SFO°C
Solutions for Our Climate

° Issue Brief

무엇을 섞는지 묻지 않는 제도

바이오연료 혼합의무화제도(RFS)의 한계와 개선 방향

SFO°C
Solutions for Our Climate

기후솔루션은 전 세계 온실가스 감축 및 올바른 에너지 전환을 위해 활동하는 비영리법인입니다.
리서치, 법률, 대외협력, 커뮤니케이션 등의 폭넓은 방법으로 기후위기를 해결할 실질적 솔루션을 발굴하고, 근본적인 변화를 위한 움직임을 만들어 나갑니다.

발간월	2026년 9월
저자	임두리 ㅣ 기후솔루션 (duri.leem@forourclimate.org)
도움주신 분	송한새
디자인	Julissa Urena Nature Rhythm

본 보고서는 온실가스 감축과 에너지 전환을 위해 작성된 자료로서 정보 전달 및 교육적 목적으로만 활용될 수 있습니다. 기후솔루션은 독립적, 중립적인 비영리법인으로서 특정 기업체, 국가, 공공기관, 정당 및 이익단체, 개인 등을 대변하지 않으며, 투자 자문 또는 법률 자문 서비스를 제공하는 기관이 아닙니다. 본 보고서는 특정 기업체나 산업 분야를 홍보하거나 투자를 유도하기 위한 것이 아니며, 어떠한 내용도 투자 유도, 기업 홍보, 경제적 활동 등 사적 이익 추구를 위해 사용될 수 없습니다. 본 보고서의 모든 내용은 발간 시점 기준으로 작성되었고, 신뢰할 만한 정보를 바탕으로 검증 과정을 거쳤으나 정보의 정확성, 완결성, 적시성에 대해 보장하지 않습니다. 기후솔루션은 이 보고서를 사용함으로써 발생하는 직·간접적 피해에 대한 법적 책임을 지지 않습니다.

무엇을 섞는지 묻지 않는 제도

바이오연료 혼합의무화제도(RFS)의 한계와 개선 방향

목차

요약 3

I. 배경: 한국 RFS와 바이오디젤 확대 5
1. 수송 부문의 탈탄소화와 바이오연료 5
2. 한국의 재생에너지 연료 혼합의무화제도(RFS) 5
3. 문제 제기: 혼합량이 늘면 감축도 늘어나는가 6

II. 바이오연료의 전과정 온실가스 배출 7
1. 국가 온실가스 인벤토리와 감축효과 평가 7
2. 바이오연료의 전과정 배출 7
3. 토지이용변화에 따른 배출: DLUC와 ILUC 8

III. 해외 사례: 바이오연료의 온실가스 성과 관리 11
1. EU RED: 고위험 원료의 식별과 산입 제한 11
2. 미국 RFS: 원료·생산경로별 적격성 평가 12
3. 캘리포니아 LCFS: 탄소집약도에 따른 차등화 13
4. 공통 원칙과 한국 RFS의 위치 13

IV. 한국 RFS의 원료 구조와 온실가스 감축효과 17
1. 현행 감축량 산정 방식 17
2. 국내 바이오디젤의 원료 구성 18
3. 전과정 배출을 반영한 감축효과 추정 20

V. 결론: RFS 개선을 위한 정책 제언 24

참고문헌 27

요약

한국의 바이오연료 혼합의무화제도(RFS)는 '무엇을' 섞었는지 묻지 않는다. 어디에서 생산된 어떤 원료를 사용했는지, 그 원료가 연료가 되기까지 얼마나 많은 온실가스를 배출하는지도 따지지 않는다. RFS가 확인하는 것은 수송용 경유에 바이오디젤을 '얼마나' 섞었는가다.

문제는 같은 양의 바이오디젤이라도 실제 온실가스 감축효과는 크게 다를 수 있다는 점이다. 원료를 생산하고 수확해 가공하고 운송하는 전과정에서 온실가스가 배출되며, 그 크기는 원료에 따라 다르다. 특히 산림이나 이탄지를 개간해 기름야자·대두 같은 작물을 재배하면 토지에 저장돼 있던 탄소가 방출되고, 기존 농산물 생산이 다른 지역으로 밀려나면서 간접적인 토지이용변화 배출이 발생한다. 이를 모두 반영하면 일부 바이오연료는 대체하는 화석연료보다 더 많은 온실가스를 배출할 수 있다. 현재와 같이 혼합량만으로 감축효과를 판단하면, 실제로는 배출을 늘리는 바이오연료도 온실가스 감축에 기여한 것으로 집계된다.

원료에 따른 감축효과의 차이는 한국의 원료 구조에서 특히 중요하다. 2024년 국내 바이오디젤 원료의 72%는 정제 팜유와 팜 부산물 등 팜 계열이다. 사용량은 76만 6천 톤으로 제도 시행 시점인 2015년보다 네 배 늘었다. 전체 원료에서 수입산이 차지하는 비중도 77%에 달한다. 반면 전과정 배출이 낮은 폐식용유는 국내 공급이 제한적인데도 상당량이 해외로 수출되고 있다. 원료별 감축성과에 가치를 부여하는 해외 시장으로 저탄소 원료가 이동하는 사이, 국내에서는 배출 위험이 큰 수입 원료에 대한 의존이 심화되고 있다.

본 브리프는 해외 규제 기준과 연구에서 제시된 원료별 전과정 배출값을 2024년 국내 원료 구성에 적용해 향후 RFS의 감축효과가 어떻게 달라질 수 있는지 살펴보았다. 같은 원료라도 연구와 평가 방법에 따라 전과정 배출값이 다르게 제시되는 만큼, 원료별로 낮은 값과 높은 값을 각각 적용했다.

현행 법정비율에 따라 혼합의무비율이 2030년 5%까지 단계적으로 높아지는 경로를 기준으로 하면, 2026년부터 2030년까지 의무혼합되는 바이오디젤이 대체하는 경유의 전과정 배출량은 누적 1,502만 톤이다. 낮은 배출값을 적용해도 바이오디젤의 전과정 배출을 반영하면 감축량은 1,122만 톤으로 줄어든다. 반면 높은 배출값을 적용하면 바이오디젤의 전과정 배출량이 대체되는 경유의 배출량을 넘어, 오히려 1,617만 톤을 추가로 배출하는 것으로 추정된다. 같은 혼합의무 아래에서도 원료와 평가 방법에 따라 감축효과의 크기는 물론 감축 여부 자체가 달라질 수 있다는 의미다.

이미 주요국은 바이오연료의 사용량을 넘어 실제 온실가스 감축성과를 평가·관리하는 방향으로 제도를 발전시켜 왔다. 원료와 생산경로별 전과정 배출량을 평가해 일정 수준 이상의 감축효과를 내는 연료만 의무이행 대상으로 인정하거나, 감축성과에 따라 인정 가치를 달리하는 방식이다. 토지이용변화에 따른 배출 위험도 평가에 반영하며, 위험이 큰 원료에는 별도의 기준을 적용해 의무이행 인정 범위를 제한하기도 한다. 팜유는 이러한 기준에 따라 주요 제도에서 인정 범위가 제한되는 대표적인 원료다. 현재 세계 액체 바이오연료 수요의 약 80%가 온실가스 기준의 적용을 받는다.

정부도 혼합량만을 관리하는 현행 RFS의 한계를 인지하고 있다. 2022년 「친환경 바이오연료 확대 방안」에서 실질적인 탄소감축효과를 반영·관리하겠다고 밝혔지만, 4년이 지난 현재까지 제도 개편은 이루어지지 않았다. 반면 혼합의무비율은 단계적으로 높아지고 있으며, 정부는 2030년 예정된 5%를 최대 8%까지 추가 상향할 계획이다.

혼합의무 확대가 곧 온실가스 감축 확대로 이어지는 것은 아니다. 정부는 혼합의무를 확대하기에 앞서, 원료와 생산경로에 따른 전과정 온실가스 감축성과를 평가해 의무이행에 반영하는 체계를 먼저 마련해야 한다. 감축성과가 낮거나 토지이용변화 위험이 큰 원료를 식별해, 그 위험에 따라 의무이행 인정 범위를 달리할 수 있도록 설계되어야 한다. 이를 뒷받침하려면 원료의 종류와 원산지, 조달 경로 등 관련 정보를 수집·검증하는 체계도 갖춰야 한다.

결국 RFS가 답해야 할 것은 바이오연료를 얼마나 사용했는지가 아니라, 그 사용이 실제 온실가스 감축으로 이어졌는지다.

I. 배경: 한국 RFS와 바이오디젤 확대

1. 수송 부문의 탈탄소화와 바이오연료

수송 부문은 전 세계적으로 여전히 석유 의존도가 높은 분야다. 도로수송만으로도 전 세계 석유 수요의 약 45%를 차지하고 있어, 수송 부문의 탈탄소화는 석유 수요와 온실가스 배출을 줄이기 위한 핵심 과제로 꼽힌다.

한국에서도 수송 부문 온실가스 배출의 대부분은 도로에서 발생한다.[1] 무공해차 보급 확대와 수요관리가 주된 감축 수단으로 추진되는 것도 이 때문이다. 그러나 내연기관 차량의 퇴출이 더디게 진행되면서, 바이오연료는 기존 차량의 배출을 줄이기 위한 보완적 정책 수단으로 활용되어 왔다. 기존 차량과 연료 공급체계를 활용하면서 화석연료의 일부를 대체할 수 있기 때문이다.[2]

이러한 흐름은 한국에만 국한되지 않는다. 국제에너지기구(IEA)는 2030년까지 수송 부문의 재생에너지 사용이 50% 증가하는 가운데, 증가분의 35%를 도로수송용 바이오연료가 담당할 것으로 전망한다. 나아가 항공과 해운 부문에서도 바이오연료를 포함한 저탄소 연료의 활용이 늘어날 것으로 예상된다.

바이오연료의 확대는 각국의 정책적 지원에 의해 뒷받침되어 왔다. 여러 국가가 온실가스 감축과 에너지원 다변화, 화석연료 수입 의존도 완화 등을 목적으로 세제 혜택과 보조금을 제공하거나 바이오연료 사용 목표를 설정하고 혼합을 의무화하는 등 다양한 정책 수단을 활용해 왔다. 그중 가장 널리 활용되는 수단이 바이오연료의 혼합의무다. 2024년 기준 최소 35개 국가가 이를 시행하고 있으며, 한국 역시 재생에너지 연료 혼합의무화제도(Renewable Fuel Standard, RFS)를 통해 수송용 연료에 바이오연료 혼합을 의무화하고 있다.

2. 한국의 재생에너지 연료 혼합의무화제도(RFS)

정부는 「재생에너지 개발·이용·보급 촉진법」에 따른 재생에너지 연료 혼합의무에 근거하여, 석유정제업자 및 석유수출입업자에게 자동차용 경유에 일정 비율 이상의 바이오디젤을 혼합·공급할 의무를 부과한다.[3] 의무혼합량은 연도별 혼합의무비율에 수송용 연료의 내수판매량을 곱해 산정되며, 혼합의무비율은 2015년 2.5%에서 단계적으로 상향되어 2026년 현재 4%가 적용되고 있다.

---

1 한국의 수송 부문 온실가스 배출량은 2023년 기준 국가 온실가스 총배출량의 13.8%를 차지하며, 이 중 도로수송 부문 배출이 96.5%다. 국제 항공과 국제 항해 선박에 공급된 연료의 배출량은 IPCC 국가 온실가스 인벤토리 가이드라인에 따라 국가 총배출량에 포함되지 않고 별도 항목으로 보고되기 때문에, 국내 수송 부문 통계는 사실상 국내 이동에 한정된다. 2023년 국제항공·국제해운 배출량 50.5백만 톤CO_2eq를 함께 고려하면 도로수송의 비중은 약 64%다.

2 바이오연료는 식물성 기름, 폐식용유, 농업·임업 잔재물 등 생물자원을 원료로 생산하는 연료로, 도로수송 부문에서는 경유에 혼합하는 바이오디젤과 휘발유에 혼합하는 바이오에탄올이 주로 사용된다.

3 법령상 명칭은 재생에너지 연료 혼합의무화제도이나, 현재 의무가 부과되는 연료는 자동차용 경유에 혼합되는 바이오디젤로 제한된다. 이 브리프에서는 현행 제도의 적용 범위를 고려하여 이를 바이오연료 혼합의무화제도로 부른다. 국내 바이오디젤 혼합은 2007년 정부와 업계의 자발적 협약으로 시작되었으며, 2012년 「석유제품의 품질기준과 검사방법 및 검사 수수료에 관한 고시」를 통해 의무화되었다. 이후 2013년 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법」 개정으로 시행 근거가 법률로 이동했고, 유예기간을 거쳐 2015년부터 시행되었다.

정부는 혼합의무를 추가로 확대할 계획이다. 2021년 「2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안」과 2022년 「친환경 바이오연료 확대 방안」을 통해 2030년 예정된 혼합의무비율 5%를 재생디젤 도입 확대 등으로 최대 8%로 높이는 방안을 수송 부문 감축 수단으로 제시했다.[4] 2025년에는 의무비율 상향을 위한 중장기 로드맵 수립 용역을 발주했고, 최근 「제1차 재생에너지 기본계획」에서도 바이오연료를 전기화 이전의 과도기적 보조 수단으로 활용해 탄소중립에 기여하겠다는 방침을 재확인했다.

현행 제도는 바이오디젤의 혼합량에 비례해 온실가스 감축 실적을 산정한다. 따라서 혼합의무비율이 높아지면 산정되는 감축 실적도 함께 늘어난다. 문제는 혼합량의 증가가 그에 상응하는 온실가스 감축으로 이어지느냐는 것이다.

3. 문제 제기: 혼합량이 늘면 감축도 늘어나는가

바이오연료의 실제 온실가스 감축효과는 원료와 생산경로에 따라 크게 달라질 수 있다. 원료의 생산·수확부터 가공·운송에 이르는 과정에서 온실가스가 배출되고, 원료에 따라서는 토지이용변화로 인한 추가 배출도 발생하기 때문이다. 같은 양의 바이오디젤이라도 무엇으로 어떻게 생산했는지에 따라 전과정 배출량은 달라진다.

그러나 현행 RFS의 온실가스 감축량 산정과 제도 설계에는 이러한 차이가 반영되지 않는다. 어떤 원료를 사용하고 어떤 생산경로를 거쳤는지와 관계없이, 바이오디젤이 대체한 경유에서 발생했을 배출량 전체를 감축량으로 산정한다. 원료별 감축성과를 구분하지 않는 구조에서는 공급의무자가 온실가스 감축효과가 높은 원료를 선택할 유인도 생기기 어렵다.

이 브리프는 이러한 문제의식에서 출발한다. 먼저 바이오연료의 온실가스 감축효과를 평가할 때 고려해야 할 전과정 배출과 토지이용변화의 영향을 살펴본다. 다음으로 주요국이 바이오연료의 원료와 생산경로에 따른 온실가스 감축성과를 제도에 어떻게 반영하는지 검토하고, 한국 제도와의 격차를 짚는다. 이어 한국 RFS의 운영 실태와 원료 구조를 확인하고, 원료와 평가 방법에 따라 향후 RFS의 감축효과가 어느 범위에서 달라질 수 있는지 가늠한다. 마지막으로 RFS가 실질적인 감축 수단으로 작동하기 위해 필요한 제도 개선 방향을 제안한다.

4 재생디젤은 동식물성 유지에 수소를 첨가해 생산하는 연료로, 유지와 메탄올을 반응시켜 만드는 바이오디젤과 제조공정이 다르다. 정부는 재생디젤 도입을 8% 상향과 연계해 제시했으나, 바이오디젤과 재생디젤의 세부 구성 비중은 아직 공개되지 않았다.

II. 바이오연료의 전과정 온실가스 배출

1. 국가 온실가스 인벤토리와 감축효과 평가

앞 장에서 살펴본 대로 현행 RFS는 바이오디젤의 혼합량을 기준으로 의무이행 여부를 판단하고, 정부는 그 혼합량을 바탕으로 온실가스 감축성과를 환산해 제시한다. 이러한 감축량 산정과 실제 감축효과의 차이를 이해하려면, 먼저 국가 온실가스 인벤토리가 바이오매스 연소에서 발생하는 이산화탄소를 어떻게 다루는지 살펴볼 필요가 있다.

기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, 이하 IPCC)의 국가 온실가스 인벤토리 가이드라인은 바이오매스 연소에서 발생하는 CO_2를 에너지 부문의 총배출량에 포함하지 않고 별도의 정보 항목으로 보고하도록 하며, 관련 탄소의 순변화는 농업·임업 및 기타 토지이용(AFOLU) 부문에서 산정하도록 한다. 이는 바이오매스 연소에서 실제로 CO_2가 배출되지 않는다는 의미가 아니라, 관련 배출과 흡수를 국가 인벤토리의 서로 다른 부문에서 중복 계상하지 않기 위한 회계 방식이다.

그러나 이것이 곧 바이오연료의 실제 온실가스 감축효과를 의미하는 것은 아니다. IPCC 역시 이러한 회계 방식이 바이오에너지의 탄소중립성이나 지속가능성을 의미하지 않으며, 바이오에너지의 전체 배출을 평가하려면 원료 재배, 토지이용변화, 비료 사용, 운송 등 관련 배출을 함께 고려해야 한다고 설명한다.

국가 온실가스 인벤토리와 바이오연료 정책의 감축효과 평가는 목적이 다르다. 국가 인벤토리가 국가 전체의 배출과 흡수를 중복 없이 기록하기 위한 회계 체계라면, 바이오연료 정책의 감축효과 평가는 화석연료를 대체해 줄인 배출과 이를 대체하는 연료의 생산·공급 과정에서 발생한 배출을 함께 고려해 실제 감축효과를 판단하는 데 목적이 있다. 특히 원료를 수입하는 경우 원료 생산과 토지이용변화에서 발생하는 배출은 생산국의 인벤토리에 반영되므로, 소비국의 국가 배출 통계만으로는 해당 연료의 전과정 배출을 파악하기 어렵다.

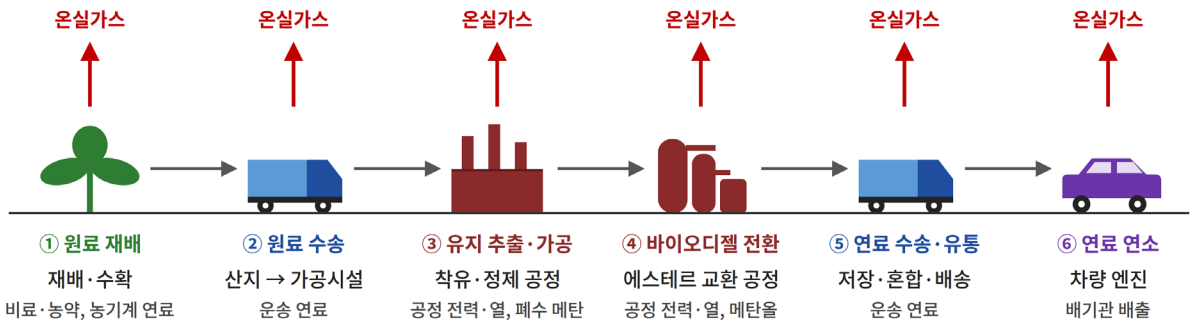
그렇다면 바이오연료의 실제 감축효과를 평가하려면 무엇을 계산해야 하는가. 다음 절에서는 원료 생산부터 연료 사용까지의 배출을 포괄하는 전과정평가를 살펴본다.

2. 바이오연료의 전과정 배출

바이오연료의 온실가스 감축효과를 평가하려면, 연료의 사용 단계뿐 아니라 원료 생산부터 가공·운송·최종 사용까지 전과정에서 발생하는 배출을 함께 고려해야 한다. 이처럼 제품이나 연료의 전과정에 걸친 환경 영향을 평가하는 방법이 전과정평가(Life Cycle Assessment)다. 바이오연료의 온실가스 배출은 전과정에서 발생하는 배출을 합산해 평가하며, 연료 간 비교를 위해 에너지 단위당 온실가스 배출량인 탄소집약도(Carbon Intensity)로 나타낼 수 있다. 바이오연료의 감축효과는 대체되는 화석연료의 전과정 배출과 비교해 평가한다.

공급망의 각 단계에서 발생하는 배출은 아래 [그림 1]과 같으며, 그 크기는 원료와 생산경로에 따라 달라진다.

[그림 1] 수송용 바이오연료 공급망의 전과정 배출



- **원료 재배** 비료와 농약의 생산·사용, 농기계의 연료 사용, 관개 등에 필요한 에너지에서 배출이 발생한다. 특히 질소 비료는 생산 과정뿐 아니라 토양에 사용된 이후에도 아산화질소(N_2O)를 배출한다.
- **원료 수송** 수확한 원료를 생산지에서 추출·가공시설까지 운송하는 과정에서 운송수단의 연료 사용에 따른 배출이 발생한다. 팜유처럼 국제적으로 거래되는 원료의 경우에는 육상 운송뿐 아니라 착유 공장에서 정제·가공시설까지 해상 운송에 따른 배출도 발생한다.
- **유지 추출·가공** 원료에서 기름을 추출하고 정제하는 공정에 전력과 열이 사용된다. 팜유의 경우 폐수 처리 과정에서 메탄(CH_4)이 발생할 수 있다.
- **바이오디젤 전환** 추출한 기름을 바이오디젤로 전환하는 과정에서 전력과 열, 메탄올 등의 사용에 따른 배출이 발생한다.
- **연료 수송·유통** 생산된 바이오디젤을 저장·운송해 최종 소비지에 공급하는 과정에서도 운송과 에너지 사용에 따른 배출이 발생한다.
- **연료 연소** 차량에서 바이오디젤이 연소될 때 이산화탄소가 배출되며, 소량의 메탄과 아산화질소도 함께 발생한다. 바이오디젤 연소에서 발생하는 생물기원 이산화탄소는 화석연료의 이산화탄소와 다르게 취급되지만, 이는 바이오연료의 연소 과정에서 온실가스가 발생하지 않는다는 뜻은 아니다.

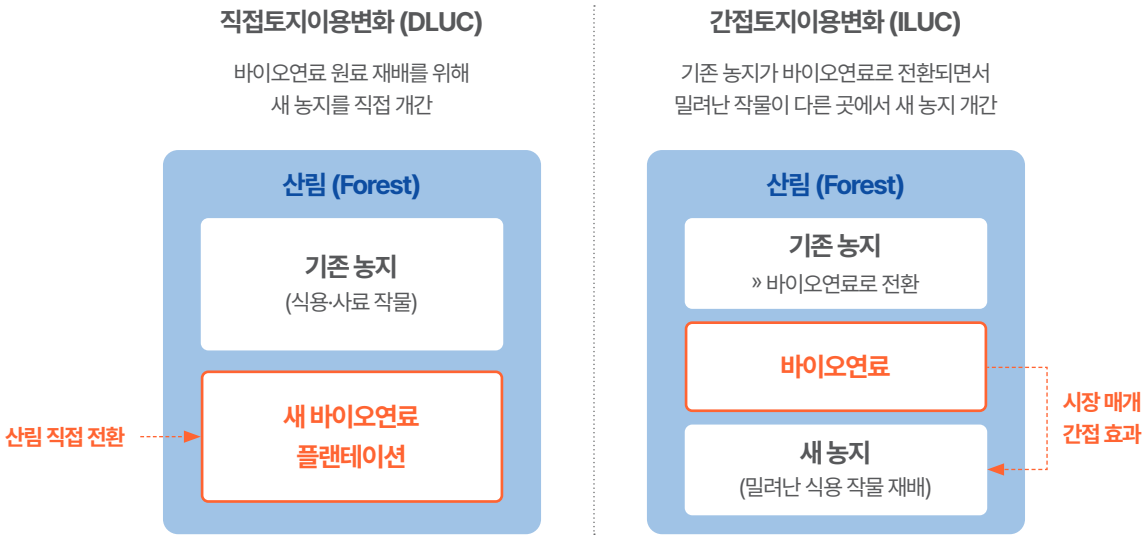
여기에 바이오연료의 감축효과를 크게 좌우할 수 있는 또 하나의 요소가 토지이용변화에 따른 배출이다. 원료 작물을 생산하기 위해 산림이나 초지가 농지로 전환되면 토양과 식생에 저장되어 있던 탄소가 대기로 방출될 수 있다. 그 규모는 경우에 따라 원료 생산·가공·운송 등 공급망에서 발생하는 배출을 모두 합친 것보다 클 수 있어, 이를 전과정 배출에 어떻게 반영할 것인지가 바이오연료의 감축효과를 평가하는 데 중요한 쟁점이다. 다음 절에서는 직접·간접 토지이용변화를 구분해 살펴본다.

3. 토지이용변화에 따른 배출: DLUC와 ILUC

바이오연료의 전과정 배출에는 원료에 따라 토지이용변화에 따른 배출도 포함될 수 있다. 이러한 토지이용변화 배출은 일반적으로 직접토지이용변화(Direct Land-Use Change, DLUC)와 간접토지이용변화(Indirect Land-Use

Change, ILUC)로 구분된다. 특히 작물 기반 원료의 온실가스 감축효과를 평가할 때 토지이용변화에 따른 배출은 중요한 변수다.[5]

[그림 2] 직접토지이용변화(DLUC)와 간접토지이용변화(ILUC)의 차이



출처: El Takriti et al., *Understanding Options for ILUC Mitigation* (ICCT, 2016) 바탕으로 재구성

DLUC는 원료를 생산하는 지역에서 토지가 직접 전환될 때 발생한다. 예를 들어 팜 플랜테이션 조성을 위해 열대림을 벌채하거나 이탄지를 배수해 농지로 전환하면, 토양과 식생에 저장되어 있던 탄소가 대기로 방출된다. DLUC는 위성자료와 현장 조사를 통해 토지피복의 변화를 비교적 직접적으로 확인할 수 있어, 지속가능성 기준이나 원료 이력 추적 등을 통해 일정 부분 관리할 수 있다.

ILUC는 바이오연료 수요가 시장을 통해 다른 지역의 토지이용변화를 유발하면서 발생하는 간접적인 토지이용변화에 따른 배출이다. 식용·사료용으로 사용되던 작물이 바이오연료 생산에 쓰이면 기존 시장에 공급되는 농산물이 줄어들 수 있다. 이를 보충하기 위해 다른 지역에서 농업 생산이 확대되고 새로운 농지가 개간되면 그에 따른 배출이 발생한다. 예컨대 한 지역에서 팜유의 바이오연료 사용이 늘어나면, 식물유 시장의 수급과 가격 변화를 통해 다른 지역의 유지작물 생산 확대와 토지 전환으로 이어질 수 있다. 따라서 바이오연료가 생산된 지역에서 직접적인 토지 전환이 확인되지 않더

5 그중에서도 팜유·대두유 등 유지작물 기반 바이오연료는 여러 연구에서 다른 작물 기반 바이오연료보다 토지이용변화 배출이 높게 산정된다. 특히 팜유는 생산이 집중된 인도네시아와 말레이시아에서 열대림과 이탄지 전환에 따른 배출 위험이 크다. 단위 연료당 재배 면적은 다른 유지작물보다 작지만, 전환되는 토지의 탄소저장량이 크기 때문이다. ICCT(2018)에 따르면 이 지역의 열대 이탄습지림은 식생에 헥타르당 약 150톤, 이탄층에는 약 3,000톤의 탄소를 저장한다. 산림이 농장으로 전환되면 식생의 탄소가 방출되고, 이탄지를 배수할 경우 장기간 축적된 탄소도 산화되어 배출된다.

라도, 그 수요 증가가 다른 지역의 토지이용변화를 유발할 수 있다.[6]

ILUC는 DLUC와 달리 특정 바이오연료와 개별 토지 전환 사이의 인과관계를 직접 관측하기 어렵다. 따라서 경제·토지이용 모형을 이용해 시장의 반응과 토지 전환을 추정하는데, 결과는 작물 수요와 가격, 생산성, 무역, 토지 전환 등에 관한 가정과 입력자료에 따라 달라질 수 있다. 이러한 불확실성은 ILUC 배출량을 정량화하는 데 중요한 한계지만, ILUC로 인한 배출 위험 자체를 배제할 근거는 아니다. 실제로 ILUC는 바이오연료의 온실가스 감축효과를 평가하고 관련 정책을 설계할 때 중요한 고려요소로 다뤄지고 있다.

토지이용변화에 따른 배출과 위험을 정책에 반영하는 방식은 국가와 제도마다 다르다. 일부 제도는 전과정 배출량에 토지이용변화 배출값을 포함하고, 일부는 토지이용변화 위험이 큰 원료의 인정 범위를 제한한다. 다음 장에서는 주요 제도가 바이오연료의 원료와 생산경로에 따른 온실가스 감축성과를 어떻게 다루고 있는지 살펴본다.

6 토지이용변화가 바이오연료 정책의 쟁점으로 부상한 계기는 2008년 *Science*에 실린 두 편의 연구였다. Searchinger의 연구는 미국의 옥수수 에탄올 확대가 다른 지역의 농지 확대와 산림·초지 전환으로 이어질 수 있음을 보여주며 ILUC 문제를 정책 논의의 전면으로 끌어올렸다. 같은 해 발표된 Fargione의 연구는 열대우림·이탄지·사바나·초지를 전환해 작물 기반 바이오연료를 생산할 경우, 방출되는 이산화탄소가 해당 연료가 화석연료를 대체해 얻는 연간 감축량의 17배에서 420배에 달한다고 분석하고, 이를 탄소 부채(carbon debt)로 개념화했다.

III. 해외 사례: 바이오연료의 온실가스 성과 관리

바이오연료 정책의 기준이 달라지고 있다. 초기의 제도가 바이오연료를 얼마나 사용할 것인지에 초점을 맞췄다면, 주요 제도는 이제 원료와 생산경로에 따른 온실가스 감축성과를 평가하고 그 결과를 연료의 인정 여부와 인센티브 수준에 반영한다. 여기서는 유럽연합과 미국, 캘리포니아의 사례를 통해 이러한 전환이 제도에서 어떻게 구현되는지 살펴본다.

1. EU RED: 고위험 원료의 식별과 산입 제한

유럽연합(EU)은 재생에너지지침(Renewable Energy Directive, 이하 RED)을 통해 바이오연료의 지속가능성과 온실가스 감축 기준을 설정한다. 간접토지이용변화 위험은 이와 별도로 고위험 원료를 식별·제한하는 방식으로 관리한다.

최근의 RED III는 기존 체계를 유지하면서 수송 부문의 재생에너지 및 온실가스 감축 목표를 강화했다. 회원국은 2030년까지 수송 부문의 재생에너지 비중을 29%로 높이거나 수송용 연료의 탄소집약도를 14.5% 감축해야 하며, 첨단 바이오연료(advanced biofuel)와 비생물계 재생에너지 연료(RFNBO)의 합산 비중을 5.5%까지 높여야 한다. 식량·사료 작물을 원료로 하는 바이오연료에는 별도의 제한이 있다. 해당 연료의 비중은 회원국의 수송 부문 최종 에너지 소비에서 2020년 수준보다 1% 포인트를 초과하여 높아질 수 없고, 최대 7%로 제한된다.

바이오연료가 재생에너지 목표 실적에 포함되기 위해서는 지속가능성 기준과 온실가스 감축 기준을 충족해야 한다. 원료 생산부터 연료 생산·운송에 이르는 전과정 온실가스 배출량을 기준으로 화석연료 대비 일정 수준 이상의 감축을 입증해야 하며, 수송용 바이오연료에 대해서는 시설 가동 시점에 따라 50%에서 65%에 해당하는 최소 감축 기준이 적용된다. 해당 기준의 준수 여부는 EU가 승인한 인증체계와 독립적인 인증기관의 검증을 통해 확인된다.

토지이용변화는 이와 구분해 다룬다. 직접토지이용변화(DLUC)에 따른 탄소배출은 전과정 배출량 산정에 포함되며, 산림·습지 등 높은 탄소저장 가치나 생물다양성을 가진 토지를 원료 생산을 위해 전환한 경우 지속가능성 기준을 충족할 수 없다. 반면 간접토지이용변화(ILUC)는 경로별 배출량을 직접 온실가스 감축률에 합산하는 방식이 아니라, 별도의 위험관리 체계를 통해 규제한다.[7] EU는 고ILUC 위험 원료를 식별하는 기준을 마련하고, 이러한 원료로 생산된 바이오연료가 재생에너지 목표에 기여할 수 있는 비중을 단계적으로 축소해 2030년까지 0으로 줄이도록 했다.[8]

2019년 기준을 최초 도입했을 당시 고ILUC 위험 원료로 지정된 것은 팜유였다. EU 집행위원회는 2026년 1월 발표한 검토 보고서에서 최신 자료와 과학적 증거를 바탕으로 인도네시아, 말레이시아, 태국 등 주요 생산국에서 팜유 생산 확

7 Commission Delegated Regulation (EU) 2019/807에 따라 2008년 이후 생산면적이 연평균 1%를 초과하면서 10만 헥타르를 초과해 확대되고, 그 확대 면적 중 고탄소저장토지에서 발생한 비중이 10%를 초과하는 경우 고ILUC 위험 원료로 분류할 수 있다. 다만 추가적인 생산량 증가나 미사용·폐기 토지 활용 등을 통해 낮은 ILUC 위험을 입증한 연료는 별도의 인증을 거쳐 이러한 제한에서 제외될 수 있다.

8 EU 차원의 단계적 축소와 별도로, 일부 회원국은 자국 제도에서 팜유 또는 대두유 기반 바이오연료에 대해 의무이행 산입 제한이나 인센티브 제한 등 추가적인 조치를 도입해 왔다. 프랑스, 독일, 벨기에, 네덜란드 등이 대표적이다.

대가 여전히 고탄소 저장 토지의 전환과 연결되어 있음을 확인하고, 팜유의 고ILUC 위험 원료 분류를 유지했다.[9]

요약하면, EU의 접근은 두 가지 장치를 결합한다. 하나는 전과정평가로 산정한 감축률을 산입 자격의 요건으로 삼는 것이고, 다른 하나는 고ILUC 위험 원료의 산입 범위를 별도로 제한하는 것이다. 이에 따라 전과정 감축성과뿐 아니라 토지이용변화 위험도 바이오연료의 재생에너지 목표 산입 여부와 범위를 결정하는 기준으로 작동한다.

2. 미국 RFS: 원료·생산경로별 적격성 평가

미국도 전과정평가로 산정한 감축률을 바이오연료 인정 요건으로 삼는다. 다만, EU가 간접토지이용변화(ILUC)를 산정에서 분리해 원료 단위의 산입 제한으로 다루었다면, 미국은 이를 전과정 온실가스 배출량 산정에 포함한다.

미국의 재생가능 연료 표준(Renewable Fuel Standard, 이하 RFS)은 휘발유와 경유 정유업자·수입업자에게 재생연료 의무물량(Renewable Volume Obligation, RVO)을 부과한다. 의무자는 거래 가능한 크레딧(Renewable Identification Number, 이하 RIN)을 확보해 의무를 이행할 수 있다.

RFS의 핵심은 바이오연료를 하나의 범주로 취급하지 않는다는 데 있다. 제도는 재생연료(renewable fuel), 첨단 바이오연료(advanced biofuel), 바이오매스 기반 디젤(biomass-based diesel), 셀룰로오스계 바이오연료(cellulosic biofuel)를 구분하고, 원료·생산공정·연료 유형을 결합한 경로별 전과정평가로 바이오연료의 인정 여부를 판단한다. 화석연료 대비 최소 감축 기준은 범주에 따라 다르다. 셀룰로오스계 바이오연료는 60%, 바이오매스 기반 디젤과 첨단 바이오연료는 50%, 일반 재생연료는 20% 이상의 전과정 온실가스 감축 기준을 충족해야 한다. 이러한 평가 결과에 따라 연료의 RFS 적격성과 발급 가능한 RIN 유형이 결정된다. 각 범주의 의무는 중첩되어 있다. 예컨대 바이오매스 기반 디젤이나 셀룰로오스계 바이오연료로 인정된 연료는 첨단 바이오연료와 전체 재생연료 의무를 이행하는 데도 사용할 수 있다.

감축률 산정에는 원료의 생산과 수송, 연료의 생산과 유통, 최종 사용에서 발생하는 배출이 반영되며, 토지이용변화에서 발생하는 배출을 비롯한 유의미한 간접 배출(significant indirect emissions)이 명시적으로 포함된다. 원료 생산 단계에서는 바이오연료 생산 확대가 국내외 농업·임업 부문 전반에 미치는 영향을 모형으로 추정한다. 즉 특정 원료와 생산의 확대가 가져올 수 있는 직·간접적 영향을 전과정 배출에 반영하는 방식이다.

팜유는 이러한 접근을 보여주는 사례다. EPA는 2012년 팜유를 원료로 한 바이오디젤과 재생디젤의 화석연료 대비 전과정 감축률을 각각 17%와 11%로 산정했다. 이는 가장 낮은 기준인 20%에도 미달하는 결과였다. 이에 따라 해당 팜유 기반 디젤 경로는 RFS의 최소 감축기준을 충족하지 못했으며, 현재 EPA가 공개한 승인 경로 목록에도 포함되어 있지 않다.

9 2026년 집행위원회 보고서 COM(2026) 36 final은 최신 자료와 과학적 근거를 토대로 팜유가 고ILUC 위험 원료 기준을 계속 충족하며, 대두 역시 해당 기준을 충족한다고 평가했다. 이를 반영해 집행위원회는 2026년 4월 대두를 고ILUC 위험 원료로 추가하는 위임규정 개정안을 제출했다. 그러나 유럽의회가 같은 해 7월 해당 위임규정에 반대하면서 개정안은 채택되지 않았고, 대두는 현재 법적으로 고ILUC 위험 원료로 지정되지 않은 상태다.

결국 미국 RFS 역시 바이오연료의 사용량만으로 그 성과를 판단하지 않는다. 원료·생산공정·연료 유형을 결합한 경로별 전과정평가를 실시하고, 최소 감축기준을 충족하는지에 따라 RFS 적격성을 판단한다. 전과정평가가 단순한 감축량 산정에 그치지 않고 실제 의무이행 수단으로 인정할 연료를 가려내는 기준으로 작동하는 것이다.

3. 캘리포니아 LCFS: 탄소집약도에 따른 차등화

미국 RFS가 감축률 기준의 충족 여부로 인정 자격과 RIN 유형을 구분한다면, 캘리포니아는 그 차이를 크레딧의 양으로 환산한다. 저탄소연료표준(Low Carbon Fuel Standard, 이하 LCFS)은 2009년 캘리포니아 대기자원위원회(California Air Resources Board, 이하 CARB)가 채택하고 2011년 시행에 들어간 제도로, 연료의 전과정 온실가스 배출을 탄소집약도로 환산하고 이를 크레딧 산정에 직접 연결한다.

LCFS는 수송연료에 대해 연도별로 점차 낮아지는 탄소집약도 기준선을 설정한다. 의무이행자가 공급한 연료의 탄소집약도가 기준선보다 낮으면 그만큼 크레딧이 발생하고, 높으면 결손(deficit)이 발생하는 구조다. 크레딧과 결손의 크기는 연료의 탄소집약도와 기준 간 차이에 따라 결정되므로, 동일한 조건에서는 탄소집약도가 낮을수록 더 많은 크레딧이 발생한다.

탄소집약도 산정에는 연료 공급망 전반의 전과정 배출이 반영되며, 작물 기반 원료의 경우 ILUC도 산정에 포함된다. ILUC가 단순한 지속가능성 정보에 머무르지 않고 연료의 탄소집약도와 크레딧 산정에 직접 영향을 미친다는 의미다. 같은 바이오디젤이라도 원료와 생산경로에 따라 서로 다른 탄소집약도가 적용되고, 발생하는 크레딧도 달라진다.

기준선이 해마다 낮아지므로 연료의 탄소집약도가 그대로라면 시간이 지날수록 기준과의 격차가 줄고 발생하는 크레딧도 감소할 수 있다. 기존의 저탄소 연료에도 지속적인 개선을 요구하는 구조다. 더불어 2025년 발효된 개정 LCFS는 작물 기반 원료의 토지전환과 공급망 위험을 관리하는 요건을 단계적으로 도입했다. 원료 생산지의 위치정보와 2008년 이후 원료 생산을 위한 신규 개간이 없었음을 증명하도록 하고, 이후 생산지부터 최초 집하점까지 지속가능성 인증을 요구한다. 팜유 및 팜 유래 원료로 생산된 연료는 크레딧 대상에서 제외하고, 대두유·카놀라유·해바라기유 기반 바이오매스 디젤에는 크레딧 인정 물량을 제한했다. 즉, 간접토지이용변화를 탄소집약도에 반영하는 동시에, 토지이용변화 위험이 큰 원료에는 별도의 기준을 적용한다.

4. 공통 원칙과 한국 RFS의 위치

앞선 사례에서 공통적으로 확인되는 특징은 바이오연료를 단순히 얼마나 사용했는지가 아니라, 원료와 생산경로에 따라 달라지는 온실가스 감축성과를 정책에 반영하고 있다는 점이다.

EU는 전과정 온실가스 감축 기준을 충족한 바이오연료만 재생에너지 목표에 산입할 수 있도록 하는 한편, ILUC 위험은 고위험 원료의 산입 제한을 통해 별도로 관리한다. 미국 RFS는 원료·생산공정·연료 유형을 결합한 경로별 전과정평가를 통해 연료의 적격성과 RIN 유형을 결정한다. 캘리포니아 LCFS는 연료별 탄소집약도 차이를 크레딧의 양에 직접 반영하고, 동시에 토지이용변화 위험이 큰 원료에는 별도의 추적·인증과 크레딧 제한을 적용한다.

[표 1] 주요 제도의 수송용 바이오연료 온실가스 성과 규율 방식

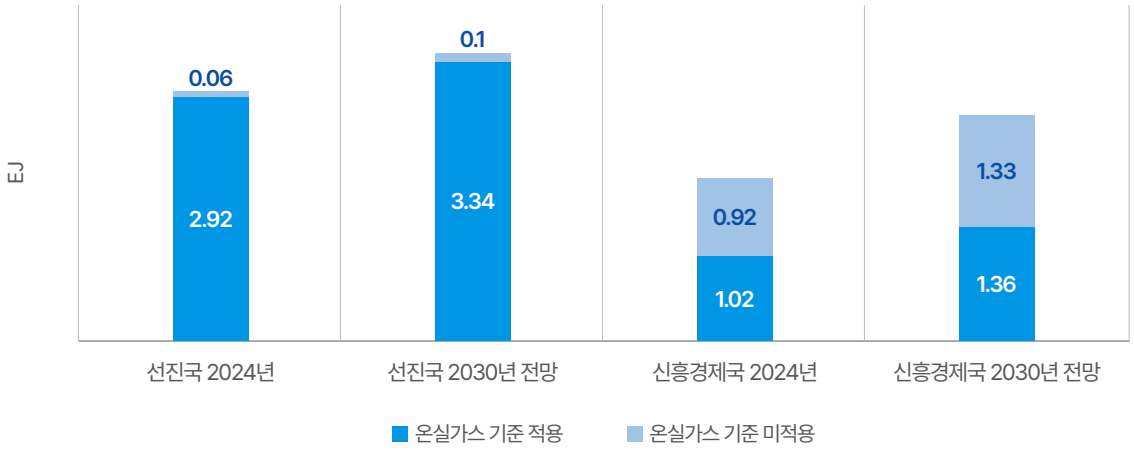
	EU RED	미국 RFS	캘리포니아 LCFS	한국 RFS
전과정 온실가스 성과 기준	설비 가동 시점에 따라 50~65% 최소 감축기준 적용	연료 범주별 20·50·60% 최소 감축기준 적용	연도별 탄소집약도 기준선 차이를 크레딧에 반영	없음
원료·생산경로별 전과정평가	있음	있음	있음	없음
토지이용변화 배출 반영	직접토지이용변화는 전과정 배출에 반영, 간접토지이용변화는 고ILUC 위험 원료 규제로 별도 관리	직접·간접 토지이용변화 배출을 전과정평가에 반영	직접·간접 토지이용변화 배출을 탄소집약도에 반영	없음
고위험 원료 관리	간접토지이용변화 배출 위험이 높은 원료의 산입 한도 단계적 축소, 팜유 2030년까지 산입 0	경로별 전과정평가 결과 팜유 기반 디젤은 최소 감축기준 미달	팜유 및 팜 유래 원료의 크레딧 제외, 일부 유지작물 기반 디젤의 크레딧 인정 물량 제한	없음

세 제도의 작동 방식에는 차이가 있지만, 바이오연료의 정책적 가치를 사용량만으로 평가하지 않는다는 원칙은 공통적이다. 같은 양의 바이오연료라도 원료와 생산경로에 따라 전과정 온실가스 배출량이 다르기 때문에 정책상 인정 여부나 인센티브의 수준도 달라진다. 토지이용변화에 따른 배출 위험 역시 전과정평가에 반영하거나 별도의 원료 기준을 적용하는 방식으로 관리한다.

팜유는 이러한 기준이 실제 연료의 인정 범위를 달리하는 대표적인 사례다. EU에서는 팜유를 고ILUC 위험 원료로 분류해 재생에너지 목표 산입 범위를 단계적으로 축소하고 있으며, 미국에서는 팜유 기반 디젤 경로의 전과정 감축률이 최소 기준에 미달해 RFS 적격 경로에 포함되지 않는다. 캘리포니아에서는 팜유 및 팜 유래 원료로 생산된 연료를 LCFS 크레딧 대상에서 제외한다.

이러한 접근은 특정 국가에 한정된 사례가 아니다. 국제에너지기구(IEA)에 따르면 전 세계 액체 바이오연료 수요의 약 80%가 온실가스 성과기준이나 배출 임계값의 적용을 받고, 특히 선진국에서는 이러한 기준이 거의 보편적으로 활용되고 있다(그림 3). 나아가 이러한 흐름은 도로수송을 넘어 항공과 해운 부문으로도 확산되고 있다.

[그림 3] 온실가스 기준이 적용되는 전 세계 액체 바이오연료 수요 비중(2024~2030)



출처: IEA (2025), *Renewables 2025*

항공·해운으로 확산되는 바이오연료 온실가스 기준

원료와 생산경로에 따른 전과정 배출을 평가하고 토지이용변화를 함께 고려하는 흐름은 도로수송에 국한되지 않는다.

국제항공에서는 국제민간항공기구(ICAO)의 국제항공 탄소상쇄·감축제도(CORSIA)가 지속가능항공유(SAF)의 전과정 배출을 평가해 감축량을 인정한다. 감축 실적으로 인정받으려면 화석 항공유 기준선(89 gCO_2eq/MJ) 대비 최소 10%의 전과정 온실가스를 감축하고, ICAO가 승인한 지속가능성 인증체계의 인증을 받아야 한다. 전과정 배출에는 간접토지이용변화(ILUC)도 포함되며, 주요 작물 기반 원료에는 원료와 생산지역에 따른 ILUC 기본값이 적용된다.

한국도 2027년부터 국내 출발 국제선에 SAF 1% 혼합의무를 도입한다. 정부는 CORSIA 관련 국제 인증을 증빙한 경우에만 혼합실적으로 인정하고, 2030년 이후에는 감축률이 높은 원료에 가중치를 부여하는 방안도 검토하고 있다.

이러한 흐름은 해운에서도 나타난다. 국제해사기구(IMO)는 2024년 선박연료의 전과정 온실가스 평가 지침을 채택했으며, ILUC 위험을 반영하는 방안을 검토하고 있다.

항공과 해운의 사례가 보여주는 방향은 분명하다. 바이오연료의 사용 자체가 아니라 원료와 생산경로에 따른 전과정 감축성과를 평가하고, 이를 연료의 인정과 의무이행에 반영하는 것이다. 한국 RFS에 전과정평가 기준을 도입하는 것은 새로운 시도가 아니라, 국내외 수송연료 정책에서 이미 채택된 원칙을 반영하는 것이다.

한국의 RFS는 바이오연료의 혼합량만으로 의무이행을 판단한다. 최소 감축기준이나 차등 인정체계가 없어 원료와 생산경로에 따른 전과정 감축성과가 의무이행 인정 여부나 수준에 영향을 미치지 않으며, 토지이용변화 위험이 큰 원료를 별

도로 식별하거나 인정 범위를 제한하는 기준도 없다.

그렇다면 현재의 원료 구성을 전제로 할 때, 바이오디젤의 전과정 배출을 고려한 감축효과는 어느 정도일까. 제도에 원료·생산경로별 전과정 배출량을 산정하는 절차가 없으므로 이를 확인할 공식 자료도 없다. 다음 장에서는 한국 RFS의 운영 실태와 원료 구조를 짚고, 해외의 원료별 전과정평가 결과를 참고해 바이오디젤이 경유를 대체할 때 얻을 수 있는 온실가스 감축효과가 어느 정도인지 가늠한다.

IV. 한국 RFS의 원료 구조와 온실가스 감축효과

1. 현행 감축량 산정 방식

RFS 혼합의무비율은 2015년 2.5%로 시작해 단계적으로 상향되어 2024년부터 4%가 적용되고 있다. 제도 도입 이후 혼합 실적과 정부가 산정한 온실가스 감축 실적도 지속적으로 증가해 왔다.

[표 2] 연도별 RFS 이행 현황 및 온실가스 감축량

연도	내수판매량(만 kL)	바이오디젤 혼합량(만 kL)	평균 혼합률(%)	온실가스 감축량(tCO_2)
2015	869	22	2.58	582,400
2016	2,303	58	2.52	1,504,540
2017	2,473	63	2.53	1,632,879
2018	2,508	76	3.03	1,971,340
2019	2,505	76	3.03	1,984,661
2020	2,547	77	3.02	1,984,010
2021	2,385	78	3.27	2,009,190
2022	2,327	82	3.54	2,127,605
2023	2,321	84	3.60	2,155,898
2024	2,250	91	4.06	2,345,372

출처: 한국에너지공단(2025) 2025 KEA 에너지 편람을 바탕으로 재구성

경유 내수판매량은 감소했지만 혼합의무비율이 단계적으로 상향되면서 바이오디젤 혼합량과 정부 산정 감축 실적은 오히려 증가했다. 의무혼합량 산정의 기준이 되는 경유 내수판매량은 2020년 2,547만 kL를 정점으로 감소해 2024년 2,250만 kL를 기록했으나, 같은 기간 혼합량은 77만 kL에서 91만 kL로, 감축 실적은 198만 톤에서 235만 톤으로 늘었다. 현행 산정 방식에서는 혼합량이 늘어나는 만큼 감축 실적도 기계적으로 증가하는 구조다.

정부가 공표하는 감축 실적은 해당 연도 바이오디젤 혼합량에 경유의 순발열량과 국가 고유 배출계수를 적용해, 바이오디젤이 대체한 것으로 간주되는 경유의 연소 CO_2 배출량을 산정한 값이다.

$$\text{온실가스 감축량}(tCO_2) = \text{바이오디젤 혼합량}(kL) \times \text{경유 순발열량} \times \text{경유 탄소배출계수} \times \frac{44}{12}$$

경유 순발열량: 35.3 MJ/L (= 0.0353 TJ/kL)
경유 탄소배출계수: 19.969 tC/TJ
44/12: 탄소 기준 배출(tC)을 이산화탄소 기준(tCO_2)으로 환산하는 계수

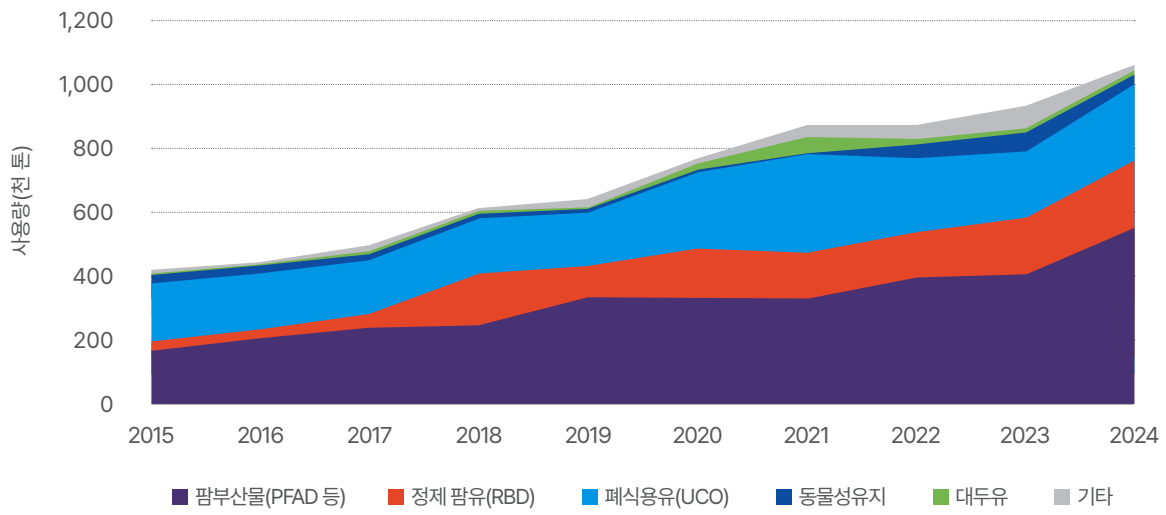
즉, 이 산정에는 바이오디젤의 원료와 생산경로에 따른 배출은 반영되지 않는다. 바이오디젤 연소에서 발생하는 생물기원 CO_2는 국가 인벤토리상 에너지 부문 총배출량에 포함되지 않고, 원료의 재배와 가공, 운송에서 발생하는 배출과 토지이용변화 배출은 평가 범위 밖에 있다. 따라서 어떤 원료로 만든 바이오디젤이든 같은 양을 혼합하면 같은 감축 실적으로 인정된다.

문제는 국내 바이오디젤의 원료 구성을 고려할 때, 이러한 산정 방식으로는 실제 배출 위험이 드러나지 않는다는 데 있다. 다음 절에서는 국내에서 실제로 사용되는 원료의 구성을 살펴본다.

2. 국내 바이오디젤의 원료 구성

RFS 시행 이후 바이오디젤 시장이 확대되는 동안 팜 계열 원료의 사용량과 비중도 크게 증가했다. 2024년에는 정제 팜유와 팜 부산물을 합한 팜 계열 원료가 전체의 72%를 차지했고, 사용량은 약 76만 6천 톤으로 2015년보다 약 네 배 늘었다. 시장 확대 과정에서 원료 구성은 다변화되지 않았고, 팜 계열 원료에 대한 의존은 오히려 심화됐다.

[그림 4] 국내 바이오디젤 원료별 구성(2015~2024)

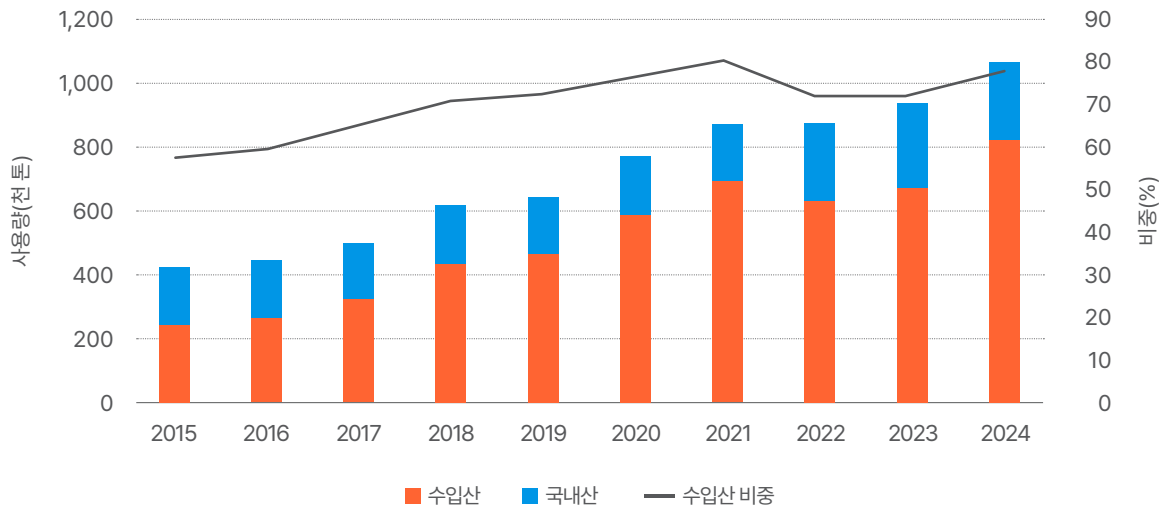


주 1) '팜 부산물(PFAD 등)'은 정제 팜유(RBD)를 제외한 PFAD, Palm Acid Oil, Palm Kernel Oil, Palm Stearin 등을 포함하며, 이 중 PFAD가 대부분을 차지한다. 2) 기타 원료에는 국내산 어유·다크오일과 수입산 유채유·코코넛유·면실유·우지 등이 포함된다.

출처: U.S. Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service (2026), Oilseeds and Products Annual: Korea에 수록된 한국바이오에너지협회 자료를 바탕으로 재구성

같은 기간 수입 원료에 대한 의존도도 높아졌다. 2015년 57.5%였던 수입산 원료의 비중은 2024년 77.2%에 달한다. 같은 기간 수입 원료 사용량이 약 24만 2천 톤에서 82만 1천 톤으로 세 배 이상 증가한 반면, 국내산 원료는 약 17만 9천 톤에서 24만 3천 톤으로 증가하는 데 그쳤다. 바이오디젤 시장 확대에 따른 추가 원료 수요의 상당 부분을 수입 원료가 충당한 셈이다.

[그림 5] 바이오디젤 원료의 수입산·국내산 원료량과 수입 의존도(2015~2024)



국내산 원료 확대에는 공급 측면의 제약이 있다. 국내에서 확보할 수 있는 바이오디젤 원료는 폐식용유가 대부분을 차지하며, 그 양은 연평균 약 20만 톤 수준에 불과하다. 혼합의무가 확대되는 동안 늘어난 수요를 뒷받침할 새로운 국내 원료의 발굴과 활용은 이루어지지 못했고, 그 간극은 수입 원료가 채워왔다.

앞으로는 한정된 저탄소 원료를 둘러싼 부문 간 경쟁도 심화될 전망이다. 정부는 2027년부터 국내 출발 국제선 항공유에 지속가능항공유 1% 혼합을 의무화하고, 2030년까지 그 비중을 3~5%로 높일 계획이다. 폐식용유는 지속가능항공유의 주요 원료이기도 한 만큼, 도로용 바이오디젤과 항공용 SAF가 동일한 원료를 두고 경쟁할 가능성이 커진다.

그런데 국내에서 발생한 폐식용유 상당량은 이미 해외로 수출되고 있다. 2024/25년 폐식용유 수출량은 15만 톤이며, 이 가운데 미국 수출량이 약 68%를 차지했다. 상대적으로 가치가 높은 원료가 원료의 감축가치를 차등 평가하고 보상하는 시장으로 이동하고 있는 것이다.

한국의 RFS는 원료나 생산경로별 감축성과를 의무이행에 차등 반영하지 않는다. 국내 시장에서 기후성과가 원료 선택의 기준이 되지 못하는 이유다. 국내 저탄소 원료의 공급이 제한되고 해외 시장과 다른 수송 부문 수요가 함께 경쟁하는 상황에서 혼합의무만 확대된다면, 추가 수요는 수입 팜 계열 원료로 충당될 가능성이 크다.

결국 문제는 이 구조가 감축성과와 직결된다는 데 있다. 바이오연료의 전과정 배출은 원료에 따라 크게 달라지며, 특히 작물 기반 원료는 토지이용변화에 따른 배출까지 고려해야 한다. 주요국이 팜유 기반 원료의 인정 범위를 축소하거나 재생에너지 인정 대상에서 제외해 온 것도 같은 이유에서였다.

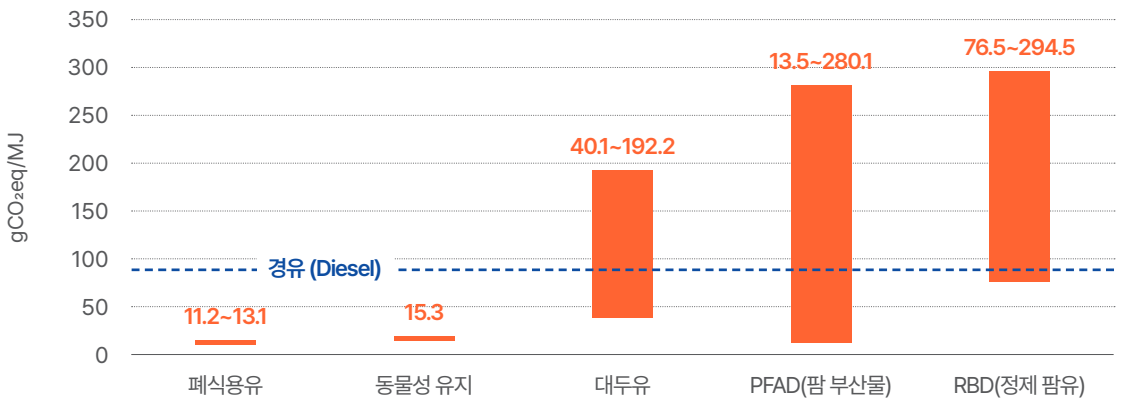
다음 절에서는 원료별 전과정 배출값을 참고해, 팜 계열이 대부분을 차지하는 국내 원료 구조에서 감축효과가 어느 정도 달라질 수 있는지 가늠해 본다.

3. 전과정 배출을 반영한 감축효과 추정

이 절에서는 해외 규제기준과 주요 문헌에서 제시된 원료별 전과정 온실가스 배출값을 2024년 국내 바이오디젤 원료 구성에 적용해, 적용하는 배출값에 따라 감축효과가 어느 정도 달라질 수 있는지 가늠한다. 이는 한국에서 실제 사용되는 바이오디젤의 전과정 배출량을 산정한 결과가 아니다. 현재 공개된 국내 자료에서는 원료별 생산경로와 원산지 등을 반영한 전과정 배출량을 확인하기 어려워, 해외 규제기준과 주요 문헌에서 확인되는 값을 참고해 비교하였다.

작물 기반 원료의 배출값은 평가방법과 가정에 따라 문헌에서 제시되는 값의 차이가 특히 크다. 2장에서 살펴본 바와 같이, 작물 기반 바이오연료의 전과정평가에서는 토지이용변화가 결과를 크게 좌우하며, 어떤 경제모형을 사용하는지, 시스템 경계를 어디까지 두는지, 전환되는 토지의 유형과 탄소저장량을 어떻게 가정하는지에 따라 추정값이 크게 달라지기 때문이다. 따라서 이하에서 적용하는 낮은 값과 높은 값은 국내 바이오디젤 배출량의 실제 하한과 상한을 의미하지는 않으며, 서로 다른 가정과 평가 방법을 적용했을 때 감축효과가 얼마나 달라질 수 있는지를 비교하기 위한 것이다.

[그림 6] 본 분석에서 참고한 주요 원료별 전과정 온실가스 배출값



주: 비교기준은 EU 재생에너지지침(RED)의 화석 수송연료 비교기준인 94 gCO_2eq/MJ를 적용했다.

폐식용유와 동물성 유지의 경우 배출값이 낮고 차이도 작다.[10] 두 원료가 폐기물 또는 잔류물로 취급되어 원료 생산 단계의 배출이 배분되지 않고 토지이용변화 배출도 부여되지 않은 결과다.

반면 정제 팜유는 평가 방법에 따라 76.5에서 294.5 gCO_2eq/MJ까지 서로 다른 배출값이 제시된다.[11] 낮은 값을 적용해도 감축률은 19%에 그치며, 높은 값에서는 전과정 배출량이 경유의 세 배를 넘는다. 대두유도 팜유보다 그 값은 낮으

10 폐식용유의 낮은 값은 EU 재생에너지지침 부속서 V의 전형값이고, 높은 값은 미국 환경보호청이 제시한 yellow grease 바이오디젤 값을 환산한 것이다. 동물성 유지는 부속서 V의 전형값이다. 미국 환경보호청은 동물성 유지를 일반 적용 경로로 승인했으나 전과정 산정 결과를 공개하지 않아 EU 값만 적용했다.

11 정제 팜유와 대두유의 낮은 값은 미국 환경보호청(EPA)의 산정값을 환산한 것이고, 높은 값은 EU 재생에너지지침의 전형값에 EU 집행위원회가 발주한 GLOBIOM 연구가 산정한 토지이용변화 배출을 더한 값이다.

나, 토지이용변화의 반영 여부와 크기에 따라 결과가 크게 달라진다는 점에서는 유사하다.

PFAD의 배출값은 원료 분류와 간접토지이용변화(ILUC)의 반영 여부에 따라 크게 달라진다. PFAD를 잔류물로 분류하면 팜 재배와 정제 단계의 배출이 배분되지 않고, ILUC 배출도 반영되지 않는다. 이 경우 배출값은 13.5 gCO_2eq/MJ로, 연료 생산 단계의 배출이 전체의 약 85%를 차지한다. 반면 PFAD를 공동산물로 분류해 팜유 생산 과정의 배출을 배분하고 ILUC 배출을 반영하면, 추정 방식에 따라 최대 280.1 gCO_2eq/MJ까지 높아진다.[12]

PFAD 사용은 왜 팜유 수요와 분리하기 어려운가

PFAD(Palm Fatty Acid Distillate)는 팜유 정제 과정에서 유리지방산(FFA)을 분리해 얻는 증류물이다. 공정 관점에서는 정제 과정에서 나오는 부수적 산출물이지만, 시장에서는 올레오케미컬·비누·양초·사료 등 뚜렷한 용도와 가격을 가진 독립적인 경제적 상품으로 거래된다. 가격은 정제 팜유 대비 약 80% 수준으로, 여러 곡물·원자재와 비교해도 상대적으로 높은 가치를 가진 원료로 평가된다.

문제는 PFAD가 바이오연료로 이용될 때 기존의 수요가 사라지는 것이 아니라는 점이다. 공급이 팜유 생산에 연동되어 있어 연료 수요에 맞춰 공급을 독립적으로 늘리기 어렵다. 따라서 연료용으로 이용이 증가할 경우, 기존 시장에서 대체 원료가 필요해진다. 한 연구는 PFAD 1톤의 연료 전용은 약 0.64톤의 추가 팜유 수요를 유발할 수 있다고 추정하기도 한다.

이러한 대체효과를 고려하지 않으면 PFAD의 전과정 배출값은 과소평가된다. PFAD를 '잔류물'로 분류하면 팜 재배 및 토지이용변화 배출을 PFAD에 귀속하지 않아 폐식용유와 유사한 낮은 탄소값이 산정되지만, 팜유 생산의 공동산물로 보거나 기존 용도의 대체효과를 고려하면 추가 팜유 생산과 토지이용변화 배출이 평가 범위에 들어와 배출값이 크게 상승한다.

노르웨이와 스웨덴 등 국가는 PFAD를 폐기물·잔류물 우대 대상에서 제외하고 부산물로 재분류해 지속가능성 기준을 적용한다. 특히 스웨덴은 이 조치 후 PFAD 기반 재생디젤 사용이 크게 감소했으며, 이는 분류 변경이 실제 시장 행동에 영향을 미쳤음을 보여준다. 결국 PFAD 바이오연료의 낮은 배출값은 기존 용도의 대체효과와 간접토지이용변화(ILUC)를 반영하지 않았을 때 산정된다. 이를 근거로 PFAD의 연료 사용을 확대하면 기존 용도를 대체할 팜유 수요가 늘고, 산림·이탄지 전환으로 이어질 수 있다.

국내 원료 구조를 반영한 감축효과

위에서 제시한 낮은 배출값과 높은 배출값을 각각 2024년 원료별 비중에 적용하면,[13] 국내 바이오디젤의 전과정 배출은 경유의 약 28% 수준에서 약 2.3배 수준까지 달라진다.

12 PFAD 배출값은 Xu et al.(2020)이 PFAD 기반 재생디젤 경로에 대해 제시한 결과다. 이 분석에서는 원료 분류와 간접토지이용변화(ILUC) 산정 조건에 따른 차이를 살펴보기 위해 해당 값을 바이오디젤에 적용했다.

13 낮은 값과 높은 값은 국내 바이오디젤 배출량의 통계적 하한과 상한을 의미하지 않으며, 서로 다른 규제기준과 문헌에서 확인되는 원료별 전과정 배출값을 적용한 것이다. 2026~2030년 추정에는 미래 원료 구성에 대한 공식 전망이 없어 2024년 원료별 비중이 유지된다고 가정했다.

이 결과를 2030년까지 예상 의무혼합량에 적용하면 다음과 같다. 혼합의무비율은 현재 예정된 2030년 5%에 이르는 경로와, 정부가 검토 중인 2030년 8% 도달 경로로 나누어 보았다. 의무혼합량 산정의 기준이 되는 자동차용 경유 내수 판매량은 2024년 실적에 중기 에너지 수요 전망의 감소율을 적용해 추정했다.[14] 감축효과는 의무혼합되는 바이오디젤과 동일한 부피의 경유가 대체된다고 가정하고, 두 연료의 전과정 배출량 차이로 산정했다.[15]

[표 3] 혼합의무비율 5% 경로의 연도별 감축효과 추정(2026~2030)

연도	경유 내수 판매량 (만 kL)	혼합비율	바이오디젤 혼합량 (만 kL)	대체된 경유 배출 (tCO_2eq)	순감축량 (낮은 배출값 적용) (tCO_2eq)	순감축량 (높은 배출값 적용) (tCO_2eq)
2026	2,130	4.00%	85	2,826,527	2,111,316	-3,042,532
2027	2,072	4.50%	93	3,093,351	2,310,625	-3,329,747
2028	2,015	4.50%	91	3,009,212	2,247,776	-3,239,178
2029	1,960	4.50%	88	2,927,361	2,186,636	-3,151,072
2030	1,907	5.00%	95	3,164,152	2,363,511	-3,405,959
누적			453	15,020,602	11,219,863	-16,168,487

[표 4] 2030년 8% 상향 시 연도별 감축효과 추정(2026~2030)

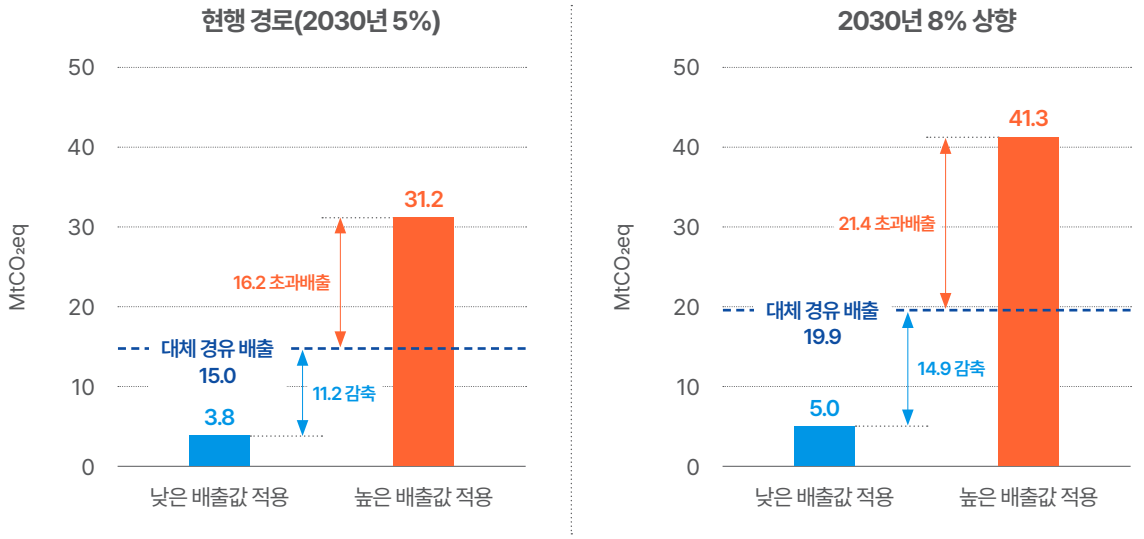
연도	경유 내수 판매량 (만 kL)	혼합비율[16]	바이오디젤 혼합량 (만 kL)	대체된 경유 배출 (tCO_2eq)	순감축량 (낮은 배출값 적용) (tCO_2eq)	순감축량 (높은 배출값 적용) (tCO_2eq)
2026	2,130	4.00%	85	2,826,527	2,111,316	-3,042,532
2027	2,072	5.00%	104	3,437,057	2,567,361	-3,699,719
2028	2,015	6.00%	121	4,012,283	2,997,035	-4,318,904
2029	1,960	7.00%	137	4,553,673	3,401,434	-4,901,668
2030	1,907	8.00%	153	5,062,643	3,781,617	-5,449,534
누적			599	19,892,182	14,858,763	-21,412,357

14 감소율은 에너지경제연구원(2026), 「중기 에너지 수요 전망 2026~2030」의 기준 시나리오에 따른 것으로, 전망에서 제시한 수송용 경유와 RFS 의무량 산정의 대상이 되는 자동차용 경유는 통계상 범위가 동일하지 않아 전망치의 절대량이 아닌 연도별 감소율만 적용하였다.

15 바이오디젤 혼합량(kL)에 경유 순발열량 35.3 MJ/L와 바이오디젤 순발열량 32.3 MJ/L를 각각 적용해 두 연료의 에너지량을 산정한 뒤 연료별 배출값을 곱했다. 두 발열량은 「에너지법 시행규칙」 [별표] 에너지열량 환산기준에 따른다.

16 8% 경로는 2026년 현행 의무혼합비율 4%에서 2030년 8%까지 매년 같은 폭으로 상향한다고 가정한 가상 경로로, 정부가 확정한 경로가 아니다. 정부 계획은 일부를 재생디젤로 충당하는 방안을 상정하나, 여기서는 전량을 바이오디젤로 가정했다.

[그림 7] RFS 이행에 따른 바이오디젤의 누적 전과정 배출량(2026~2030)



바이오디젤이 대체하는 경유의 전과정 배출은 5% 경로에서 5년 누적 1,502만 톤이다. 바이오디젤을 사용하지 않았다면 경유 사용으로 발생했을 배출량으로, 감축효과를 판단하는 기준이 된다. 낮은 배출값을 적용하면 순감축량은 1,122만 톤으로 그 기준의 75% 수준에 그친다. 바이오디젤 자체의 전과정 배출 약 380만 톤이 감축분을 상쇄하기 때문이다. 높은 배출값을 적용하면 결과의 부호가 바뀐다. 5% 경로에서 바이오디젤의 전과정 배출량은 3,119만 톤에 이르러 대체되는 경유의 배출량을 넘어선다. 초과 배출량은 1,617만 톤이다. 같은 조건에서 혼합의무비율을 2030년 8%까지 높이는 경로에서는 초과 배출량이 2,141만 톤으로 늘어난다.

적용하는 배출값에 따라 수치에는 차이가 있지만, 한 가지는 분명하다. 혼합량만으로 산정한 현행 감축 실적은 어떤 원료를 사용했는지에 따른 전과정 배출 차이를 보여주지 못한다. 감축효과의 크기와 방향은 어떤 원료를 사용하고, 그 원료의 생산·가공과 토지이용변화에 따른 배출을 어디까지 평가하는지에 따라 크게 달라진다. 원료별 전과정 감축성과를 평가하지 않은 채 혼합의무비율만 높여서는 바이오연료 사용 증가가 그에 상응하는 온실가스 감축으로 이어진다고 볼 수 없다.

특히 주목할 부분은 팜 계열 원료다. 정제 팜유는 가장 낮은 배출값을 적용해도 경유 대비 감축률이 20%에도 미치지 못해, 주요국의 최소 감축기준을 충족하기 어렵다. PFAD 역시 팜유 생산의 공동산물로 보고 토지이용변화를 반영하면 정제 팜유에 가까운 배출값이 산정된다. 이처럼 높은 전과정 배출 가능성과 토지이용변화 위험은 주요국이 팜유 기반 바이오연료의 인정 범위를 축소하거나 제외해 온 주요 배경이다. 국내 원료의 70% 이상을 차지하는 팜 계열 원료를 어떻게 다룰 것인지가 현행 RFS의 감축성과를 좌우하는 핵심 과제다.

다음 장에서는 이러한 분석을 바탕으로, 현행 RFS가 물량 중심의 의무제도에서 감축성과를 관리하는 제도로 전환하기 위해 필요한 개선 방향을 살펴본다.

V. 결론: RFS 개선을 위한 정책 제언

RFS의 다음 과제는 더 많이 섞는 것이 아니라, 무엇을 섞어 얼마나 줄였는지를 평가할 수 있는 제도를 만드는 것이다. 앞서 살펴본 것처럼 같은 바이오디젤이라도 원료와 생산경로, 토지이용변화의 반영 여부에 따라 온실가스 감축성과는 크게 달라지며, 특히 국내에서 비중이 큰 팜 계열 원료는 토지이용변화 등을 어떻게 평가하는지에 따라 석유계 경유보다 전과정 배출이 더 큰 것으로 평가될 수 있다.

정부도 현행 제도의 한계를 이미 인식하고 있다. 2022년 「친환경 바이오연료 확대 방안」에서 정량적인 법정 의무혼합량 충족 여부만을 관리하는 현행 제도의 문제점을 진단하고 실질적인 탄소감축효과를 반영·관리하는 방향을 제시했지만, 4년이 지난 현재까지 관련 제도 개편은 이루어지지 않았다. 반면 2027년부터 도입될 지속가능항공유(SAF) 혼합의무는 국제 기준에 따라 전과정 배출을 평가하도록 설계되고 있어 대조적이다.

혼합량만을 기준으로 의무를 부과해서는 RFS의 기후성과를 담보하기 어렵다. 바이오연료의 혼합을 의무화하려면, 원료별 전과정 온실가스 배출을 평가해 감축성과를 의무이행에 반영하고, 토지이용변화 위험이 큰 원료를 구분해 관리하며, 이를 뒷받침할 원료 정보의 확인·검증 체계를 마련해야 한다.

◦ 전과정 온실가스 성과를 평가해 의무이행에 반영해야 한다

RFS 개편의 핵심은 바이오연료의 전과정 온실가스 감축성과를 평가하고, 그 결과에 따라 의무이행 인정 여부와 수준을 달리하는 것이다. 이를 위해 원료 생산부터 가공·운송·연료 생산과 사용에 이르는 전과정 배출량을 산정하는 기준부터 마련해야 한다. 직접토지이용변화에 따른 배출은 산정 범위에 포함하고, 간접토지이용변화는 전과정 배출값에 반영하거나 별도의 원료 위험 기준으로 관리하는 방안을 함께 검토할 필요가 있다.

전과정 배출을 일관되게 평가할 수 있도록 구체적인 산정방법도 함께 마련해야 한다. 산정 기준과 적용 근거는 공개하고 주기적으로 갱신해야 한다. 평가 결과를 의무이행에 반영하는 방식으로는 다음과 같은 대안을 검토할 수 있다.

1안 최소 감축기준 방식 일정 수준 이상의 전과정 온실가스 감축을 달성한 바이오연료만 RFS 의무이행 실적으로 인정한다. 기준에 미달하는 연료는 의무이행 대상에서 제외함으로써 최소한의 감축성과를 확보하는 방식이다.

2안 감축성과 차등 인정 방식 바이오연료의 탄소집약도 또는 온실가스 감축률에 따라 의무이행 가치를 차등화한다. 감축성과가 높은 연료에 더 높은 이행가치를 부여해 의무이행자가 상대적으로 배출이 낮은 원료와 생산경로를 선택하도록 유도하는 방식이다.

3안 최소기준과 차등 인정을 결합하는 방식 일정 수준의 최소 감축기준을 충족한 연료만 의무이행 대상으로 인정하되, 그 범위 안에서는 감축성과에 따라 의무이행 가치를 차등화한다.

어떤 방식을 선택할 것인지는 국내 RFS의 행정체계와 사업자의 자료 확보 수준, 검증 비용을 고려해 결정할 필요가 있다. 중요한 것은 전과정 평가기준을 도입하는 것 자체가 아니라, 그 기준이 감축성과가 낮거나 배출 위험이 큰 원료를 가려내는 장치로 작동하도록 하는 것이다. 평가 결과에 따라 어떤 바이오연료를 의무이행 수단으로 인정할 것인지, 인정한다면 어느 수준까지 인정할 것인지를 달리할 수 있어야 한다.

◦ 토지이용변화 위험이 큰 원료를 가려낼 기준을 마련해야 한다

전과정 배출량 산정만으로 토지이용변화에 따른 배출 위험을 충분히 다루기는 어렵다. 특히 간접토지이용변화는 개별 공급망 밖에서 시장을 매개로 발생하기 때문에 특정 연료의 실제 배출량으로 직접 확인하기 어렵고, 분석 방법과 가정에 따라 추정값도 달라진다.

주요국의 대응 방식도 이에 따라 다르다. 간접토지이용변화 배출을 전과정 산정에 포함해 연료의 적격성을 판단하는 제도가 있는가 하면, 산정과 별도로 고위험 원료를 지정해 인정 범위를 제한하는 제도도 있다. 어느 방식을 택하든 토지이용변화에 따른 배출 위험이 의무이행 과정에서 누락되지 않도록 하는 것이 중요하다.

팜유는 우선적으로 검토해야 할 원료다. 앞서 살펴본 주요 제도는 구체적인 방식에는 차이가 있지만, 토지이용변화와 전과정 배출을 고려하여 팜유 기반 바이오연료의 인정 범위를 축소하거나 제외하고 있다. 한국의 RFS에는 이러한 구분이 없다. 토지이용변화 위험이 큰 원료를 식별하고, 그 위험에 따라 의무이행 인정 범위를 달리할 수 있는 기준을 마련해야 한다. 이러한 기준을 통해 팜유와 같이 위험이 큰 원료가 다른 원료와 동일하게 인정되는 구조를 개선하고, 고위험 원료의 인정 범위를 단계적으로 축소할 필요가 있다.

팜유뿐 아니라 팜 생산·가공 과정에서 발생하는 부산물과 잔류물 등 팜 유래 원료도 함께 검토해야 한다. 원료의 분류만으로 토지이용변화 위험이 낮다고 전제해서는 안 된다. 팜유 생산과의 연계성, 기존 용도와 대체효과 등을 고려해 원료별 위험을 판단하고, 그 차이를 고위험 원료의 판단 기준에도 반영해야 한다.

◦ 원료 정보를 수집·검증하고 공개해야 한다

앞의 두 기준이 실제로 작동하기 위해서는 원료가 무엇이고 어디서 왔는지를 확인할 수 있어야 한다. 특히 수입 원료의 생산과 토지이용 과정에서 발생하는 배출까지 평가하려면 원산지와 생산·조달 경로를 확인할 수 있는 원료·공급망 정보가 필요하다.

현행 RFS는 의무이행 물량을 중심으로 관리되고 있어, 원료의 종류와 원산지, 조달 경로를 의무이행 실적과 연계해 확인·관리하는 체계는 갖춰져 있지 않다. 의무이행 사업자가 최소한 원료의 종류, 원산지, 생산자 또는 공급자, 조달 경로에 관한 정보를 제출하도록 하고, 이를 의무이행 실적과 연계해 관리할 필요가 있다. 주요 제도는 원산지 국가뿐 아니라 원료의 생산 단위까지 추적할 수 있는 정보를 요구한다. 원료가 어디에서 생산되었는지를 확인할 수 없다면 토지이용변화 위험을 판단하는 데도 한계가 있기 때문이다.

수집된 정보는 검증할 수 있어야 한다. 사업자의 보고에만 의존해서는 원료와 생산경로, 전과정 배출량을 일관되게 확인하기 어렵다. 전문기관이 원료와 제조공정, 전과정 배출량을 검증하고, 정부가 보고된 자료를 교차검증해 공급망 위험을 점검할 수 있는 관리체계를 갖춰야 한다.

수집·검증한 정보와 그 결과는 정기적으로 공개해야 한다. 정부는 연 1회 이상 원료별 투입량과 비중, 원산지별 구성, 원료·생산경로별 전과정 온실가스 배출량, 그리고 최종적으로 인정된 감축성과를 공개할 필요가 있다. 정보가 공개되어야 제도가 의도한 방향으로 작동하는지 확인할 수 있다.

혼합량을 넘어 감축성과로

앞서 제안한 세 가지 조치는 하나의 방향을 향한다. 바이오연료의 사용량이 아니라 온실가스 감축성과를 기준으로 RFS가 작동하도록 하는 것이다. 이를 위해서는 전과정 배출을 평가해 의무이행에 반영하고, 토지이용변화 위험이 큰 원료가 다른 원료와 같은 가치로 인정되지 않도록 하며, 이러한 평가와 관리를 뒷받침할 원료 정보를 확보해야 한다.

세 조치는 따로 떼어 놓을 수 없다. 전과정 평가를 도입하더라도 토지이용변화 위험이 큰 원료를 가려내지 못하면 제도는 형식에 그칠 수 있고, 원료의 종류와 출처를 확인할 수 없으면 어떤 평가와 관리 기준도 제대로 작동하지 않는다.

결국 RFS가 답해야 할 것은 바이오연료를 얼마나 사용했는지가 아니라, 무엇을 사용해 실제로 얼마나 온실가스를 줄였는지다.

참고문헌

- 관계부처 합동. (2021). 『2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안』
- 기후에너지환경부. (2026). 『제1차 재생에너지 기본계획』
- 산업통상자원부. (2022). 『탄소중립 시대 에너지 신산업 육성을 위한 친환경 바이오연료 확대 방안』
- 산업통상자원부. (2025). 『신재생에너지연료 혼합의무화제도(RFS)의 의무비율 상향 중장기 로드맵 수립 연구』 정책연구용역 입찰공고
- 산업통상자원부, 국토교통부. (2025). 『지속가능항공유(SAF) 혼합 의무화제도 로드맵』
- 에너지경제연구원. (2011). 『국내 바이오디젤 원료수급체계 구축방안』
- 에너지경제연구원. (2026). 『중기 에너지 수요 전망 2026~2030』
- 한국에너지공단. (2025). 『2025 KEA 에너지편람』
- Fasan, E., & Winda, M. P. (2026). 『한국 바이오연료의 이면: 인도네시아–한국 팜유 공급망의 지속가능성 리스크』 기후솔루션.
- California Air Resources Board. (2024). CARB updates the Low Carbon Fuel Standard to increase access to cleaner fuels and zero-emission transportation options.
- California Air Resources Board. LCFS Land Use Change Assessment. https://ww2.arb.ca.gov/resources/documents/lcfs-land-use-change-assessment (2026. 8. 16. 접속)
- El Takriti, S., Malins, C., & Searle, S. (2016). Understanding options for ILUC mitigation. Working Paper 2016-23. The International Council on Clean Transportation.
- European Commission. (2019). Report on the status of production expansion of relevant food and feed crops worldwide. COM(2019) 142 final.
- European Commission. (2026). Report on the status of production expansion of relevant food and feed crops worldwide. COM(2026) 36 final.
- Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S., & Hawthorne, P. (2008). Land clearing and the biofuel carbon debt. Science, 319(5867), 1235–1238. https://doi.org/10.1126/science.1152747
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Volume 2: Energy.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Force on National Greenhouse Gas Inventories. Frequently asked questions. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/faq/faq.html (2026. 8. 16. 접속)
- International Council on Clean Transportation. ILUC factors and palm oil yields: Resolving an apparent contradiction. https://theicct.org/iluc-factors-and-palm-oil-yields-resolving-an-apparent-contradiction/ (2026. 8. 16. 접속)
- International Energy Agency. (2024). Carbon accounting for sustainable biofuels. IEA.
- International Energy Agency. (2024). Renewables 2024. IEA.
- International Energy Agency. (2025). Renewables 2025. IEA.
- International Energy Agency. (2026). Sheltering from oil shocks. IEA.
- REN21. (2025). Renewables 2025 global status report collection. REN21 Secretariat.
- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., Hayes, D., & Yu, T. H. (2008). Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. Science, 319(5867), 1238–1240. https://doi.org/10.1126/science.1151861
- US Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service. (2021). Belgium to ban palm and soya oil for use in biofuels from 2022. GAIN Report BE2021-0005.
- US Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service. (2026). Oilseeds and products annual: Korea.

- US Environmental Protection Agency. (2012). Notice of data availability concerning renewable fuels produced from palm oil under the RFS program. 77 FR 4300.
- US Environmental Protection Agency. Overview of the Renewable Fuel Standard program. https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard/overview-renewable-fuel-standard-program (2026. 8. 16. 접속)
- US Environmental Protection Agency. Lifecycle analysis of greenhouse gas emissions under the Renewable Fuel Standard. https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard/lifecycle-analysis-greenhouse-gas-emissions-under-renewable-fuel-standard (2026. 8. 16. 접속)

전과정 배출량 추정에 활용한 문헌

- European Union. (2018). Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources, Annex V
- Malins, C. (2017). Waste not want not: Understanding the greenhouse gas implications of diverting waste and residual materials to biofuel production. Cerulogy.
- Malins, C. (2023). PFAD and biofuels. Rainforest Foundation Norway.
- Roux, M., Ekvall, T., Schmidt, J., & Croxatto Vega, G. (2024). Which rules to follow? How differences in renewable fuel standards obscure the potential climate impact of transportation fuels. Frontiers in Energy Research, 12, 1490137. https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1490137
- Transport & Environment. (2016). Globiom: The basis for biofuel policy post-2020.
- US Environmental Protection Agency. (2023). Summary lifecycle analysis greenhouse gas results for the U.S. Renewable Fuels Standard Program. Office of Transportation and Air Quality.
- Valin, H., Peters, D., van den Berg, M., Frank, S., Havlik, P., Forsell, N., & Hamelinck, C. (2015). The land use change impact of biofuels consumed in the EU: Quantification of area and greenhouse gas impacts. Ecofys, IIASA, & E4tech.
- Xu, H., Lee, U., & Wang, M. (2020). Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions of palm fatty acid distillate derived renewable diesel. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 134, 110144. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110144

SFO°C
Solutions for Our Climate

기후솔루션은 전 세계 온실가스 감축 및 올바른 에너지 전환을 위해 활동하는 비영리법인입니다.
리서치, 법률, 대외 협력, 커뮤니케이션 등의 폭넓은 방법으로 기후위기를 해결할 실질적 솔루션을 발굴하고,
근본적인 변화를 위한 움직임을 만들어 나갑니다.