Check for updates

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 37, No. 5, 2026, pp. 558~570
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2026.37.5.558

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

국내 바이오디젤의 Well-To-Wheel 온실가스 배출량 분석

강민진 · 최원재†

이화여자대학교 휴먼기계바이오공학부

Well-To-Wheel Greenhouse Gas Emissions of Biodiesel in South Korea

MINJIN KANG, WONJAE CHOI†

Department of Mechanical and Biomedical Engineering, Ewha Womans University, 52, Ewhayeodae-gil, Seodaemun-gu, Seoul 03760, Korea

†Corresponding author : wj_choi@ewha.ac.kr

Received 24 August, 2026
Revised 23 September, 2026
Accepted 28 September, 2026

© The Korean Hydrogen and New Energy Society

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits non-commercial use, sharing, adaptation, distribution, and reproduction in any medium or format, provided the original work is properly cited.

Abstract >> This study compared the well-to-wheel (WTW) greenhouse gas emissions of palm oil- and used cooking oil-based biodiesel, reflecting Korea's biodiesel supply structure. Both direct and indirect land-use change were considered for the palm oil pathway. For the domestic biodiesel feedstock mix (59% palm oil and 41% used cooking oil), the estimated reduction in greenhouse gas emissions ranged from 44% to 67.6% when indirect land-use change (ILUC) was excluded, demonstrating that the treatment of ILUC has a substantial effect on policy assessment. Under the current 4% biodiesel blending requirement, the WTW greenhouse gas reduction relative to petroleum diesel was only 1.78-2.70%. These findings indicate that further reductions will require policies that increase the share of lower-carbon feedstocks and raise the biodiesel blending ratio.

Key words : Biodiesel(바이오디젤), Used Cooking Oil(폐식용유), Palm Oil(팜유), Life Cycle Assessment(전과정평가), Well-to-Wheel(WTW), Indirect Land Use Change(간접 토지 이용 변화)

1. 서 론

전 세계적으로 지속가능한 에너지에 대한 관심이 증가함에 따라 화석연료를 대체할 수 있는 바이오연료의 중요성이 커지고 있다. 그중 바이오디젤은 기존 디젤 엔진 및 인프라와의 높은 호환성과 온실가스 감축 가능성으로 인해 대표적인 대체 연료로 활용되고 있다[1]. 그러나 바이오디젤의 환경적 성능은 원료의 종류, 공급망 구조, 그리고 국가별 정책에 따라 크게 달라지므로 국가 특성을 반영한 전과정평가(Life cycle assessment, LCA)가 필요하다.

우리나라는 농업 기반이 제한적이기 때문에 바이오디젤 원료를 자급하기 어려우며, 폐식용유(Used cooking oil, UCO)와 팜유 기반 원료의 수입에 크게 의존하고 있다. 2022년 기준 국내 바이오디젤 원료 구성에서 팜 기반 원료는 약 59%, 폐식용유는 약

2026 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

41%를 차지한다[2]. 팜유는 주로 인도네시아와 말레이시아에서 수입되며, 폐식용유 역시 국내 수거분과 함께 아시아 지역으로부터 상당량이 수입되고 있다[3]. 이처럼 국내 바이오디젤 공급망은 해외 원료 수입 비중이 높아 장거리 운송에 따른 환경 영향 역시 고려해야 하는 요소로 작용한다.

기존 연구들은 팜유, 유채유, 대두유, 폐식용유 등 다양한 원료를 대상으로 바이오디젤의 전과정 온실가스 배출량을 평가해 왔다[4]. 그러나 대부분 유럽 및 미국의 공급망을 기반으로 수행되었으며, 간접 토지이용변화(Indirect land use change, ILUC)를 제외하거나 제한적으로 고려한 경우가 많다. 따라서 원료 수입 의존도가 높은 한국의 실제 공급 구조를 반영한 연구는 아직 부족한 실정이다. 한편 국내에서는 신재생 에너지 연료 혼합 의무화 제도에 따라 바이오디젤 혼합 의무 비율이 2015년 2.5%에서 시작하여 단계적으로 확대되어 왔으며, 2024~2026년에는 4.0%, 2027~2029년에는 4.5%, 2030년 이후에는 5.0%까지 확대될 예정이다[5]. 이에 따라 바이오디젤 사용량 증가에 따른 온실가스 감축 효과와 환경적 타당성을 객관적으로 평가할 필요성이 더욱 커지고 있다.

이에 본 연구에서는 한국의 실제 바이오디젤 공급망을 반영하여 폐식용유 및 팜유 기반 바이오디젤의 전과정 온실가스 배출량을 비교·분석하였다. Well-to-Wheel (WTW) 시스템 경계를 적용하였으며, 팜유 경로에 대해서는 직접 토지이용변화(Direct land use change, DLUC)와 ILUC를 함께 고려하였다. DLUC는 산림이나 초지가 팜 농장으로 직접 전환되면서 발생하는 탄소 배출을 의미하며, ILUC는 기존 농경지가 바이오연료 원료 생산에 사용됨에 따라 다른 지역에서 추가적인 토지 개간이 유발되는 간접적 영향을 의미한다[6]. 예를 들어, 기존에 식용유 생산에 쓰이던 팜 농장의 산출물이 바이오디젤 원료로 바뀌면, 해당 지역의 식용유 수요 자체가 사라지는 것이 아니기 때문에 이를 충당하기 위한 대체 생산이 다른 지역에서 발생하게 된다. 이 과정에서 새로운 산림이나 초지가 농경지로 전환되며 추가적인 탄소 배출이 유발되는데, 이를 ILUC라고 한다[7]. 반면 폐식용유는 폐기물 기반 원료로 추가적인 토지 이용을 요구하지 않으므로 DLUC 및 ILUC를 적용하지 않았다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제2장에서는 연구 방법론과 시스템 경계를 설명하고, 팜유 및 폐식용유 기반 바이오디젤의 전과정 온실가스 배출량 분석에 활용된 데이터들을 다룬다. 제3장에서는 전과정 온실가스 배출량 분석 결과를 소개하고 정책적 시사점을 도출한다.

2. 방법론

2.1 Goal and Scope definition

본 논문의 목표는 한국의 바이오디젤 공급 구조를 반영하여 폐식용유 기반 및 팜유 기반 바이오디젤의 전과정 온실가스 배출량을 정량적으로 평가하고, 에너지 수입국 특성이 환경성에 미치는 영향을 규명하는 데 있다. 특히 기존 연구가 주로 에너지 자립국을 중심으로 수행된 한계를 보완하고, 장거리 해상 운송과 해외 의존적 공급망 구조를 고려한 보다 현실적인 환경 영향 평가를 수행하는 것을 목표로 한다.

이를 위해 본 연구에서는 WTW 범위를 설정하여 분석을 수행하였다. WTW 접근법은 원료 생산부터 최종 연료 사용 단계까지 전체 생애주기를 포괄적으로 포함함으로써, 특정 공정에 국한되지 않은 총체적인 환경 영향을 평가할 수 있다는 장점을 가진다.

2.2 System Boundary

본 연구에서는 1 GJ의 바이오디젤을 기능단위로 설정하였다. Fig. 1과 같이 석유기반 디젤(Petroleum-based diesel) 경로는 원유 채굴(Crude Recovery) 단계에서 시작된다. 생산된 원유는 국내로 수입된 후(Crude Import), 정유 공정(Refining Process)을 거쳐 경유로 생산된다. 이후 생산된 경유는 운송 및 유통(Transportation and Distribution) 과정을 거쳐 최종

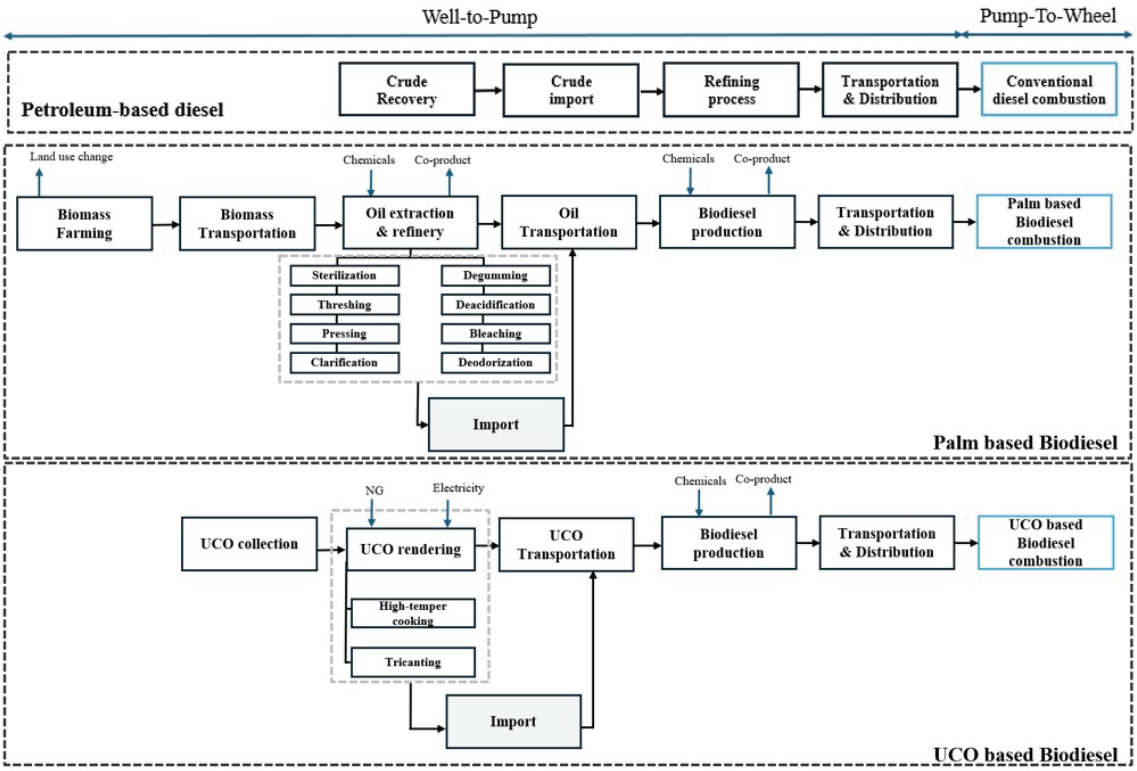


Fig. 1. Life Cycle of Palm Oil- and Used Cooking Oil-Based Biodiesel, and Petroleum-Based Diesel

소비지로 공급되며, 차량에서 연소(Conventional Diesel Combustion)되어 사용된다. 본 연구에서는 원유 채굴, 수입, 정유, 운송 및 유통, 최종 연소까지를 석유계 디젤의 시스템 경계로 설정하였다. 각 공정의 온실가스 배출량 산정에는 본 연구진의 선행연구에서 구축한 데이터를 적용하였으며, 이에 따른 석유계 디젤의 전과정 온실가스 배출량은 85,643 g CO_2-eq/GJ로 산정되었다[14].

팜유 기반 바이오디젤 경로에는 팜 재배와 FFB 운송, CPO 추출·정제, 원료 해상 운송, 바이오디젤 전환 및 유통을 포함하였고, DLUC와 ILUC를 별도 항목으로 산정하였다. 폐식용유(UCO) 경로에는 cut-off 접근법을 적용하여 최초 식용유 생산 이전의 부담을 제외하고, 수거·전처리, 수입 운송, 바이오디젤 전환 및 유통만 포함하였다. 각 공정의 투입자료, 부산물 처리, 배분 방법, 운송조건 및 토지이용변화 계수는 2.3절에 통합하여 제시하였다.

2.3 Activity data

팜유 기반 바이오디젤의 세부 생산공정은 Fig. 2와 같이 원료 재배(Farming), 오일 추출 및 정제(Extraction 1), 바이오디젤 생산(Extraction 2) 단계로 구분하였다. 각 단계의 온실가스 배출량 산정을 위해 공정별 에너지 및 물질 투입량, 운송조건, 부산물 처리 및 배분조건 등의 활동자료를 구축하였다. 세부 활동자료와 적용 조건은 다음과 같다.

2.3.1 팜 재배 및 FFB 운송

팜 재배 단계에서는 FFB 생산에 투입되는 농업용 에너지와 비료 및 농약 사용량을 고려하였다. 농업용 에너지는 Table 1에서 볼 수 있듯이 선행 연구를 평균하여 172,599 Btu/dry ton FFB를 적용하였다. 또한 질소비료, 인산질비료, 칼륨비료, 탄산칼슘, 제초제 및 살충제의 생산·사용에 따른 온실가스 배출량을

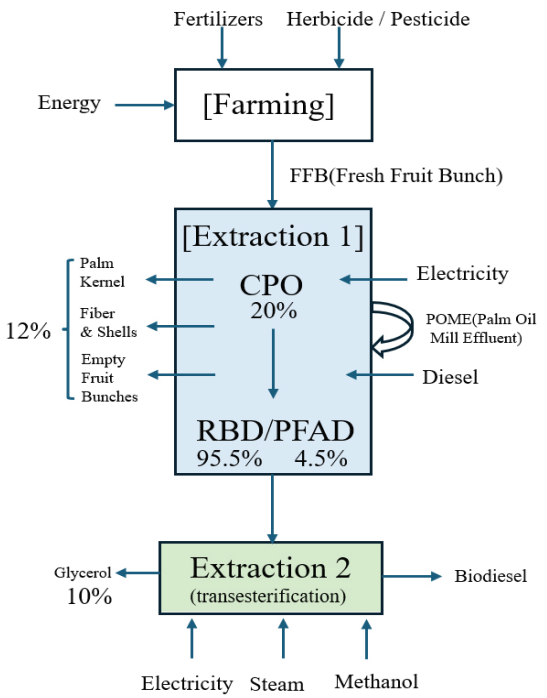


Fig. 2. Production Pathway and System Boundary of Palm Oil-Based Biodiesel

재배 단계에 포함하였다.

수확된 FFB는 농장에서 팜오일 생산공장까지 8톤급 디젤 트럭으로 운송되는 것으로 설정하였다. 운송거리는 팜 농장과 오일밀 간 평균 운송조건을 참고하여 15 miles로 적용하였으며[18], 운송연료는 디젤 100%로 가정하였다. FFB는 수확 후 품질 저하를 방지하기 위해 비교적 짧은 시간 내에 오일밀로 운송되므로, 해당 단계에서는 농장과 인근 오일밀 사이의 단거리 육상 운송만을 고려하였다.

2.3.2 Extraction 1 (Table 1)

Extraction 1 단계는 FFB (Fresh Fruit Bunch)로부터 CPO (Crude Palm Oil)를 추출하고, 이를 정제하여 RBD (Refined, Bleached and Deodorized) palm oil과 PFAD (Palm Fatty Acid Distillate)를 생산하는 과정이다. 공정 에너지는 ecoinvent의 palm oil refinery operation 자료를 기반으로 RBD 팜유 1 lb당 283 Btu를 적용하였다. 전체 공정 에너지 가운데 전력은 21.2%, 열에너지원은 78.8%로 구분하였다. 전력 투입량은 0.0201 kWh, 열에너지 투입량은 0.269 MJ를 기준으로 구성비를 산정하였다. PFAD는 팜유 정제 과정에서 발생하는 부산물이므로 RBD 팜유 생산공정과 동일한 공정 경계 내에서 고려하였다.

일반적으로 FFB 투입량의 약 20~25%가 CPO로 회수되며, 오일 추출 과정에서는 CPO 이외에도 empty fruit bunch (EFB), mesocarp fiber, palm kernel 및 palm kernel shell 등의 고체 부산물과 POME (Palm Oil Mill Effluent) 등의 액상 배출물이 발생한다. 따라서 CPO로 회수되지 않은 FFB가 모두 폐기되는 것으로 간주하지 않았으며, CPO 생산수율과 함께 각 부산물 및 액상 배출물의 발생을 고려하여 공정의 물질흐름을 구성하였다[8].

팜오일 생산공정에서 발생하는 고체 부산물은 종류에 따라 처리 및 활용 방법이 상이하다. 특히 fiber와 palm kernel shell은 팜오일 밀에서 열 및 전력 생산을 위한 연료로 활용될 수 있으며, EFB 역시 에너지 회수, 퇴비화 및 토양 환원 등의 용도로 활용될 수 있는 것으로 보고되고 있다[9]. 본 연구에서는 GREET의 팜오일 생산공정 데이터를 적용하였으며, 해당 데이터에는 이러한 부산물의 처리 및 활용에 따른 환경부하가 이미 포함되어 있다. 팜 파이버(palm fiber)와 팜 커널 쉘(palm kernel shell)은 주로 팜오일 생산 플랜트의 보일러 연료로 재이용되며, 빈 과실송이(empty fruit bunch, EFB)는 주로 팜 농장의 멀칭(mulching)에 활용된다[10]. 본 연구에서는 이를 바탕으로 팜 파이버와 팜 커널 쉘은 팜오일 생산공정 내 보일러 연료로 재이용되고, EFB는 팜 농장의 멀칭에 활용되는 것으로 가정하였다. 이에 따라 해당 부산물에 대한 별도의 폐기처리 과정 및 이에 따른 환경부하는 시스템 경계에서 제외하였다[10].

또한 팜유 추출 과정에서 발생하는 POME는 높은 유기물 함량으로 인해 혐기성 분해 과정에서 메탄이 발생할 수 있으므로, POME 처리에 따른 메탄 배출을 고려하였다[9]. 본 연구에서는 POME 처리방식으로 closed pond 조건을 적용하였다. Closed pond에서는 혐기성 분해 과정에서 발생한 메탄을 포집하여

Table 1. Input parameters for palm oil-based biodiesel production

Input parameter	Unit	Value	Sources
Palm Farming Process			
Farming energy (Diesel 100%)	Btu/dry ton Palm FFB	172,599	10, 15, 17
Nitrogen fertilizer	g/dry ton Palm FFB	6,699	10, 15, 18
Phosphate fertilizer (P_2O_5)		3,453	10, 15, 18
Potassium fertilizer (K_2O)		13,399	10, 15, 18
Calcium carbonate ($CaCO_3$)		20,081	10
Herbicide		113	10, 15
Pesticide		1,129	10, 15
Extraction 1 Process			
CPO production & refining energy	g/Ib	283	16
process fuel share - electricity	%	21.2	16
process fuel share - diesel	%	78.8	16
Extraction 2 Process			
RBD Palm Oil use	Ibs/Ib biodiesel	1.002	10
process energy	Btu/Ib biodiesel	1,442	10
process fuel share - electricity	%	7.1	10
process fuel share - steam (based on Coal)	%	4.6	10
process fuel share - steam (based on NG)	%	20.6	10
process fuel share- Methanol	%	67.7	10
Transportation process			
Import Route			
Jakarta-Incheon (Indonesia)	km	5357.84 km	14
Jesselton-Incheon (Malaysia)		3696.59 km	14

대기로 직접 방출되는 메탄을 저감하며, 포집된 메탄은 연소 및 에너지 회수에 활용될 수 있다[10].

본 연구에서는 GREET에서 제시된 팜유 생산량 기준 메탄 발생 원단위인 2.092 g CH_4/lb palm oil을 적용하고, 이를 본 연구의 기능단위인 1 GJ biodiesel 기준으로 환산하였다. 그 결과 POME 처리에 따른 메탄 배출량은 121.86 g CH_4/GJ biodiesel로 산정되었다.

생산된 CPO는 정제 공정을 거쳐 최종적으로 RBD Palm Oil과 PFAD로 분리된다. 본 연구에서는 실제 팜유 정제 공정의 생산 비율을 반영하여 RBD Palm Oil 95.5%, PFAD 4.5%의 질량 비율을 적용하였으며[10], 두 제품 간 환경부하는 질량 기준 배분(Mass Allocation)을 통해 할당하였다.

이후 바이오디젤 전환 단계에서는 정제 팜유인 RBD Palm Oil과 팜 지방산 증류물인 PFAD를 원료로 바이오디젤을 생산하였다. 두 원료는 화학적 조성이 거의 유사하므로 같은 반응 경로를 적용하였다[8]. 주로 트라이글리세라이드(triglyceride)로 구성되어 있어 메탄올과 전이에스터화(transesterification) 반응을 통해 지방산 메틸에스터(Fatty Acid Methyl Ester, FAME)와 글리세롤을 생성한다. 이론적인 전이에스터화 반응식은 다음과 같다.

$$C_3H_5(OOCR)_3 + 3CH_3OH \rightarrow 3RCOOCH_3 + C_3H_5(OH)_3$$

Equation 1. Transesterification Reaction

여기서 $C_3H_5(OOCR)_3$는 트라이글리세라이드, CH_3OH는 메탄올, $RCOOCH_3$는 바이오디젤의 주성분인 FAME, $C_3H_5(OH)_3$는 부산물인 글리세롤을 의미한다. 따라서 트라이글리세라이드 1 mol이 완전히 반응하기 위해서는 이론적으로 메탄올 3 mol이 필요하며, FAME 3 mol과 글리세롤 1 mol이 생성된다. 글리세롤 역시 정제 후 다양한 용도로 활용될 수 있는 부산물이다[11]. 본 연구에서는 GREET의 바이오디젤 생산공정 데이터를 적용하였으며, 해당 데이터에는 글리세롤의 처리에 따른 환경부하가 이미 포함되어 있다. 전이에스터화 이후 반응 혼합물은 밀도 차이에 의해 상부의 FAME와 하부의 글리세롤층으로 분리되며, 이후 세척 및 정제 과정을 거쳐 최종 바이오디젤이 생산된다.

2.3.3 팜유 해상 운송

생산 RBD 팜유 및 PFAD는 인도네시아와 말레이시아에서 국내로 수입되는 것으로 설정하였다. 국가별 수입 비중을 반영하여 인도네시아 자카르타-인천 경로에 56.1%, 말레이시아 제셀턴-인천 경로에 43.8%를 적용하였다(Table 1). 해상 운송거리는 각각 5,357.84 km(3,329.21 miles)와 3,696.59 km(2,296.95 miles)로 설정하였다. 각 경로의 운송 배출량을 수입 비중에 따라 가중 평균함으로써 국내 바이오디젤 공급망의 실제 원료 도입 구조를 반영하였다.

2.3.4 Extraction 2

바이오디젤 생산 단계에서는 RBD 팜유 또는 PFAD가 메탄올과 전이에스테르화 반응을 거치는 공정을 고려하였다. 바이오디젤 1 lb 생산에 필요한 팜유 투입량은 1.002 lb로 설정하였으며, 총 공정 에너지는 1,442 Btu/lb biodiesel을 적용하였다(Table 1). 공정 투입량의 구성비는 전력 7.1%, 석탄 기반 증기 4.6%, 천연가스 기반 증기 20.6% 및 메탄올 67.7%로 구분하였다. 공정에서 발생하는 바이오디젤을 제외한 나머지 부산물들은 폐기처리하였다.

2.3.5 토지 이용 변화 적용 기준

팜유 생산 확대에 따른 토지이용변화는 직접 토지이용변화(DLUC)와 간접 토지이용변화(ILUC)로 구분하였다. DLUC는 산림, 초지 또는 이탄지 등의 기존 토지가 팜 농장으로 직접 전환되면서 식생과 토양에 저장된 탄소가 배출되는 현상을 의미한다. 반면 ILUC는 바이오연료 원료 생산을 위해 기존 농경지가 팜 재배지로 전환될 경우, 기존 농산물 생산량을 유지하기 위해 다른 지역에서 새로운 농경지가 확장되면서 산림이나 초지 등의 추가적인 토지전환이 발생하는 현상을 의미한다. 따라서 ILUC는 특정 농장에서 직접 측정하기 어려우며, 원료 수요 증가에 따른 생산, 소비, 무역 및 토지이용 변화를 고려하는 GTAP 등의 경제모형을 통해 추정된다.

본 연구의 DLUC는 110.07 g CO_2-eq/GJ를 적용하였다[10]. 해당 값은 인도네시아의 팜유 생산 과정에서 발생하는 직접적인 토지이용변화에 따른 온실가스 배출량을 산정한 값이다. 본 연구 역시 인도네시아산 팜유를 대상으로 하므로 지역적 조건의 일관성을 고려하여 해당 값을 채택하였다.

ILUC는 실제 농장 단위에서 직접 측정할 수 없으므로 경제모형을 이용한 대표계수를 적용하였다. 본 연구에서는 CORSIA의 팜유 기반 경로에서 GTAP-BIO 모형으로 산정된 말레이시아·인도네시아 팜유의 대표 ILUC 계수인 34.6 g CO_2-eq/MJ, 즉 34,600 g CO_2-eq/GJ를 적용하였다. 해당 값은 특정 지역이나 개별 팜 농장의 토지전환을 나타내는 값이 아니라, 팜유 생산 증가가 세계 농산물 생산, 소비, 무역 및 토지이용에 미치는 영향을 종합적으로 반영한 모형 기반 계수이다. ILUC 값은 적용되는 경제모형과 토지전환 가정에 따라 차이가 있으며, California LCFS 관련 평가에서는 팜유에 71.4 g CO_2-eq/MJ가 제시되는 등 서로 다른 값이 사용되고 있다[12].

ILUC의 정책적 적용 방식 역시 국가별로 차이가 있다. EU RED II·III에서는 ILUC 값을 전과정 배출량에 직접 가산하기보다 팜유를 high-ILUC-risk feedstock으로 분류하여 사용을 제한하는 방식으로 고려한다. 반면 미국 RFS에서는 경제모형으로 산정한 간접 토지이용변화 배출량을 전과정 온실가스 배출량에 포함하며, California LCFS에서는 ILUC 값을 연

료의 Carbon Intensity에 직접 반영한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 제도적 차이를 고려하여 ILUC를 정량적으로 포함한 전과정 평가 결과와 ILUC를 직접 가산하지 않고 DLUC만 포함한 정책기반 평가 결과를 구분하여 제시하였다[13].

2.3.6 폐식용유

폐식용유 기반 바이오디젤 경로는 폐식용유의 발생 국가에 따라 수거 및 전처리(rendering) 과정과 국내 운송 과정을 구분하여 활동자료를 설정하였다. 해외에서 수입되는 폐식용유는 중국, 일본, 대만 및 인도네시아를 대상으로 하였으며, 국가별 수입 비중과 인천항까지의 해상 운송거리를 각각 적용하였다. 국내에서 발생한 폐식용유는 별도의 국내 운송 조건을 적용하였다.

폐식용유 전처리 과정에서 사용되는 전력은 국가별 전력 생산구조의 차이를 반영하기 위해 각 국가에 해당하는 전력 배출계수를 적용하였다. Table 2를 참고하여 중국, 일본, 대만 및 인도네시아에서 수행되는 전처리에는 ecoinvent의 국가별 고전압 전력 데이터셋을 사용하였으며, 국내 전처리에는 GREET에 수록된 한국 전력 배출계수를 적용하였다. 이후 국내에서 수행되는 전이에스테르화 공정에는 모든 원료에 동일한 국내 전력 조건을 적용하였다.

Table 3을 참고하여 해외 폐식용유 운송은 원산지에서 인천항까지의 해상 운송을 기준으로 설정하였다. 국가별 수입 비중은 중국 54%, 일본 17%, 대만 13%, 인도네시아 16%로 적용하였으며, 운송거리는 각 출발지와 인천항 사이의 거리를 개별적으로 반영하였다.

3. 결 과

3.1 원료별 바이오디젤 및 석유계 디젤의 WTW 온실가스 배출량 비교

팜유 기반 바이오디젤의 전과정 온실가스 배출량을 산정한 결과, RBD 기반 바이오디젤과 PFAD 기반 바이오디젤의 총 배출량은 각각 약 71.7 kg CO_2-eq/GJ와 71.6 kg CO_2-eq/GJ로 나타났다. 두 시나리오 모두 재배(Farming) 단계가 전체 배출량의 대부분을 차지하였으며, 오일 추출 및 정제 단계와 바이오디젤 생산 단계가 그 뒤를 이었다. 반면 운송 및 유통 단계의 기여도는 상대적으로 낮게 나타났다.

Table 2. Country-specific electricity emission factors for the UCO rendering process

Country	Electricity dataset	Electricity emission factor (kg CO_2-eq/kWh)	Converted value (kg CO_2-eq/GJ)
China	Market group for electricity (high voltage)	0.839	233.056
Japan		0.640	177.778
Taiwan		0.763	211.944
Indonesia		1.160	322.222
South Korea		0.690	191.667

Table 3. Country-distance for the UCO transportation process

Origin country	Import route	Import share (%)	Transportation distance (km)
China	Shanghai–Incheon	54	810
Japan	Osaka–Incheon	17	1,160
Taiwan	TSO Ying–Incheon	13	1,569
Indonesia	Jakarta–Incheon	16	4,657
Total	–	100	–

석유 기반 디젤과 원료별 바이오디젤의 전과정 온실가스 배출량을 비교한 결과(Fig. 3) 원료 종류 및 ILUC 반영 여부에 따라 배출량 수준이 크게 달라지는 것으로 나타났다. 석유 기반 디젤은 WTW 기준 85,643 g CO_2-eq/GJ, 국내 혼합의무제도 적용 기준인 B4 환산 시 84,144 g CO_2-eq/GJ로 산정되어 전체 비교 대상 중 가장 높은 배출 수준을 보였다.

팜유 기반 바이오디젤의 배출량은 재배·추출·생산·운송 등 기본 공정 배출량(약 36,990 g CO_2-eq/GJ)에 DLUC (110.07 g CO_2-eq/GJ)가 더해진 뒤, ILUC 반영 여부에 따라 두 값으로 나뉜다. ILUC (34,600 g CO_2-eq/GJ)를 포함하면 총 배출량은 71,700 g CO_2-eq/GJ로 화석 디젤과 큰 차이를 보이지 않았으나, ILUC를 제외하면 37,100 g CO_2-eq/GJ로 절반 가까이 감소하였다. 반면 UCO 기반 바이오디젤은 13,952 g CO_2-eq/GJ로, 화석 디젤 대비 약 6분의 1 수준에 불과하였다. 이는 UCO가 폐기물 기반 원료로서 재배 단계 자체가 없어 DLUC와 ILUC가 전혀 발생하지 않기 때문이다.

국내 바이오디젤 공급 구조(팜유 59%, UCO 41%)를 반영한 혼합 시나리오는 팜유·UCO 각각의 배출량을 공급 비중으로 가중평균한 값으로, ILUC 반영 여부에 따라 결과가 크게 갈렸다. ILUC를 포함할 경우 배출량은 48,189 g CO_2-eq/GJ(화석 디젤 대비 약 44% 감축)로 산정된 반면, ILUC를 제외하고 DLUC만 반영할 경우 27,776 g CO_2-eq/GJ(약 67.6% 감축)로 낮아졌다. 즉 동일한 혼합 구조라도 ILUC 처리 방식에 따라 EU RED가 요구하는 65% 감축 기준의 충족 여부 자체가 뒤바뀌는 것으로 나타났다.

본 연구에서 바이오디젤의 연소 단계(Pump-to-Wheel) CO_2 배출량을 0으로 처리한 것은 생물기원 탄소의 이중계산을 피하기 위한 회계 방식이다. IPCC 2006 지침은 바이오매스 연소에서 발생한 CO_2를 에너지 부문 총배출량에 합산하지 않고 별도 항목으로 보고하도록 하며, EU RED II 역시 바이오연료의 사용 단계 배출계수를 0으로 규정한다[19].

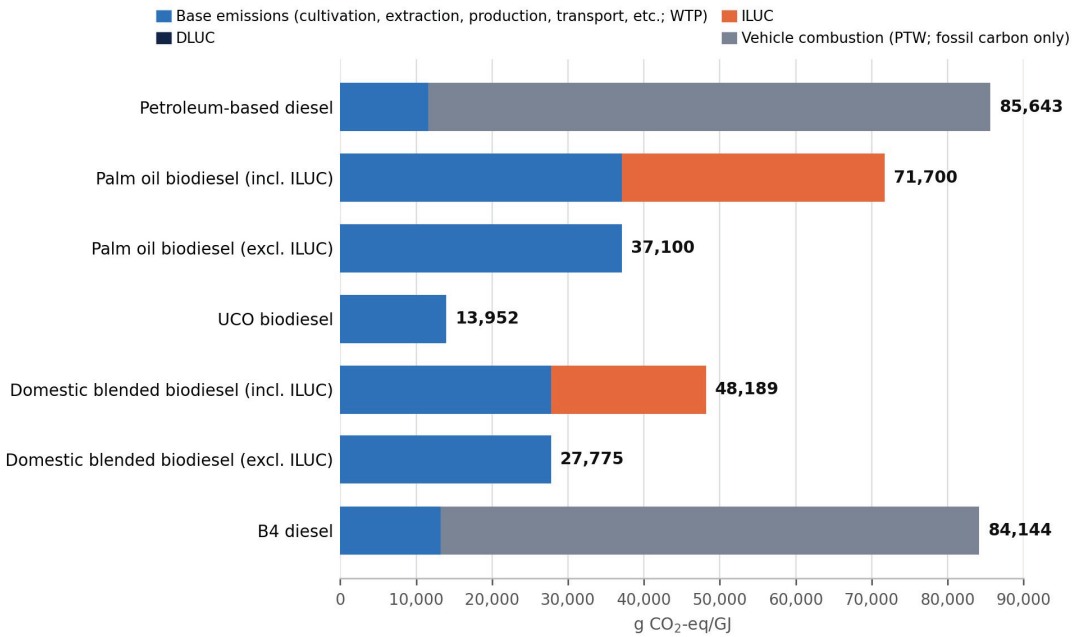


Fig. 3. Comparison of Well-to-Wheel greenhouse gas emissions across diesel and biodiesel scenarios with and without ILUC

3.2 팜유 기반 바이오디젤(Palm-based Biodiesel)의 전과정 온실가스 배출량

본 연구에서는 산정된 팜유 기반 바이오디젤의 전과정 온실가스 배출량을 JRC 및 ANL의 기존 연구 결과와 비교하였다. JRC는 유럽연합(EU)의 재생에너지지침(Renewable Energy Directive, RED) 수립 및 이행 과정에서 활용되는 대표적인 바이오연료 평가 자료를 제공하며, ANL은 GREET 모델을 개발하여 전 세계적으로 활용되는 전과정평가 데이터베이스를 구축하고 있다.

다만 ANL의 GREET은 JRC와 달리 EU 정책 대상 지역에 한정된 모델이 아니라 범용적인 원단위 데이터베이스이고, JRC 값은 EU로의 공급망(주로 인도네시아·말레이시아에서 유럽)을 가정한 것으로, 본 연구가 가정한 한국행 공급망(인도네시아·말레이시아에서 인천)과는 운송 거리 및 구성 비중이 상이하다. 이러한 지역적 가정 차이를 감안하여 두 모델과의 비교는 절대값의 일치 여부보다 단계별 배출 구조의 경향성 비교에 초점을 두었다.

Fig. 4에서 볼 수 있듯이 팜유 기반 바이오디젤의 전과정 온실가스 배출량을 산정한 결과, RBD 기반 바이오디젤과 PFAD 기반 바이오디젤의 총 배출량은 각각 약 71.7 kg CO_2- eq/GJ와 71.6 kg CO_2-eq/GJ로 나타났다. 두 시나리오 모두 재배(Farming) 단계가 전체 배출량의 대부분을 차지하였으며, 오일 추출 및 정제 단계와 바이오디젤 생산 단계가 그 뒤를 이었다. 반면 운송 및 유통 단계의 기여도는 상대적으로 낮게 나타났다. 재배 단계의 배출량은 약 53.6 kg CO_2-eq/GJ로 전체 배출량의 70% 이상을 차지하였다. 또한, 오일 추출 및 정제(Oil Extraction 1) 단계의 배출량은 약 6.6 kg CO_2-eq/GJ로 산정되었으며, 바이오디젤 생산(Extraction 2, Transesterification) 단계는 RBD 경로 기준 약 9.2 kg CO_2-eq/GJ로 나타났다. 운송 및 유통 단계의 경우 본 연구에서는 인도네시아 및 말레이시아에서 한국으로 수입되는 실제 공급망을 반영하였다. 이에 따라 유럽을 대상으로 한 JRC 및 ANL 연구보다 운송 거리가 짧아 상대적으로 낮은 배출량(약 2.3 kg CO_2-eq/GJ)이 산정되었다.

한편, 바이오디젤 연소(Vehicle operation, Pump-to-Wheel) 단계에서는 바이오매스 성장 과정에서 흡수된 탄소가 연소 시 다시 배출된다고 가정하여 CO_2 배출량을 0으로 처리하였다.

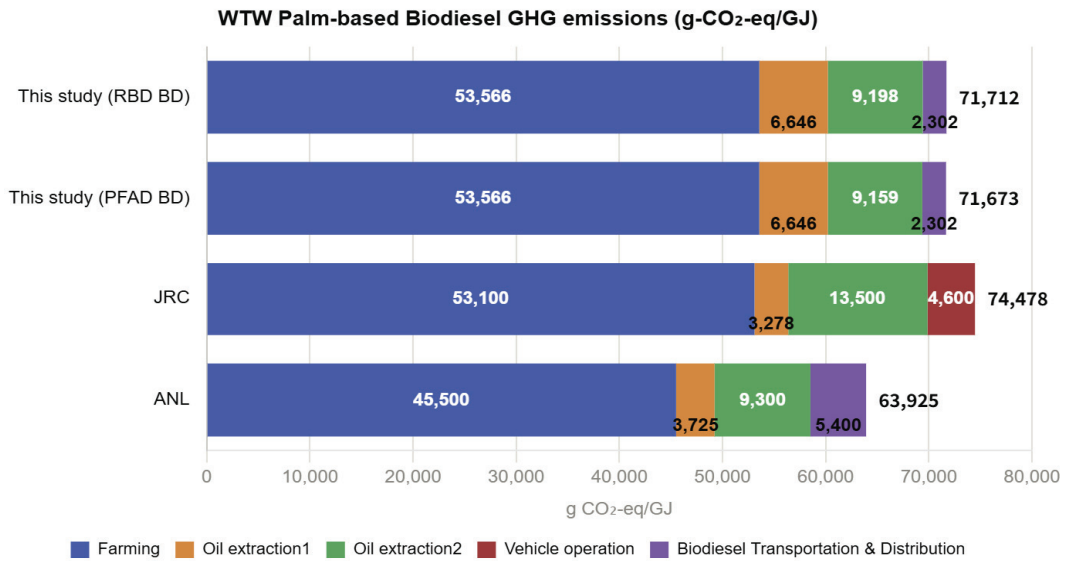


Fig. 4. Comparison of WTW Greenhouse Gas Emissions of Palm Oil-Based Biodiesel

3.3 폐식용유(UCO) 기반 바이오디젤의 전과정 온실가스 배출량

폐식용유(UCO) 기반 바이오디젤의 전과정 온실가스 배출량을 산정하기 위해 국내 수거 UCO와 해외 수입 UCO를 모두 고려하였다. 수입 UCO의 경우 실제 국내 수입 현황을 반영하여 중국(54%), 일본(17%), 대만(13%), 인도네시아(16%)의 수입 비중을 적용하였으며, 각 국가에서 인천항까지의 운송 경로를 기반으로 배출량을 산정하였다. 국내에서 수거되는 UCO는 “Korea” 대신 “Domestic”으로 표기하여 해외 수입 원료와 구분하였다.

수출국에서 발생하는 렌더링(Rendering) 및 운송(Transportation) 관련 공정 배출량을 계산할 때에는 각 수출국의 전력 믹스 등 공정 연료(process fuel)의 LCI 값을 개별적으로 적용하였는지, 혹은 국내(한국) 전력 믹스를 공통으로 가정하였는지가 결과에 큰 영향을 준다. 본 연구에서 이 부분을 어떻게 처리했는지는 2.3절 Activity Data에서 명시하였다. 렌더링의 경우에는 수출국별 전력을 적용하였고 수입한 이후에는 국내 값을 공통 적용하여 바이오디젤 생산을 하였다.

국가별 분석 결과, Fig. 5에서 볼 수 있듯이 인도네시아산 UCO가 가장 높은 온실가스 배출량을 나타냈다. 이는 다른 국가에 비해 운송 거리가 길어 운송 및 유통(Transportation & Distribution) 단계의 배출량이 증가하였기 때문이다. 반면 국내 수거(Domestic) UCO는 국제 운송 과정이 제외되어 가장 낮은 배출량을 나타냈다. 그러나 모든 시나리오에서 렌더링(Rendering) 및 전이에스터화(Transesterification) 단계가 주요 배출원으로 나타났으며, 국가별 차이는 주로 운송 단계에서 발생하였다.

최종 배출량 산정을 위해 국내 UCO 사용 비율 68%와 수입 UCO 사용 비율 32%를 적용하여 가중평균을 수행하였다. 그 결과 국내 바이오디젤 공급 구조를 반영한 UCO 기반 바이오디젤의 전과정 온실가스 배출량은 13,952 g CO_2-eq/GJ로 산정되었다.

이는 팜유 기반 바이오디젤과 비교할 때 현저히 낮은 수준으로, 폐기물 기반 원료인 UCO가 별도의 재배 단계 및 토지이용변화 영향을 포함하지 않기 때문으로 판단된다. 따라서 UCO 기반 바이오디젤은 국내 바이오연료 공급망에서 높은 온실가스 감축 잠재력을 가지는 원료 경로로 평가될 수 있다.

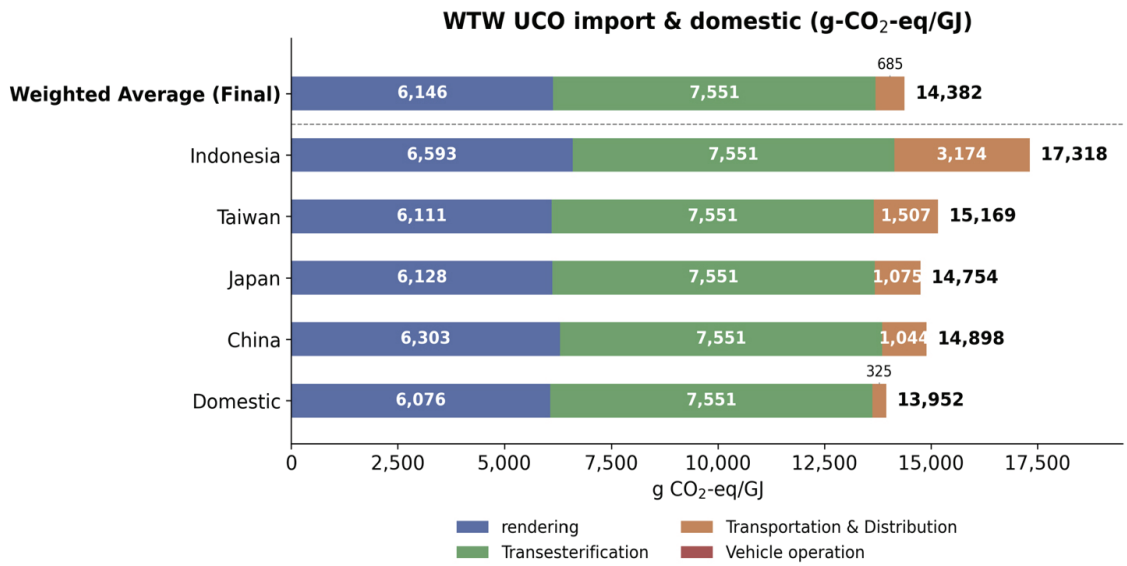


Fig. 5. WTW Greenhouse Gas Emissions of Used Cooking Oil (UCO) Based Biodiesel

3.4 ILUC 반영 여부에 따른 국내 혼합 시나리오별 감축 효과

국내 바이오디젤 공급 구조(팜유 59%, 폐식용유 41%)를 반영하여 전과정 온실가스 배출량을 산정한 결과, ILUC를 포함한 경우 Fig. 6과 같이 바이오디젤의 배출량은 48,189 g CO_2-eq/GJ로 나타났다. 이는 기존 화석 디젤(85,643 g CO_2-eq/GJ) 대비 약 44%의 온실가스 감축 효과에 해당한다. 화석 디젤의 WTW 기준 배출량으로 적용 국내 혼합의무제도에 적용되는 B4 기준으로 환산할 경우 총 배출량은 84,144 g CO_2-eq/GJ로 산정되어 화석 디젤 대비 약 1.78%의 감축 효과만 나타났다.

특히 팜유 기반 바이오디젤의 경우 ILUC 배출량이 34,600 g CO_2-eq/GJ로 산정되어 전체 배출량에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이로 인해 바이오디젤 100% 사용 시에도 온실가스 감축률은 44% 수준에 머물렀으며, EU RED II 및 RED III에서 요구하는 수송용 바이오연료의 온실가스 감축 기준인 65%를 충족하지 못하는 것으로 나타났다.

반면 정책적 평가 관점에서는 ILUC를 온실가스 산정식에 직접 포함하지 않고 재배, 생산, 운송 및 직접 토지이용변화(DLUC)에 따른 배출량만 고려한다. 동일한 공급 구조를 적용한 결과 바이오디젤의 배출량은 27,776 g CO_2-eq/GJ로 감소하였으며, 화석 디젤 대비 약 67.6%의 온실가스 감축 효과를 나타내어 RED 기준을 충족하는 것으로 확인되었다.

이러한 결과는 팜유 기반 바이오디젤의 환경성 평가에서 ILUC의 처리 방식이 최종 결과에 결정적인 영향을 미친다는 것을 보여준다. 실제로 유럽연합은 ILUC를 온실가스 산정식에 직접 반영하기보다는 팜유와 같은 High-ILUC-risk 원료를 별도로 분류하고 단계적으로 사용을 제한하는 정책을 시행하고 있다. 따라서 바이오디젤의 지속가능성을 평가할 때에는 전과정평가 관점의 환경적 영향과 정책적 규제 관점을 함께 고려할 필요가 있다.

본 연구에서 팜유의 재배와 오일 추출·정제는 국외에서 이루어지는 반면, 바이오디젤 전환 공정은 국

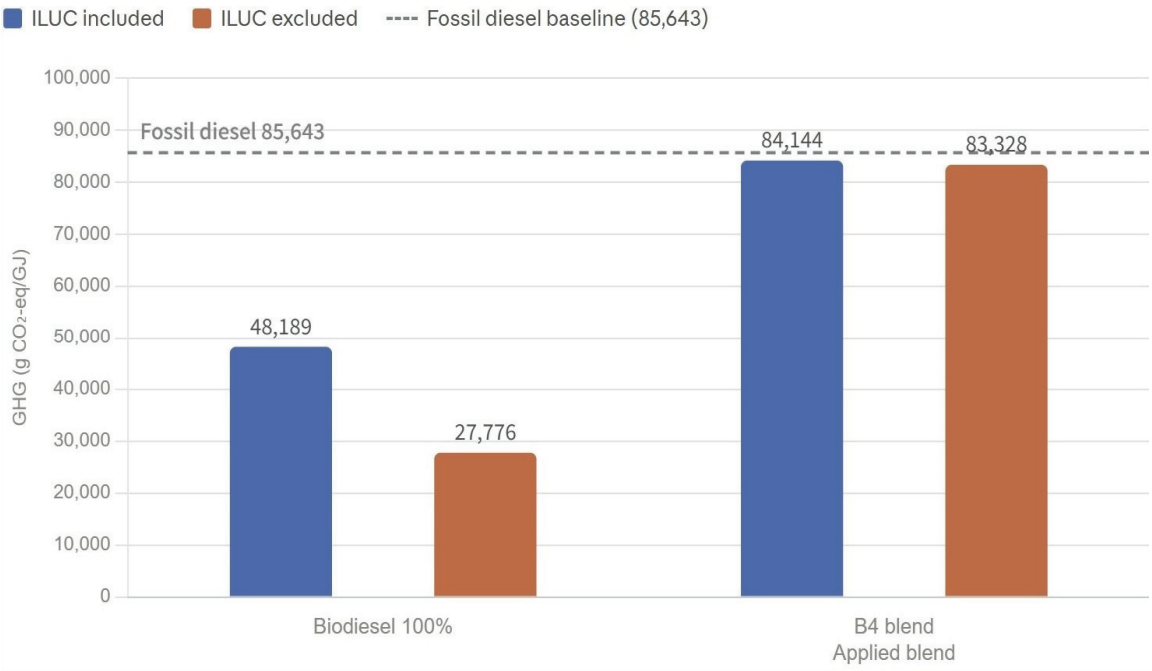


Fig. 6. Comparison of greenhouse gas emissions across biodiesel with and without ILUC

내에서 수행된다. 따라서 국내 생산시설에서 태양광 등 재생에너지 전력의 사용을 확대하거나 설비의 에너지 효율을 개선하면, 동일한 양의 바이오디젤을 생산할 때 사용되는 전력의 배출계수 또는 전력 소비량을 낮춰 온실가스 배출량을 추가로 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 다만 이러한 개선이 전과정 배출량에 미치는 효과는 국내 공정의 실제 전력 사용량과 저탄소 전력 적용 비율에 따라 달라지므로, 향후 연구에서 구체적인 시나리오를 설정해 추가 감축량을 정량적으로 평가할 필요가 있다.

4. 결 론

WTW 기준으로 팜유 기반 바이오디젤(약 71.7 kg CO_2-eq/GJ)과 폐식용유 기반 바이오디젤(13,952 g CO_2-eq/GJ)은 모두 석유기반 디젤(85,643 g CO_2- eq/GJ) 대비 낮은 배출량을 나타냈으나, 두 원료 간 감축 잠재력의 격차는 매우 컸다. 팜유 기반 바이오디젤의 배출량은 재배(Farming) 단계, 특히 ILUC 값(34,600 g CO_2-eq/GJ)에 의해 지배적으로 결정되었으며, ILUC 반영 여부에 따라 감축률이 44%(반영 시)에서 67.6%(미반영 시)까지 크게 달라졌다. 이는 국내 바이오디젤 정책 설계 시 ILUC 처리 방식에 대한 명확한 기준 수립이 필요함을 시사한다. 폐식용유 기반 바이오디젤은 재배 및 토지이용변화 단계가 없어 상대적으로 안정적이고 높은 감축 효과를 보였으며, 국내 바이오디젤 공급망에서 우선적으로 확대할 가치가 있는 원료 경로로 판단된다. 다만 현재 국내 혼합의무제도(B4)하에서는 원료 구성상 두 경로를 혼합하더라도 화석 디젤 대비 감축 효과가 1.78~2.70% 수준에 그쳐, 실질적인 온실가스 감축을 위해서는 혼합비율 상향 또는 저탄소 원료(UCO 등) 비중 확대와 같은 정책적 보완이 함께 검토될 필요가 있다.

후 기

본 연구는 국토교통부 과제(Grant No. RS-2023-00243220)의 일환으로 수행되었습니다.

References

1. A. Demirbas, “Progress and recent trends in biodiesel fuels”, Energy Conversion and Management, Vol. 50, No. 1, 2009, pp. 14-34, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.001.
2. Korea Petroleum Quality & Distribution Authority or Korea New and Renewable Energy Center, “Domestic biodiesel feedstock supply statistics”, 2022, Retrieved from https://www.knrec.or.kr/biz/pds/statistic/view.do?no=310&utm
3. Korea Customs Service, “Trade statistics on palm oil and used cooking oil imports,” 2023, Retrieved from https://www.tradedata.go.kr/cts/index_eng.do.
4. 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.
5. Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), “Enforcement Decree of the Act on the Promotion of the Development, Use, and Diffusion of New and Renewable Energy”, Article 26-2 (Renewable Fuel Standard mixing ratio schedule), Sejong, Korea, 2021.
6. J. Fargione, J. Hill, D. Tilman, S. Polasky, and P. Hawthorne, “Land clearing and the biofuel carbon debt”, Science, Vol. 319, No. 5867, 2008, pp. 1235-1238, doi: https://doi.org/10.1126/science.1152747.
7. T. Searchinger, R. Heimlich, R. A. Houghton, F. Dong, A. Elobeid, J. Fabiosa, S. Tokgoz, D. Hayes, and T. H. Yu, “Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change”, Science, Vol. 319, No. 5867, 2008, pp. 1238- 1240, doi: https://doi.org/10.1126/science.1151861.
8. H. Xu, U. Lee, and M. Wang, “Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions of palm fatty acid distillate derived renewable diesel”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 134, 2020, pp. 110144, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110144.
9. S. B. Hansen, S. I. Olsen, and Z. Ujang, “Greenhouse gas reductions through enhanced use of residues in the life cycle of Malaysian palm oil derived biodiesel”, Bioresource Technology, Vol. 104, 2012, pp. 358-366, doi: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.069.
10. K. B. Son, “A study on the domestic supply of biodiesel fuel considering life cycle greenhouse gas emissions”, Ph.D. dissertation, Kangwon National University, Korea, 2015, pp. 17-109, 131-143, 188-201, 217-246.
11. California Air Resources Board (CARB), “Detailed analysis

for indirect land use change", Low Carbon Fuel Standard Program, California Environmental Protection Agency, Sacramento, CA, 2015, Retrieved from https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/fuels/lcfs/iluc_assessment/iluc_analysis.pdf.
12. S. Ahlgren and L. Di Lucia, "Indirect land use changes of biofuel production - a review of modelling efforts and policy developments in the European Union", Biotechnology for Biofuels, Vol. 7, 2014, pp. 35, doi: https://doi.org/10.1186/1754-6834-7-35.
13. U.S. Environmental Protection Agency, "Renewable fuel standard program (RFS2) regulatory impact analysis", Report No. EPA-420-R-10-006, Assessment and Standards Division, Office of Transportation and Air Quality, U.S. EPA, Washington, D.C., U.S.A., 2010, Retrieved from https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1006DXP.txt.
14. 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.
15. Argonne National Laboratory, "GREET1_2024: The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Technologies (GREET) Model", U.S. Department of Energy, Argonne, IL, 2024, Retrieved from https://greet.es.anl.gov/.
16. Ecoinvent Association, ecoinvent database, version 3.8, "Palm oil refinery operation", Ecoinvent Centre, Zürich, Switzerland, 2021.
17. R. W. Stratton, H. M. Wong, and J. I. Hileman, "Life cycle greenhouse gas emissions from alternative jet fuels", Report No. PARTNER-COE-2010-001, Partnership for AiR Transportation Noise and Emissions Reduction (PARTNER), Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, June 2010.
18. V. Subramaniam, S. K. Loh, and A. A. Aziz, "GHG analysis of the production of crude palm oil considering the conversion of agricultural wastes to by-products", Sustainable Production and Consumption, Vol. 28, 2021, pp. 1552-1564, doi: https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.09.004.
19. IPCC, "2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, volume 2: energy, chapter 2: stationary combustion; frequently asked questions, Q2-10: 'do the IPCC Guidelines consider biomass used for energy to be carbon neutral?'", Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006, Retrieved from https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html.