

(기술·연구·표준) 동향

전주기평가(LCA) 개론 및 바이오연료 적용 사례



제 1장	개요	3
	지속 가능한 연료생산을 위한 바이오매스 활용	3
	바이오연료 혼합의무제도 프로그램과 온실가스 감축	3
	바이오연료의 전주기 평가: 작성 배경	4
제 2장	기술 동향	4
	바이오연료 전주기평가 기술	4
	전과정 평가(LCA) 규격동향 및 방법론	5
제 3장	기술의 주요 내용	6
	목질계 바이오매스 기반 수송연료(에탄올) 생산 기술	6
	목질계 바이오매스 기반 에탄올 생산 전주기평가 기술	8
제 4장	결론	11
제 5장	참고문헌	12

제 1장 개요

지속 가능한 연료생산을 위한 바이오매스 활용

- 바이오매스는 식량 작물 위주의 1세대 바이오매스, 비식량계 농업 및 임업 산물위주의 2세대 바이오매스, 그리고 해조류 및 미세조류 위주의 3세대 바이오매스로 분류 할 수 있음.¹⁾
- 세계 주요국들은 파리기후협약 NDC* 공약이행을 위하여 자국의 에너지믹스 구조 전환을 추진 중이며 석유계 화학물질에 대한 바이오매스 유래 화학물질로의 대체를 적극 주도하고 있음. 최근까지 1세대 바이오매스를 활용한 연료 및 화학제품 생산에 관한 연구들이 활발히 진행되었으며,²⁾ 일부 기술은 상용화 또는 그에 근접한 수준에 도달해 있음.
- 하지만 식량작물로 구성된 1세대 전분계 바이오매스는 한정된 경작지와 식량부족, 복잡한 처리 공정과 과도한 비용 발생 등 산업화 과정에서 여러 문제를 내포하고 있어 이러한 문제점을 해결해 나가기 위한 다각적인 연구와 대안 제시가 필요함. 목질계 및 조류로 구성된 2세대 및 3세대 바이오매스는 1세대 바이오매스 활용의 잠재적인 문제를 해결할 수 있는 대체재로서 유망한 옵션임.

바이오연료 혼합의무제도 프로그램과 온실가스 감축

- 2005년 에너지 정책법(EPA)에 따라 제정되고 2007년 에너지 독립 및 보안법(EISA)에 따라 확대된 재생 가능 연료 표준(RFS) 프로그램은 지속 가능한 에너지 활용을 목표로 함.³⁾ RFS 프로그램은 재생 가능 연료를 네 가지 유형으로 분류함. 바이오매스 기반 디젤, 셀룰로오스 바이오연료, 고급 바이오연료, 기타 재생가능(또는 기존)연료가 이에 해당됨.
- RFS 프로그램에 따라 재생 가능한 연료로 인정받으려면 EPA의 엄격한 평가를 받아야 함. 요구 사항 중 핵심은 환경 지속 가능성이라는 목표에 맞춰 2005년 석유 기준과 비교하여 온실가스(GHG) 배출을 줄이는 것임. 재생 가능 분류별 전주기 온실가스 감축기준은 다음과 같음. 바이오매스 기반 디젤: 50%, 셀룰로오스 바이오연료: 60%, 고급 바이오연료: 50%, 재생가능(또는 기존) 연료: 20%임.³⁾
- EPA는 네 가지 재생 연료 범주에서 다양한 연료 경로를 승인해왔음. 예로는 사탕수수에서 추출한 에탄올, 카멜리나에서 추출한 제트 연료, 옥수수대에서 추출한 셀룰로오스 에탄올, 도시 폐수 처리 시설 소화조에서 추출한 압축 천연 가스 등이 있음. 새로운 경로에 대한 지속적인 검토 및 승인, 기술 발전 및 새로운 공급원료 통합에 대한 혁신을 보여줄 것으로 기대됨.

* Nationally Determined Contributions

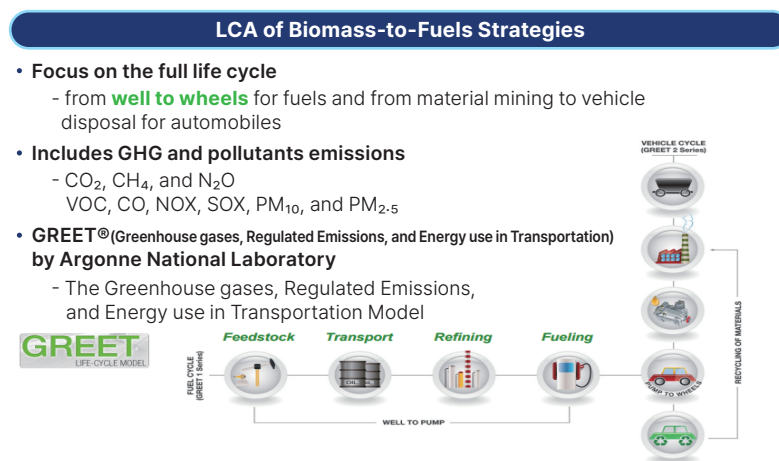
✎ 바이오연료의 전주기 평가: 작성 배경

- 가솔린이나 디젤과 매우 유사한 특정 바이오연료는 기존의 석유 기반 연료에 원활하게 통합될 수 있음. “드롭인(drop-in)” 바이오연료라고 불리는 이 연료는 혼합할 필요 없이 기존 연료를 대체할 수 있는 간단하고 효과적인 수단을 제공하므로 지속 가능한 연료 생산을 위한 무한한 가능성을 가지고 있음.
- 바이오연료는 지속 가능한 에너지에 대한 탁월한 대안으로 떠오르면서 환경에 미치는 영향에 대한 관심이 높아짐. 전과정평가(LCA) 방법론은 이러한 영향을 종합적으로 평가하는 데 중요한 도구 역할을 함. 이 보고서는 LCA의 주요 방법론 소개 및 바이오연료 분야 유망 기술의 상세한 문헌 검토를 바탕으로 바이오연료에 적용되는 LCA에 대한 심도있는 고찰을 제공함.

제 2장 기술 동향

✎ 바이오연료 전주기평가 기술

- 미 아르곤 국립연구소에서 개발한 GREET* 모델은 운송 연료 및 차량 기술의 수명주기 영향을 평가하기 위해 널리 사용되는 도구임. 이는 에너지 사용, 온실가스 배출 및 다양한 연료 경로와 관련된 기타 환경 영향에 대한 포괄적인 분석을 제공함.
- GREET 모델은 바이오 연료를 포함한 광범위한 연료를 다루며 기존 연료 옵션과 대체 연료 옵션 간의 비교를 용이하게 함. GREET 모델의 독특한 특징 중 하나는 원자재 추출부터 차량의 최종 사용까지 연료 수명 주기의 모든 단계를 고려하는 Well-to-Wheels(WTW) 분석임. (그림 1)
- GREET 모델은 바이오디젤, 에탄올, 고급 바이오연료를 포함한 다양한 바이오연료 경로와 생산 기술을 고려함. 여기에는 전통적인 발효 공정뿐만 아니라 가스화 및 열분해와 같은 첨단 기술도 포함됨. 이 모델을 통해 다양한 기술을 비교하여 가장 환경적으로 지속 가능한 옵션을 선별할 수 있음.

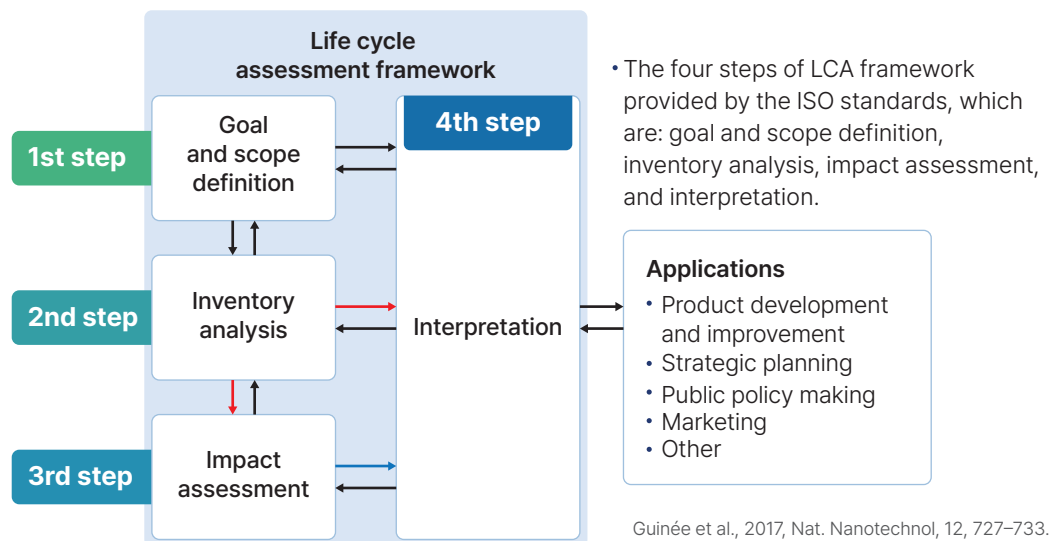


<그림1> 바이오연료 전주기 평가기술: GREET 모델

* Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation

✎ 전과정 평가(LCA) 규격동향 및 방법론

- 국제 표준화 기구(ISO)는 1993년 환경경영표준화 기술위원회(TC 207)를 설립하고 산하에 6개의 분과위원회(SC)를 구성하여 LCA, 환경라벨링, 온실가스경영 및 관련 활동 등에 대한 국제표준 제정 중이며 현재 신규 15건의 표준을 개/제정 진행 중임.
 - ISO/SC5에서는 탄소발자국 산정의 근간이 되는 제품 및 조직의 전과정에서 발생하는 환경영향을 정량화하기 위한 LCA 방법론에 대한 국제표준을 관리하고 있으며, 대표적으로 ISO 14040, 14044, 14046, 14072, 14074, 14076이 있음.
 - ISO 14040 및 14044는 전과정 평가(LCA) 수행에 대한 지침과 원칙을 제공하는 일련의 국제 표준임. 이러한 표준은 수명 주기 전반에 걸쳐 제품, 프로세스 또는 서비스의 환경적 측면과 잠재적 영향을 평가하기 위한 체계적이고 일관된 프레임워크를 제시함. ISO 14040 및 14044에 설명된 LCA 프레임워크는 목표 및 범위 정의, 전과정 목록 분석, 전과정 영향평가, 해석 등 총 네 단계로 구성되어 있으며 각 단계의 핵심 요소의 세부사항은 아래와 같음. (그림 2)
- ✓ 전과정 목록 분석: 이 단계는 수명주기 전반에 걸쳐 제품, 프로세스 또는 서비스와 관련된 입력 및 출력의 포괄적인 목록을 작성하는 작업이 포함됨. ISO 14044는 원료 추출, 에너지 소비, 배출 및 폐기물 생성에 대한 데이터 수집에 대한 지침을 제공함. 목표는 각 수명주기 단계에서 자원 사용 및 환경 방출에 대한 상세하고 정확한 설명을 작성하는 것임.
 - ✓ 전과정 영향평가: 이 단계는 영향 범주 및 특성화 모델을 사용하여 전과정 목록 분석 단계에서 식별된 잠재적인 환경 영향을 평가함. ISO 14044는 환경 방출의 결과를 평가하기 위한 체계적이고 과학적으로 건전한 접근 방식의 필요성을 강조함. 영향 범주에는 지구 온난화 가능성, 산성화, 부영양화 및 자원 고갈이 포함될 수 있음.
 - ✓ 해석: 이 단계는 정의된 목표 및 범위와 관련하여 LCA 결과를 분석하고 평가하는 작업이 포함됨. 민감도 분석과 불확실성 분석은 결과의 견고성을 탐색하는 데 권장됨. LCA 결과를 바탕으로 의미 있는 결론과 권장 사항을 도출하는 것을 목표로 함.



<그림2> ISO 14040 및 14044에 따른 전과정 평가 방법론

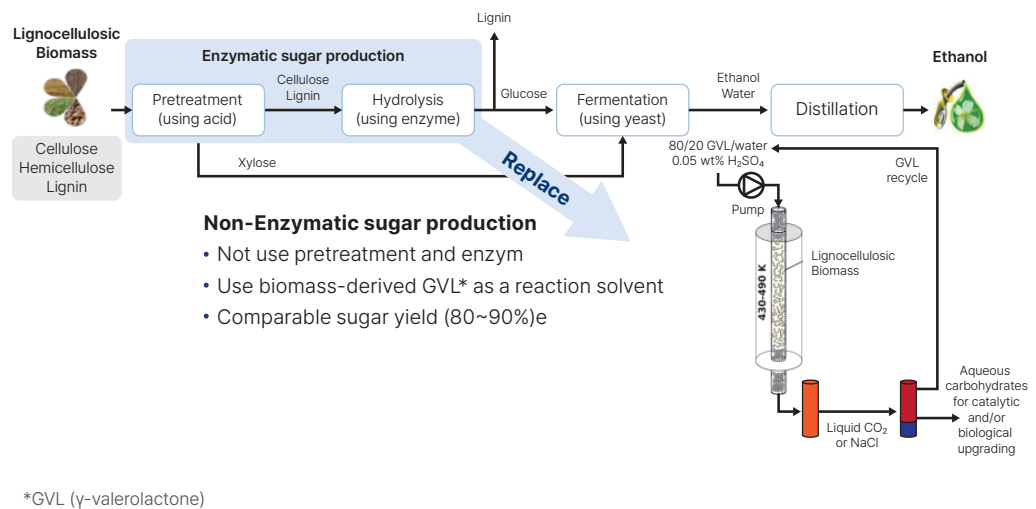
- 바이오연료와 같은 기술성숙도가 낮은 신기술에 대한 전과정평가에 수요가 증가됨에 따라 기술의 환경성 뿐만 아니라 경제성도 전과정 평가에 포함되는 것으로 ISO 14076(개발중)이 제정중에 있음. 이것은 환경·기술경제성 평가(eTEA)를 기반으로 수행을 위한 원리, 요구사항 및 가이드를 제공하는 표준임. eTEA는 생태 기술경제성 분석에서 사용된 기본 가정, 매개변수 및 방법론을 전달하기 위한 최소 요구 사항을 명시하고, 모든 규모의 공정 시스템에 적용됨.



제 3장 기술의 주요 내용

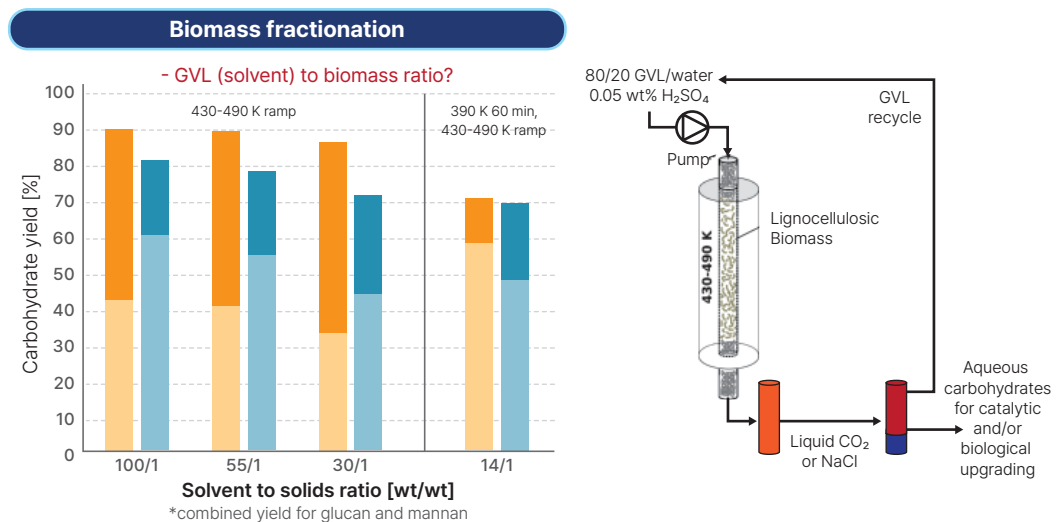
✎ 목질계 바이오매스 기반 수송연료(에탄올) 생산 기술

- 리그노셀룰로오스계 2세대 바이오매스는 곡물 기반 1세대 바이오매스와 달리 리그노셀룰로오스 바이오매스는 농업 잔여물, 임업 잔여물, 전용 에너지 작물 및 도시 고형 폐기물과 같은 광범위한 식물 재료를 포함함.²⁾ 리그노셀룰로오스 바이오매스는 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스 및 리그닌으로 구성되며, 이중 에탄올로 전환될 수 있는 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스를 당류로 전환하는 전처리 및 당화 단계가 상당히 중요함.⁴⁾ 해당 단계는 상당한 경제성과 환경성 문제를 야기함.
- 바이오매스 전처리 기술은 리그노셀룰로오스의 단단한 구조를 분해하여 후속 효소 가수분해를 위해 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스에 더 쉽게 접근할 수 있도록 만드는 것을 목표로 함. 바이오매스의 전환율을 높이기 위해 물리적, 화학적, 생물학적 접근법을 포함한 다양한 전처리 방법이 사용됨.
- 목질계 바이오매스 기반 바이오에탄올 생산에 있어 친환경적 기술 개발은 비 효소 기반 당 전환 또는 고부가가치 화학 생산을 위한 리그닌 및 증류폐액을 포함하여 부산물의 잠재적 응용 분야를 탐구하는 데에 있음.
- 미 위스콘신 매디슨 화학생물공학과 Dumesic 교수팀은 리그노셀룰로오스계 바이오매스에 대한 간단하고 비용 효과적인 비 효소 당화 및 분리 공정을 개발하고 기존 상용(효소) 공정과 비교하여 기술적, 경제적 타당성을 평가함(그림 3). 특히, 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스 유래의 반응용매인 감마발레로락톤(γ -Valerolactone, GVL)을 이용하여 바이오매스 유도체의 당화 유효성을 확인함.⁴⁾



<그림3> 목질계 바이오매스 기반 바이오에탄올 생산 공정 비교:
효소기반 당화 공정과 비효소 기반 당화 공정

- ✓ GVL 대 바이오매스 비율을 1:10에서 1:30까지 변화시키는 실험을 통해 용매 비중이 높을수록 용해도와 당화 수율이 증가하는 것이 확인되었음(그림 4). 그러나 용매 비중의 증가로 인해 후속 용매 및 당류의 분리가 어려워져 상당한 분리 비용이 발생하였음. 실험적 분석과 경제성 평가 연구를 결합하여 최적의 비율을 1:14로 결정함.
- ✓ 연구결과에 따르면 이 공정을 통해 생산된 에탄올의 경제적 가격은 GGE(Gasoline Gallon Equivalent)당 4.87달러임.⁵⁾ 기존 생물학적 경로를 통해 생산된 운송 연료(에탄올)에 비해 바이오연료의 경제성을 향상시켜 장기적으로 화석 연료(현재 미국 가격: \$3.5-3.6/GGE)를 대체하여 상용화를 가속화할 것으로 기대됨.



<그림4> 바이오매스 대비 용매 비율에 따른 당화 수율

목질계 바이오매스 기반 에탄올 생산 전주기평가 기술

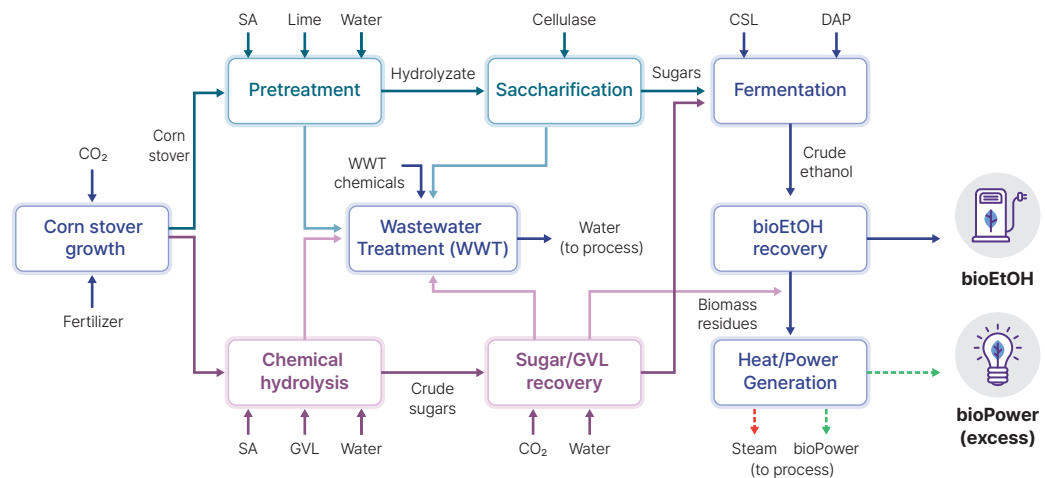
- 2021년 POSTECH 한지훈 교수 연구팀에서 발표한 논문⁶⁾에 따르면 본 기술의 목적은 목질계 바이오매스를 원료로 유용한 바이오에탄올을 생산하는 상용 규모의 공정을 개발하고, 해당 기술의 친환경성을 전주기 평가하는 것임. ISO 14040/14044 표준에 따라 해당 공정의 전주기 평가 기술은 크게 네 단계 (목표 및 범위 정의, 전과정 목록 분석, 전과정 영향평가, 해석)로 구성됨.
- ✓ 목표 및 범위 정의: 이 연구의 구체적인 목표는 미국에서 옥수수 줄기 기반 바이오에탄올 생산의 환경적 이점을 결정하는 것임. 이를 위해서는 각 바이오에탄올 전략(즉, 효소 기반 바이오에탄올 생산(P1 전략) 또는 비효소 기반 바이오에탄올 생산(P2 전략))을 사용하여 1 갤런의 가솔린(gallon of gasoline equivalent, GGE) 상당의 바이오에탄올을 생산하는 데서 발생하는 환경영향을 정량화하고 비교해야 함(LCA의 기능 단위). 시스템 경계는 WTW로 정의되었으며 옥수수 줄기는 이산화탄소 및 비료를 사용하여 광합성을 통해 성장한 것으로 가정되었음.
- ✓ 전과정 목록분석: 이 연구에서 사용된 효소 기반 바이오에탄올 생산(P1 전략)과 비효소 기반 바이오에탄올 생산(P2 전략)의 공정흐름도(Block flow diagram)는 그림 5와 같음. 전과정 목록은 각 바이오에탄올 전략에 참여하는 물질 및 에너지의 공정 흐름 데이터(표 1)를 기반으로 분석되었으며, 미국의 실사례 시나리오 기반 인벤토리 데이터를 GREET 데이터베이스를 활용해 결정되었음.⁷⁾
 - 효소 기반 바이오에탄올 생산 (P1) 전략은 옥수수 줄기의 헤미셀룰로스 성분을 황산 촉매를 사용하여 자일로스로 전환하기 위한 희석된 산 촉매 전처리 시스템을 기반으로하며(그림 5의 pretreatment), 이어서 남은 성분, 즉 셀룰로스를 셀룰라제(효소) 촉매를 사용하여 포도당으로 변환하기 위한 당화 공정을 포함함(그림 5의 saccharification).

표 1 Material and energy flow based on the functional unit (gallon of gasoline equivalent (GGE) of bioethanol (bioEtOH))⁶⁾

	Enzymatic sugar-based bioEtOH production	Nonenzymatic sugar-based bioEtOH production
Corn stover (kg)	17.792	20.768
Sulfuric acid (kg)	0.597	1.324
Cellulase (kg)	1.238	-
Corn steep liquor (CSL) (kg)	0.237	0.226
Diammonium phosphate (DAP) (kg)	0.030	-
Yeast (kg)	-	0.088
Water (gal)	8.948	2.745
WWT chemicals (kg)	0.011	0.006
Electricity* (MJ)	12.248	3.707

* Energy requirements for the two strategies were satisfied with the on-site heat and electricity generation by combustion of biomass residues (humins and lignin).

- 비효소 기반 바이오에탄올 생산(P2) 전략은 선행 처리 및 당화의 두 단계 공정 대신 간단한 화학적 가수 분해 단계(그림 5의 chemical hydrolysis)를 사용함. 매우 희석 된 산 촉매를 사용한 화학적 가수 분해는 비용이 많이 드는 효소(전체 bioEtOH 생산 비용의 15~20%를 기여)가 필요하지 않은 장점이 있지만, 가수와 GVL의 회수 추가 단계가 필요한 단점이 있음. 따라서 화학적 가수 분해 이후에는 GVL이 대부분인 용액에서 고순도의 혼합당을 회수하기 위해 혼합당/GVL 회수 시스템이 사용됨. 이 과정은 초임계유체 상태 근처의 이산화탄소를 활용해 당을 추출하는 것임(그림 5의 Sugar/GVL recovery).
- 두 전략을 통해 생산된 혼합당은 발효하여 바이오에탄올이 생산되고, 효모 촉매로 성장하기 위해 옥수수 침지액(CSL) 및 인산이암모늄(DAP)이 사용됨(그림 5의 Fermentation). 물 및 에탄올 혼합물은 증류 후 흡착을 거쳐 99.5 wt%의 고순도 바이오에탄올이 생산됨(그림 5의 bioEtOH recovery).
- 바이오에탄올 회수 시스템의 남은 고체물과 설탕 및 GVL 회수 시스템의 미증발 GVL은 보일러/터보 발전기에서 공정 열 및 전력을 생산하기 위해 연소됨 (그림 5의 Heat/Power Generation). 전처리 및 당화 시스템이나 화학적 가수 분해 및 설탕/GVL 회수 시스템에서 발생한 유기 성분이 포함된 폐수는 폐수처리 시스템으로 이송되어 화학물질을 사용하여 공정에서 재사용하기 위해 정화됨(그림 5의 Wastewater Treatment).



**<그림5> 효소 기반 바이오에탄올 생산(P1 전략)과
비효소 기반 바이오에탄올 생산(P2 전략)의 공정흐름도(Block flow diagram)**

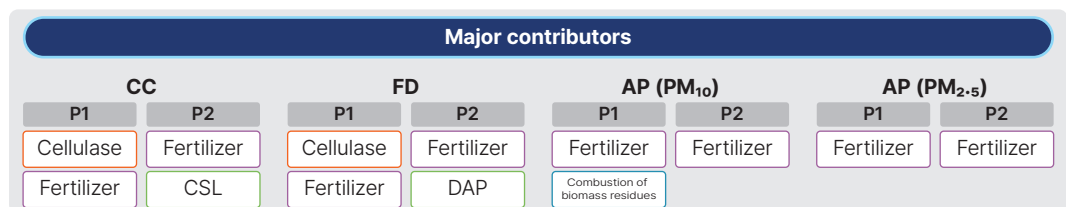
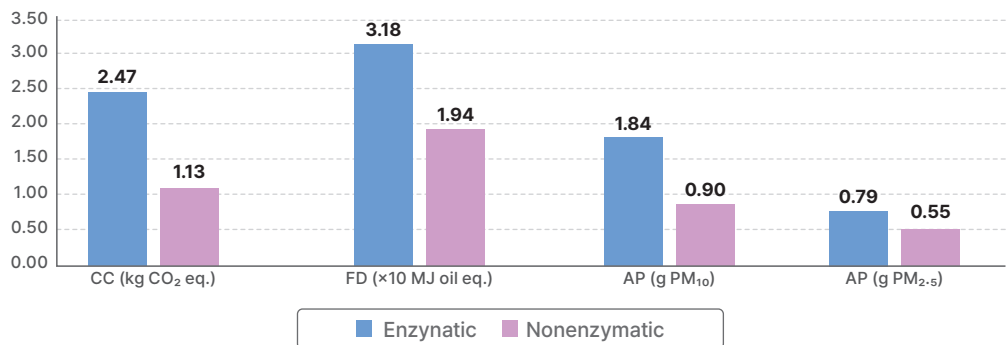
- ☑ 전과정 영향평가: 두 개의 바이오에탄올 전략의 환경 영향은 GREET 모델⁸⁾을 기반으로 평가되었음. 일반적인 수송연료와 비교하여 바이오에탄올은 온실 가스 배출(GHG-100)* 및 미립자 물질(PM2.5 및 PM10)**의 감소와 화석 에너지 고갈을 줄이는 데 상당한 잠재력을 제시함⁹⁾. 따라서 이 연구에서는 두 개의 바이오에탄올 전략이 기후변화(climate change, CC), 화석연료 고갈(fossil depletion, FD) 및 대기오염물질(air pollutant, AP) 측면에서의 영향에 대한 표준 결과를 기반으로 분석 및 비교되었음.

- 그림 6은 각 공정 단계에 대한 두 전략의 환경 영향을 비교한 것임. 기후변화 영향 측면에서

* 주어진 기간 동안(일반적으로 100년) 기후변화를 일으키는 온실가스의 양.

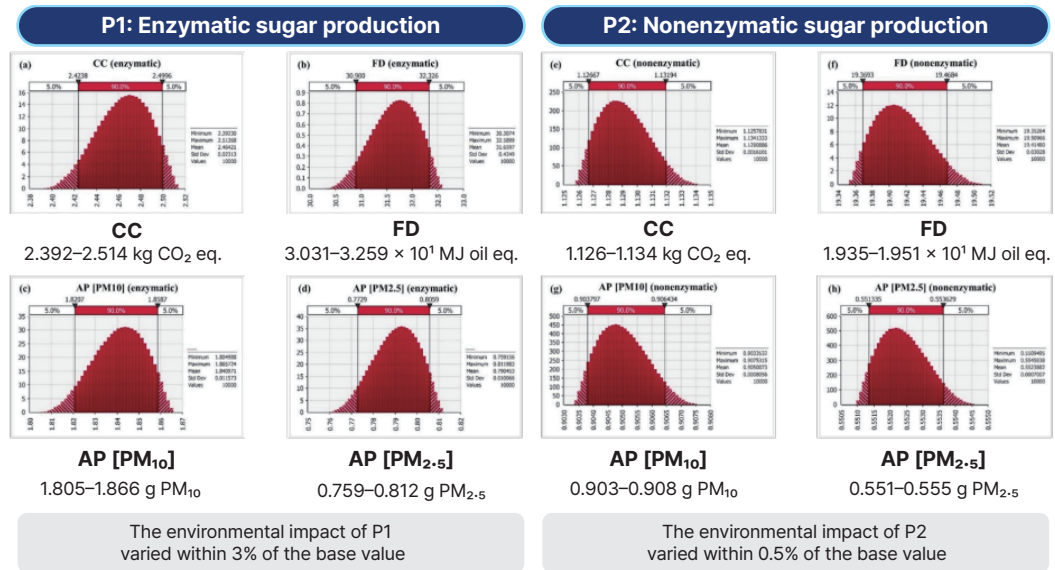
** PM은 Particulate Matter의 약자. 미세먼지 PM10은 지름이 10 μ m 이하의 먼지임. PM2.5는 지름이 2.5 μ m 이하의 먼지이며 미세분진, 초미세먼지라고 불림.

- P2 전략(1.13 kg CO_{2,eq})은 P1 전략보다 적은 온실가스를 배출함(2.47 kg CO_{2,eq}). 기후변화 영향의 주요 기여 요인은 P2 전략의 비료(0.97 kg CO_{2,eq}) 및 옥수수 침지액(0.36 kg CO_{2,eq})이며, P1 전략의 경우 셀룰라아제(2.85 kg CO_{2,eq}) 및 비료(0.83 kg CO_{2,eq})임.
- P2 전략은 화석연료 고갈 영향 측면에서 P1에 비해 화석 연료를 더 적게 소비함(1.94×10 MJ oil eq.의 절감). 화석연료 고갈 영향의 주요 기여 요인은 P2 전략의 비료 (1.83×10 MJ oil eq.) 및 인산이암모늄(0.35×10 MJ oil eq.)이며, P1 전략의 경우 셀룰라아제(3.17×10^1 MJ oil eq.) 및 비료(1.57×10^1 MJ oil eq.)임.
 - 대기오염물질 배출 측면에서 P2 전략(0.55-0.90 g PM)은 P1 전략에 비해 낮은 미세먼지를 배출함(0.79-1.84 g PM). CC 및 FD 영향 기여와 달리 셀룰라아제는 AP에 주요 기여 요인이 아니지만, 바이오매스 잔여물의 연소는 P1 전략에서 PM 10을 상당히 증가시킴. 비료도 두 전략 모두에서 AP에 대한 주요 기여자임.



**<그림6> 효소 기반 바이오에탄올 생산(P1 전략)과
비효소 기반 바이오에탄올 생산(P2 전략)의 환경영향 평가 결과**

- ☑ 환경영향 해석 및 불확실성 분석: 각 바이오에탄올 전략의 바이오매스(옥수수 줄기) 요구량의 차이로 인한 환경 영향도를 분석하기 위해 시나리오 불확실성 분석이 수행됨. 그림 7은 바이오매스(옥수수 줄기) 조성의 변동으로 인한 시나리오에서의 CC, FD 및 AP 환경 영향도를 분석한 결과임. 해당 결과는 환경 영향도의 분포와 통계 지표(범위, 평균 및 표준 편차)를 나타냄. 바이오매스 내 셀룰로오스 조성 범위를 37.4에서 57.4 wt%로 설정했을 때, 옥수수 줄기 요구량의 범위는 각각 16.068-18.732 kg(P1) 및 20.709-20.896 kg(P2)임.
- P1 전략의 경우, 환경 영향 범위는 2.392-2.514 kg CO_{2,eq}, $3.031-3.259 \times 10$ MJ oil eq, 1.805-1.866 g PM₁₀, 및 0.759-0.812 g PM_{2.5}로 나타남. P1 전략의 환경 영향은 기본값의 3% 내에서 분포하는 반면, P2 전략의 환경 영향은 기본값의 0.5% 내에서 형성됨. P2 전략의 환경 영향 범위는 1.126-1.134 kg CO_{2,eq}, $1.935-1.951 \times 10$ MJ oil eq, 0.903-0.908 g PM₁₀, 및 0.551-0.555 g PM_{2.5}로 나타남. P2 전략이 P1 전략보다 바이오매스(옥수수 줄기) 조성에 덜 민감하다는 것으로 분석됨.



<그림7> 효소 기반 바이오에탄올 생산(P1 전략)과
비효소 기반 바이오에탄올 생산(P2 전략)의 불확실성 분석 및 환경영향 분포

제 4장 결론

- 전주기 평가(LCA)는 기술 또는 제품에 대한 주요 생애 전주기 단계(원료채취부터 폐기단계까지)의 잠재적 환경적 영향을 평가하기 위한 프레임워크 또는 도구임. 바이오연료 관점에서, 주요 생애 주기 단계는 바이오매스 생산, 바이오연료 전환, 바이오연료 수송, 바이오연료 사용 및 폐기하는 것이 포함됨. 본 보고서에서 제 2장 기술 동향 파트는 ISO 14040 및 14044를 따른 LCA 방법론의 핵심 개념을 간략하게 요약하고, 세부 방법론의 주요 단계인 1) 목표 및 범위 정의, 2) 전 과정 목록 분석, 3) 전 과정 영향 평가, 4) 전 과정 결과 해석을 다루었음.
- 본 보고서의 제 3장 기술의 주요 내용 파트는 목질계 바이오매스에서 바이오에탄올을 생산하기 위한 다른 두 기술인 효소 가수분해 후 발효 (P1)와 비효소 화학적 촉매 가수분해 후 발효(P2)의 전주기 평가 사례를 소개함. 특히, 해당 두 기술의 주요 세 가지 환경 영향 범주인 기후 변화, 화석 연료 고갈 및 초/미세먼지 배출에 대한 미국 내 실사례 시나리오 기반 전주기 평가 결과를 제시함.
- 결론적으로, 비효소 기반 바이오에탄올 생산은 효소 기반 바이오에탄올 생산보다 낮은 환경 영향도를 보임. 또한, 시나리오 기반 불확실성 분석 결과, 비효소 기반 바이오에탄올 생산 전략은 바이오매스(옥수수대) 조성의 불확실성을 고려할 때 더 환경적으로 실현 가능한 옵션이라는 것을 보여줌.
- 본 보고서에서 제시된 LCA 방법론 및 바이오연료 분야 유망 기술의 상세한 분석을 바탕으로, 실험실 수준에서 활발히 개발되고 있는 다양한 연료¹⁰⁾, 플라스틱¹¹⁾, 신소재¹²⁾ 등 신 기술의 전산 시뮬레이션을 통한 실용화 가능성을 다양한 측면에서 검증이 가능할 것으로 기대됨.

제 5장 참고문헌

- 1) 윤영만, 국내 바이오매스이용 실태와 활성화 방안. 2014: p. 73.
- 2) 이진원, 박창훈, 바이오에너지의 종류와 생산방법. News & Information for Chemical Engineers, 2011. 29(4): p. 493-499.
- 3) Renewable Fuel Standards(RFS) : Overview and Issues(Congressional Research Service, 2013.3.)
- 4) Luterbacher, J.S., et al., Nonenzymatic sugar production from biomass using biomass-derived γ -valerolactone. Science, 2014. 343(6168): p. 277-280.
- 5) Byun, J. and J. Han, Sustainable development of biorefineries: integrated assessment method for co-production pathways. Energy & Environmental Science, 2020.
- 6) Byun, J. and J. Han, Environmental analysis of bioethanol production strategies from corn stover via enzymatic and nonenzymatic sugar production. Bioresource Technology, 2021. 328(124808).
- 7) Wang, M., 1999. GREET 1.5-transportation fuel-cycle model-Vol. 2: appendices of data and results. Argonne National Lab., IL (US).
- 8) Wang, M.Q. 1999. GREET 1.5-transportation fuel-cycle model-Vol. 1: methodology, development, use, and results. Argonne National Lab., IL (US).
- 9) Wang, M., Han, J., Dunn, J.B., Cai, H., Elgowainy, A., Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for US use. Environ. Res. Lett. 2012. 7 (4), 045905.
- 10) Han, J., et al., A strategy for the simultaneous catalytic conversion of hemicellulose and cellulose from lignocellulosic biomass to liquid transportation fuels. Green Chemistry, 2014. 16(2): p. 653-661.
- 11) Byun, J. and J. Han, An integrated strategy for catalytic co-production of jet fuel range alkenes, tetrahydrofurfuryl alcohol, and 1, 2-pentanediol from lignocellulosic biomass. Green Chemistry, 2017. 19(21): p. 5214-5229.
- 12) Kim, H.J., et al., Integrated system comprising electrocatalysis device of glycerol and chemical catalysis device of biomass. 2020, Google Patents.

(기술·연구·표준) 동향

전주기평가(LCA) 개론 및 바이오연료 적용 사례



한양대학교



본 이슈 리포트는 산업통상자원부의 국가 표준 기술력 향상 사업인 '수송 및 발전 분야의 바이오연료 보급 활성화 기반 조성' 과제의 수행 일환으로 제작되었습니다.