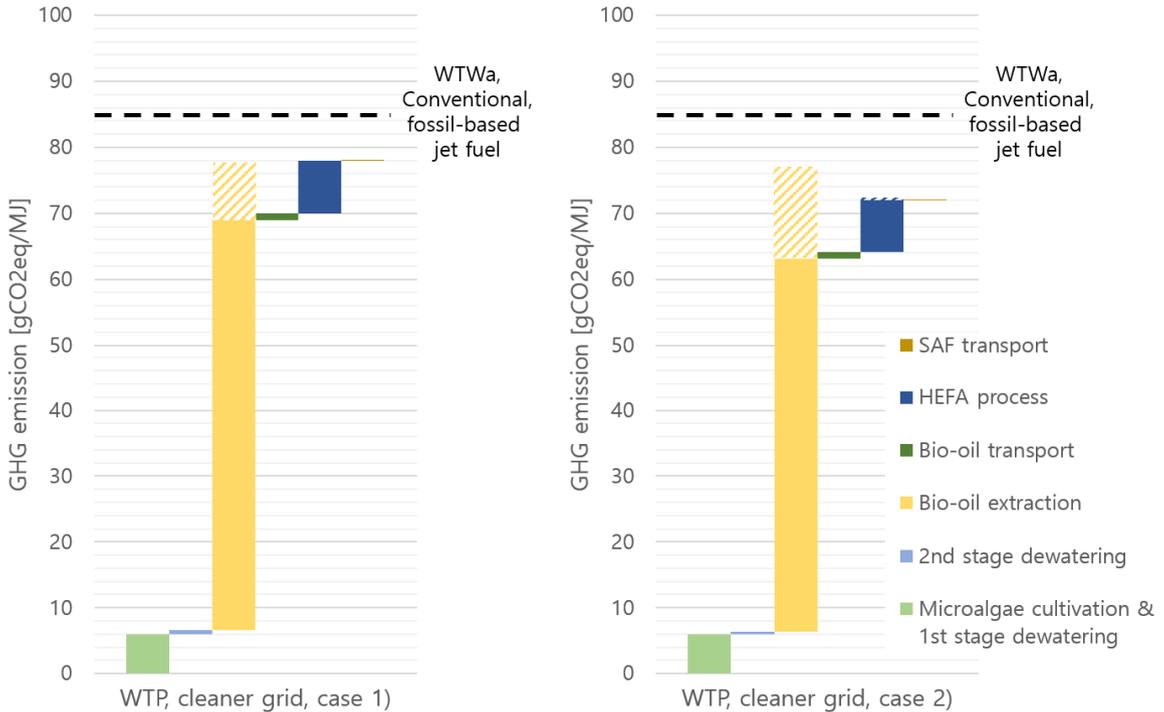
본 연구에서는 발전 부문 탄소 배출량 저감을 위한 두 가지 시나리오를 가정하고 각각에 의한 결과를 GREET에서 계산하였다. 모든 시나리오에서 발전 총량은 현재보다 증가하거나 감소하지 않는다고 가정하였다.

- 1) 화력(석탄) 발전 분담률을 현재(33.11%) 대비 절반으로 낮추고 줄어든 부분을 풍력 발전과 태양광 발전으로 각각 절반씩 나누어 충당한다.
- 2) 2024년 기준 EU 27개국에서의 전력망 GHG 배

출량 평균치와 동일한 수준으로 국내 발전 부문의 저탄소 전략 수립 및 개선이 이루어진다. 두 가지 시나리오에 따라 시나리오 1에서는 전력망 GHG 배출량이 322 gCO<sub>2</sub>eq/kWh로 감소하여 이를 적용하였고 시나리오 2에서는 EU-27과 동일한 210 gCO<sub>2</sub>eq/kWh 값을 적용하여<sup>22)</sup> 미세조류 기반 SAF의 WTP GHG 배출량을 다시 계산하였다. 그 결과 두 가지 시나리오 모두 미세조류 기반 SAF의 WTP GHG 배출량 저감에 의하여 화석연료 기반 항공유 대비 이점이 나타나는 것을 확인할 수 있으며 이는 Table 3과 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 가장 에너지 집약적이며 자체 CHP 외에 대량의 전력이 추가로 공급되는 바이오 오일 추출 공정에서 발생하는 GHG가 국가 전력망의 탄소 집적도 저감에 의하여 상당 부분 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 그럼에도 불구하고 AD에 의한 바이오 가스 획득 및 CHP 운전 과정에서 자체적으로 누설되는 CH<sub>4</sub>와 CO<sub>2</sub>가 존재하므로 설령 국가 전력망의 완전한 탈탄소화가 이루어지더라도 바이오 오일 추출 공정에서의 GHG 배출량이 0이 될 수는 없다. 다만 이 부분에서 기술적 개선에 의하여 CH<sub>4</sub> 누설량을 줄이거나 바이오 가스의 1/3을 차지하는 CO<sub>2</sub>를 탄소 포집 및 재활용(carbon capture and utilization) 기술에 의거하여 가능한 한 시스템 외부로 누설되지 않도록 한다면 바이오 오일 추출 공정에서 발생하는 GHG를 상당 부분 더 감축할 수 있는 가능성이 존재한다. 그 외에도 미세조류의 2차 탈수

Table 3. WTP GHG emissions per grid carbon intensity

Production steps	GHG emissions (gCO <sub>2</sub> eq/MJ)		
	Current grid	Scenario 1	Scenario 2
Cultivation & 1st stage dewatering	6.01	6.00	6.00
2nd stage dewatering	0.94	0.61	0.39
Bio-oil extraction	70.77	62.39	56.79
Bio-oil transport	0.95	0.95	0.96
HEFA process	8.23	8.02	7.88
SAF transport	0.05	0.03	0.02
Total	86.95	78.00	72.04



**Fig. 3.** Breakdown of the WTP GHG emissions of the domestic microalgae-based SAF pathway by adopting cleaner electricity scenarios. Hatched bars indicate the GHG reduction potential by 1) cutting off the coal power generation by half and expanding wind and solar power capacity, achieving 322 gCO<sub>2</sub>eq/kWh, or 2) reaching the recent EU-27 carbon intensity of 210 gCO<sub>2</sub>eq/kWh by multiple low-carbon strategies

과정이나 HEFA 공정 등에서도 약간의 GHG 감소가 이루어지나 그 정도는 바이오 오일 추출 공정 대비 미미함을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 국내 항공 운송 부문 탄소중립 목표 달성을 위한 SAF 생산 과정에서의 GHG 배출량을 정량적으로 파악하고 생산 공정별 배출량을 세부적으로 비교하였다. 연구 결과 SAF 사용이 기존 화석연료 기반 항공유 대비 실제적인 도움이 되기 위해서는 국내 전력망의 탄소 집적도 개선이 필요함을 확인하였다. 연구 도구로는 GHG 배출량을 LCA 관점에서 계산할 수 있는 GREET 2024를 사용하였으며 미세조류를 원료로 바이오 오일을 추출한 뒤 현재 산업적으로 숙련된 HEFA 공정에 의하여 SAF가 생산되는 과정을 고려하였다. 계산 결과 현시점의 국

내 전력망 발전원별 분담률을 유지하는 경우 SAF 생산이 항공 운송 부문 탄소중립 구현에 도움이 되지 못하므로 발전 부문의 저탄소 전략 수립 및 개선이 적극적으로 이루어져야 비로소 국내에서의 SAF 생산과 사용이 탄소중립 사회 구현에 의미 있는 기여를 할 수 있을 것으로 예상된다.

#### 후 기

이 연구는 정부(과학기술정보통신부) 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2022-00165913). 이 연구는 국립금오공과대학교 RISE 사업의 지원으로 수행되었음.

## References

1. X. Lan, P. Tans, and K. W. Thoning, "Trends in globally-averaged CO<sub>2</sub> determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements", Global Monitoring Laboratory, 2024, doi: <https://doi.org/10.15138/9NOH-ZH07>.
2. International Energy Agency (IEA), "World energy outlook 2024", IEA, 2024. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>.
3. European Union, "Regulation (EU) 2023/2405 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 on ensuring a level playing field for sustainable air transport (ReFuelEU aviation)", EUR-Lex, 2023. Retrieved from <http://data.europa.eu/eli/reg/2023/2405/2023-10-31>.
4. ASTM International, "Standard specification for aviation turbine fuel containing synthesized hydrocarbons", ASTM International, 2022, doi: <https://doi.org/10.1520/D7566-22>.
5. J. K. Kim, J. Y. Park, E. S. Yim, K. I. Min, C. K. Park, and J. H. Ha, "Bio-jet fuel production technologies for GHG reduction in aviation sector", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 26, No. 6, 2015, pp. 609-628, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2015.26.6.609>.
6. M. Kim, E. Yoo, and H. H. Song, "Well-to-wheel greenhouse gas emissions analysis of hydrogen fuel cell vehicle - hydrogen produced by Naphtha cracking", Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 25, No. 2, 2017, pp. 157-166, doi: <https://doi.org/10.7467/KSAE.2017.25.2.157>.
7. M. Wang, H. Cai, L. Ou, A. Elgowainy, M. R. Alam, T. Benavides, L. Benvenuti, A. Burnham, T. N. Do, M. Farhad, Y. Gan, U. Gracida, T. Hawkins, R. K. Iyer, S. Kar, J. Kelly, T. Kim, C. Kolodziej, H. Kwon, U. Lee, J. Y. Lim, X. Liu, Z. Lu, M. Morales, C. Ng, I. Pandey, S. Shukla, N. Siddique, P. Sun, T. Sykora, P. Vyawahare, and J. Zhou, "Summary of expansions and updates in R&D GREET<sup>®</sup> 2024", Argonne National Laboratory, 2024. Retrieved from: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2025/02/193610.pdf>.
8. Korea Electric Power Corporation, "Electricity mix from the Korean national grid in year 2024", e-Nation Index, 2024. Retrieved from [https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx\\_cd=1339](https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1339).
9. W. Choi, E. Yoo, E. Seol, M. Kim, and H. H. Song, "Greenhouse gas emissions of conventional and alternative vehicles: predictions based on energy policy analysis in South Korea", Applied Energy, Vol. 265, 2020, pp. 114754, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114754>.
10. J. Lee, C. Kim, and W. Choi, "Well-to-wheel greenhouse gas emissions of battery electric vehicles depending on charging time", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 5, 2024, pp. 475-481, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.5.475>.
11. L. Rodolfi, G. C. Zittelli, N. Bassi, G. Padovani, N. Biondi, G. Bonini, and M. R. Tedruci, "Microalgae for oil: strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor", Biotechnology and Bioengineering, Vol. 102, No. 1, 2009, pp. 100-112, doi: <https://doi.org/10.1002/bit.22033>.
12. J. M. Greene, D. Quiroz, B. J. Limb, and J. C. Quinn, "Geographically-resolved techno-economic and life cycle assessment comparing microalgae-based renewable diesel and sustainable aviation fuel in the United States", Environmental Science & Technology, Vol. 59, No. 7, 2025, pp. 3472-3483, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c06742>.
13. J. H. K. Lim, Y. Y. Gan, H. C. Ong, B. F. Lau, W. H. Chen, C. T. Chong, T. C. Ling, and J. J. Klemes, "Utilization of microalgae for bio-jet fuel production in the aviation sector: challenges and perspective", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 149, pp. 111396, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111396>.
14. E. D. Frank, J. Han, I. Palou-Rivera, A. Elgowainy, and M. Q. Wang, "Methane and nitrous oxide emissions affect the life-cycle analysis of algal biofuels", Environmental Research Letters, Vol. 7, No. 1, 2012, pp. 014030, doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/014030>.
15. L. Lardon, A. Hélias, B. Sialve, J. P. Steyer, and O. Bernard, "Life-cycle assessment of biodiesel production from microalgae", Environmental Science & Technology, Vol. 43, No. 17, 2009, pp. 6475-6481, doi: <https://doi.org/10.1021/es900705j>.
16. P. Singh, S. Kumari, A. Guldhe, R. Misra, I. Rawat, and F. Bux, "Trends and novel strategies for enhancing lipid accumulation and quality in microalgae", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 55, 2016, pp. 1-16, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.001>.
17. H. Xu, L. Ou, Y. Li, T. R. Hawkins, and M. Wang, "Life cycle greenhouse gas emissions of biodiesel and renewable diesel production in the United States", Environmental Science & Technology, Vol. 56, No. 12, 2022, pp. 7512-7521, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c00289>.
18. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "Sixth assessment report", IPCC, 2023. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>.
19. International Air Transport Association (IATA), "Developing sustainable aviation fuel (SAF)", IATA, 2025. Retrieved from <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/sustainable-aviation-fuels/>.
20. E. Yoo, U. Lee, and M. Wang, "Life-cycle greenhouse gas emissions of sustainable aviation fuel through a net-zero carbon biofuel plant design", ACS Sustainable Chemistry & Engineering, Vol. 10, No. 27, 2022, pp. 8725-8732, doi: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c00977>.

21. L. Jing, H. M. El-Houjeiri, J. C. Monfort, J. Littlefield, A. Al-Qahtani, Y. Dixit, R. L. Speth, A. R. Brandt, M. S. Masnadi, H. L. MacLean, W. Peltier, D. Gordon, and J. A. Bergerson, "Understanding variability in petroleum jet fuel life cycle greenhouse gas emissions to inform aviation decarbonization", *Nature Communications*, Vol. 13, 2022, pp. 7853, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35392-1>.
22. European Environment Agency (EEA), "Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in Europe", EEA, 2024. Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1>.