

ISSN 2733-9696(온라인)
ISSN 2733-9572(인쇄본)

2022
Vol.3 No.11



GTC BRIEF

바이오에너지 전과정평가 방법론 현황 분석

김지예 / 이종석 / 임윤진 / 오상진

바이오에너지 전과정평가 방법론 현황 분석

김지예 / 기술총괄부 imkgy5@gtck.re.kr
 이종석 / 기술총괄부 jslee@gtck.re.kr
 임윤진 / 기술총괄부 yoonjinim@gtck.re.kr
 오상진 / 기술총괄부 rurouni628@gtck.re.kr

하이라이트

- 바이오에너지 전과정평가 (Life Cycle Assessment; LCA) 는 일반적으로 온실가스 배출량을 화석연료와 비교하려는 목적으로 수행되며, 원료채취부터 폐기단계까지(Cradle to grave) 경계에서의 기능단위는 열 생산 (kgCO₂-eq/kWhheat), 전기 생산(kgCO₂-eq/kWh전기) 또는 운송(kgCO₂-eq/km)으로 정의하는 것을 제안
- 시스템경계는 Cradle to grave로 설정하는 것이 적절하며, 할당을 피할 수 있도록 시스템을 확장하는 것을 권장하나, 할당을 피할 수 없는 경우 에너지 함량에 따른 할당 방법을 권고
- 직접 토지 이용 변화의 경우 실제 값 또는 표준값(IPCC 방법론)을 활용하여 반영하고, 간접 토지 이용 변화의 경우 향후 국제 통용 방법론 개발 시 반영 필요

키워드

- 바이오에너지(Bioenergy), 전과정평가(Life Cycle Assessment), 온실가스 배출량(Green House Gas Emission), 시스템경계(System Boundary), 기능단위(Functional Unit), 할당(Allocation), 토지이용변화(Land Use Change)

개요

- 화석연료의 대체재로 바이오에너지의 사용이 증가함에 따라 전과정의 관점에서 온실가스 배출량을 정량화하고 화석연료와 비교하여 바이오에너지의 효과성을 평가하는 것이 중요
- 국제표준화기구(International Organization for Standardization; ISO)에서 LCA 방법론에 대한 국제표준을 제정 및 관리하고 있으며, LCA 수행 지침 관련 대표적인 표준으로 ISO 14040, 14044가 있음¹⁾
 - ISO 14040은 LCA 원리 및 구조를 규정한 표준으로, LCA 수행의 4가지 단계*를 표준화하고 단계별 원리 및 구조 규정
 - * LCA 수행의 4단계: 목적 및 범위 정의, 전과정 목록분석, 전과정 영향평가, 해석
 - ISO14044는 LCA 4단계에 대해 단계별 요구사항 및 수행 시 지침 제시
- ISO 지침을 기반으로 다양한 세부 방법론이 국가별 LCA 가이드라인(표1) 및 연구 문헌 등에서 제시·활용됨

1) 아시아-태평양 경제협력기구, Life Cycle Assessment-ISO 14040 시리즈 실무 지침, 2004.

표 1 바이오에너지 LCA 가이드라인 종류

문헌	발행정보
EU 신재생에너지 지침	EU, 2018
Life Cycle Assessment(LCA) of Bioenergy Products and Projects	Australian Renewable Energy Agency (ARENA), 2016
Using a Life Cycle Assessment Approach to Estimate the Net Greenhouse Gas Emissions of Bioenergy	International Energy Agency(IEA) Bioenergy, 2011

- 바이오에너지 LCA의 주목적은 바이오에너지의 온실가스 배출량 등의 환경적 영향을 화석연료와 비교하는 것으로, 이를 통해 특정 바이오에너지의 전과정에서 환경적으로 이슈가 되는 부분을 규명하고 그에 대한 개선 방안 및 정책적 의사 결정 방향을 제시
- 바이오에너지 LCA 수행 시 시스템경계 설정, 기능단위, 할당, 토지이용변화 고려방법 등 단계별로 방법론을 선택해야 하는 사항들이 있으며 선택에 따라 결과가 매우 달라질 수 있으나 가이드라인별로 방법론이 산재되어 있는 실정
 - 특히, Miguel Brandao et. al.(2022)²⁾에 따르면 산재되어 있는 바이오에너지 LCA 가이드라인별로 제시되어 있는 방법론이 서로 상충되어 이해관계자들에게 일관성없는 정보를 제공하고 있음을 문제로 제시
- 따라서 본 브리프에서는 일반 제품과 다르게 바이오에너지 분야의 특수성이 있는 시스템경계, 기능단위, 할당, 토지이용변화 고려방법 위주로 바이오에너지 LCA 가이드라인에 제시된 방법론 현황을 조사·분석하여 일관성 있는 방법론을 제시함으로써 국제적으로 통용될 수 있는 바이오에너지 LCA 방법론의 기반을 구축하고자 함

시스템경계

시스템경계의 정의

- LCA에서 시스템경계 설정은 분석하고자 하는 대상의 범위를 결정하는 것으로, 분석하고자 하는 단위공정 및 전과정 단계의 집합으로 정의 할 수 있음
- 시스템경계는 비교 대상과 기준 시스템에서 모든 수명 주기 단계, 에너지 사용, 물질 흐름 및 온실가스 배출을 포함해야 하며, 유효한 비교를 위해 동일한 자원으로 시작하여 동일한 에너지 서비스를 제공하도록 경계를 설정해야 함
- 일반적으로 시스템경계는 제품 및 서비스의 전과정을 고려할 수 있도록 원료채취, 제조, 운송, 사용, 폐기단계까지를 모두 포함하는 것으로 하나 제품 및 서비스 특성을 고려하여 별도로 정의 할 수 있음
 - Cradle to gate는 원료채취부터 제품생산 후 출하 직전까지의 공정만을 고려하는 것을 의미하며, 일반적으로 하위공정을 추적하기 힘든 B2B 기업 제품 분석 시 활용하고 있음

2) Miguel, B., Tomas, E., Sofia, P., Kristin, J., Johan, N., Pavinee, N., Anna, W., Tomas, R., RED, PEF, and EPD: Conflicting rules for determining the carbon footprint of biofuels give unclear signals to fuel producers and customers, *Frontiers in Climate*, 2022.

- Cradle to grave는 원료채취부터 제품의 폐기단계까지의 모든 공정을 고려하는 것을 의미하며, 일반적으로 하위공정까지 추적할 수 있는 B2C 기업 제품 분석 시 활용하고 있음
 - ※ 수송 연료에 대한 시스템경계 설정 시에는 Cradle to gate는 Well to tank, Cradle to grave는 Well to wheel로 표현함
- Azapagic A. and Stichnothe H.(2011)에 따르면 바이오연료(에너지)의 경우 사용(연소) 후 별도의 폐기단계가 없으므로 일반제품과 다르게 시스템경계를 정의 할 수 있음을 명시(표2)³⁾

표 2 일반제품 및 바이오에너지 시스템경계 정의 차이점

시스템경계	Cradle to gate	Cradle to grave
일반제품	원료채취부터 제품 출하까지로 정의	원료채취부터 제품생산, 사용, 폐기까지로 정의
바이오에너지	원료(바이오매스)채취부터 바이오에너지 제품 (바이오디젤, 고행연료 등) 생산까지로 정의	원료(바이오매스)채취 부터 바이오에너지 제품으로 생산되는 전기, 열, 수송연료까지로 정의

출처: Azapagic A. and Stichnothe H.(2011) 바탕으로 저자 작성

바이오에너지 LCA를 위한 시스템경계 설정 현황

- EU 신재생에너지 지침에서는 바이오에너지의 탄소발자국 산정 시 별도의 산정 식을 제시하고 있으며, 이때 필수적으로 바이오연료 사용(Cradle to grave)으로부터 발생하는 온실가스를 산정하도록 규정하고 있음⁴⁾
 - 다만, 바이오연료 사용으로부터 발생하는 온실가스는 열, 전력, 운송연료 전환효율*만 고려하여 산정
 - * 열, 전력: 바이오연료 투입 설비 효율, 운송연료: 바이오연료 투입 차량 연비
- ARENA 가이드라인에서는 바이오에너지 LCA 수행 시 시스템경계는 Cradle to grave를 권고하고 있으나 기술성숙도가 낮아 에너지 전환에 관한 데이터 부재 시 Cradle to gate까지 수행하는 것을 허용하고 있음⁵⁾
- LCA를 기반으로 바이오에너지의 온실가스 배출량을 산정한 IEA 보고서의 경우에도 Cradle to grave 로 시스템경계를 설정하여 바이오에너지 및 화석연료 기반의 전력, 열, 수송연료 탄소발자국을 비교·산정함⁶⁾
- Jeswani, H. et al.(2020)에 따르면 검토된 바이오에너지 LCA 연구의 약 절반(48%)만 Cradle to grave 시스템경계를 사용하였음⁷⁾

3) Azapagic, A and Stichnothe, H., Life cycle sustainability assessment of biofuels, Handbook of Biofuels Production, 2011

4) European Union, DIRECTIVE (EU) 2018/2001 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources, 2018

5) Australian Renewable Energy Agency, Life Cycle Assessment(LCA) of Bioenergy Products and Projects, 2016

6) IEA Bioenergy, Using a Life Cycle Assessment Approach to Estimate the Net Greenhouse Gas Emissions of Bioenergy, 2011

7) Jeswani, H., Chilvers, A., and Azapagic, A., Environmental sustainability of biofuels: a review, Proceedings of the Royal Society A, 2020

- 다만, 연료의 연소 성능 및 관련 배출량이 바이오연료와 화석연료에서 크게 다를 수 있기 때문에 연료 사용을 시스템경계에 포함하는 것이 중요하여 Cradle to gate 보다는 Cradle to grave 시스템경계가 더 적절하다고 언급

표 3 바이오에너지 LCA 가이드라인 및 문헌에서 제시한 시스템경계

문헌	주요내용
EU 신재생에너지 지침	바이오에너지 탄소발자국 산정 시 Grave(사용단계)까지 산정하도록 규정
ARENA	Cradle to grave까지 수행하는 것을 권고
IEA 보고서	석유기반 에너지 및 바이오에너지 시스템경계를 Cradle to grave로 정의하여 비교분석을 진행
Jeswani, H., et al. (2020)	연료의 연소에 따른 배출량이 바이오 및 화석연료에서 크게 다를 수 있으므로 Cradle to grave로 수행하는 것이 중요함을 언급

기능단위

기능단위의 정의

- LCA에서 '기능단위'는 평가하고자 하는 제품 또는 서비스에 대해 정의한 기능을 정량적으로 나타내는 단위로, 온실가스 배출량 산정 결과는 기능단위 당 CO₂-eq 배출량으로 표현
- 시스템경계의 설정에 따라 기능단위가 정의되면 LCA 결과비교가 가능해지며 특히 기존 및 신기술에 대하여 비교하여 환경성에 대한 우위를 제시하고자 할 경우 두 시스템의 기능단위는 동일해야 함
- 설정하는 기능단위에 따라 결과값이 상이할 수 있으므로 LCA 수행 시 중점적으로 고려 필요

바이오에너지 LCA를 위한 기능단위 설정 현황

- EU 신재생에너지 지침의 부속서 III 및 V에서는 바이오매스 중량별 에너지함량 (MJ/kg), 부피별 에너지 함량 (MJ/L), 에너지당 온실가스 배출량 (gCO₂-eq/MJ)을 기능단위로 사용함⁴⁾
- ARENA 가이드라인에서는 생산된 연료의 에너지 전환(열, 전기, 수송)을 기능단위로 사용하나, 에너지 전환에 대한 데이터를 얻을 수 없는 경우 생산된 연료의 에너지 함량(MJ)과 같은 단위를 사용할 것으로 제시⁵⁾
- IEA 보고서에서는 바이오에너지의 기능단위를 열 생산 (kgCO₂-eq/kWh_{heat}), 전기 생산(kgCO₂-eq/kWh_{전기}) 또는 운송(kgCO₂-eq/km) 시 온실가스 배출량을 기준으로 정의⁶⁾
 - IEA의 경우 다른 문헌들과 다르게 에너지 단위를 기준으로 하는 것은 부가적인 요인들(예를 들어, 내연 기관이 가솔린에 적합하게 설계되어 동일한 에너지의 바이오연료보다 가솔린의 운송거리가 더 긴 점 등)을 고려하지 못하기 때문에 적절한 기능단위가 아닌 것으로 설명
- Pereira et al. (2019)는 GREET, GHGenius, BioGrace, VSB와 같은 기존 바이오연료 전과정 온실가스 산정 시뮬레이터 모델을 비교한 결과 온실가스 산정 시 사용된 기능단위는 4개 시뮬레이터에서 공통적으로 에너지(MJ)를 기능단위로 사용하고 있는 것을 확인⁸⁾

8) Pereira, L.G., Cavalett, O., Bonomi, A., Zhang, Y., Warner, E., Chum, H.L., Comparison of biofuel life-cycle GHG emissions assessment tools: The case studies of ethanol produced from sugarcane, corn, and wheat, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019

- 다만 GREET, GHGenius에서는 수송용 연료일 경우 이동거리(km)를 기능단위로 사용

표 4 바이오에너지 LCA 기능단위 비교

문헌	주요내용
EU 신재생에너지 지침	<ul style="list-style-type: none"> • 바이오매스 중량 또는 부피당 바이오연료의 에너지 함량(MJ/kg, MJ/L) • 에너지당 온실가스 배출량(gCO₂-eq/MJ)
ARENA 가이드라인	<ul style="list-style-type: none"> • 생산된 연료의 에너지 전환(열, 전기, 수송) • 에너지 전환 데이터 없는 경우 : 생산된 연료의 에너지 함량(MJ)
IEA 보고서	<ul style="list-style-type: none"> • 열 생산, 전기 생산 또는 운송 시 발생하는 이산화탄소량
시뮬레이터 모델 (GREET, GHGenius, BioGrace, VSB)	<ul style="list-style-type: none"> • 에너지(MJ)를 기능단위로 사용 • 수송용 연료일 경우 이동거리(km)를 기능단위로 사용(GREET, GHGenius 모델)

할당

할당의 정의

- LCA 연구에서 할당은 일반적으로 제품시스템에서 두 가지 이상의 산출물이 발생하는 경우 대상제품이 아닌 다른 제품(부산물 등)으로 인한 환경부하를 제품시스템에서 제외함으로써 대상제품의 환경부하를 보다 적절하게 정량화하는 것을 의미
 - 예컨대, 단위공정에서 바이오디젤과 글리세린이 동시에 생산될 경우, 바이오디젤에 대한 LCA 수행 시 모든 공정의 환경부하를 바이오디젤과 글리세린에 적절한 기준을 통해 분배하게 됨
- ISO 14040 및 14044 표준에서는 가능하면 공정을 세분화하거나 시스템 확장을 통해 할당을 피해야 한다고 권장하고 있으나, 각 제품별 결과값을 제시하기 위해서 할당은 필수 불가결한 요소임⁹⁾
- 할당을 피할 수 없는 경우 물리적 또는 경제적 관계에 기반한 할당 요소를 사용하여 제품과 부산물 간에 환경부하를 할당할 수 있으며, 물리적인 관계(질량, 부피, 에너지 등), 경제적인 가치 등으로 할당 기준 선택

표 5 ISO 14044 및 14067에서 제시하고 있는 할당 우선순위

단계	주요 내용
1단계	1) 할당 해야하는 단위공정을 두 개 또는 그 이상의 하위공정으로 분리하고, 이러한 하위공정과 관련된 투입물 및 산출물 데이터 수집 2) 부산물과 관련된 추가 기능을 포함하도록 제품 시스템 확장
2단계	시스템의 투입물 및 산출물의 서로 다른 제품 또는 기능 간 기본 물리적 관계(예. 질량, 에너지함량, Carbon contents 등)를 반영하는 방법
3단계	물리적 관계만으로 할당이 불가능할 경우, 투입량은 제품과 기능 간에 서로 다른 관계(예. 경제적 가치)를 반영하는 방법으로 할당되어야 함

출처: ISO 14044¹⁰⁾ 및 14067¹¹⁾ 내용 바탕으로 저자 작성

9) Vera, I., Hoefnagels, R., Kooij, A., Moretti, C., Junginger, M., A carbon footprint assessment of multi-output biorefineries with international biomass supply: a case study for the Netherlands, *Biorefining, Bioproducts and Biorefining*, 2019

10) ISO 14044:2006/Amd 2:2020, Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines-Amendment 2

11) ISO 14067:2018, Greenhouse gases-Carbon footprint of products-Requirements and guidelines for quantification

- 다만, ISO 14067에서도 제품 및 기술군별 별도의 제품범주규칙(Product Category Rule, 이하 PCR)이 존재하는 경우 이를 활용 할 수 있다고 명시¹¹⁾
 - 실제로 대표적인 화학업체인 BASF의 경우 PCR이 존재하면 우선적으로 해당 PCR에 따라 할당하고 있으나, 부재 시 두 가지 산출물 간의 시장가격이 크게 차이 날 경우에는 경제적 가치에 따라 할당을 진행하고 있음

바이오에너지 LCA 시 할당방법론 현황

- 바이오에너지 LCA 연구에서 할당이 필요한 상황은 크게 바이오매스 생산과정 및 바이오연료 생산과정 2가지로 구분할 수 있으며 할당방법에 있어서는 많은 논란이 존재함
- 바이오매스 생산과정에서 발생하는 부산물(예. 볏짚, 왕겨 등)을 바이오에너지 생산 시 활용하지 않는다면 할당 대상이 아니지만, 바이오에너지 원료로 사용될 경우 할당 대상에 포함할 것인지에 대한 논란이 있음
 - S. Prasad, et al.(2020)에 따르면 탄소함유량, 생산량, 경제적가치 순으로 할당 기준을 선택하는 것이 합리적이라고 제시하고 있으나,¹²⁾ EU 신재생에너지 지침 부속서 V-Part C-Point 18과 부속서 VI-Part B-Point 18에서는 임업부산물, 농업부산물, 가축분뇨 및 유기성 폐기물 생산단계까지의 탄소배출량을 '0'으로 가정할 것을 명시함⁴⁾
- 바이오에너지 생산과정에서 부산물(예. 바이오디젤 생산 시 글리세린 부산물) 발생 시 할당을 해야하지만 국제적으로 바이오에너지 LCA 분야에서 통용되고 있는 방법론은 부재한 상황임
 - Cherubini, F. and Stromman, A.H.(2011)에 따르면, 생산량 25%, 에너지 함량 44%, 경제적가치 31%로 바이오에너지 생산과정에서 할당을 진행¹³⁾
 - EU 신재생에너지 지침 116항에 따르면 바이오에너지 생산 부산물 발생 시 에너지 함량을 기반으로 할당을 하도록 규정하고 있으며, 부속서에 산정식을 제시하고 있음⁴⁾
 - 하지만 Liu et al.(2018) 에 따르면 3가지 할당방법 모두 단점을 가지고 있으므로 EU 신재생에너지 지침에서 권고하고 있는 할당방법뿐만 아니라 여러 방법을 적용하여 민감도 분석이 필요함을 강조(표6)¹⁴⁾

표 6 바이오에너지 LCA 수행 시 할당방법별 장단점(Liu et al.(2018))

구분	생산량(Weight)	에너지 함량(Energy contents)	경제적 가치(Economic value)
장점	물리적관계를 직관적으로 나타냄	바이오에너지 분야에서 환경부하 분배를 위한 가장 정확한 방법으로 EU 신재생 에너지 지침에서도 권고하고 있음	제품/부산물의 시장 수요를 반영할 수 있다는 점에서 합리적
단점	제품/부산물 간 환경부하 배분이 동일	생산되는 부산물이 Energy carrier가 아닐 경우 할당 불가	시장가격은 연도, 시장상황 등 다양한 변수로 인한 변동성이 큼(일관성의 부재)

출처: Liu et al.(2018) 바탕으로 저자 작성

12) Prasad, S., Singh, A., Korres, N.E., Rathore, D., Sevda, S., Pant, D., Sustainable utilization of crop residues for energy generation: A life cycle assessment (LCA) perspective, *Bioresource Technology*, 2020
 13) Cherubini, F. and Stromman, A.H., Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges, *Bioresource Technology*, 2011
 14) Liu, H., Huang Y., Yuan H., Yin X., Wu C., Life cycle assessment of biofuels in China: Status and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018

토지이용변화의 정의

- 토양이나 식물에 탄소 축적량이 많은 토지가 바이오원료 재배를 위해 전환되면 저장된 탄소의 일부가 대기로 방출되어 바이오 연료 사용으로 나타나는 온실가스 저감 효과를 상쇄할 수 있어 토지이용변화에 대한 고려 필요
- 바이오 연료와 관련된 토지이용변화는 직접토지이용변화 또는 간접토지이용변화의 두 가지 방식으로 발생
 - 직접토지이용변화는 바이오매스를 생산하기 위해 기존에 사용하던 토지의 용도를 변경하는 것으로 LCA의 시스템경계 내에 포함
 - 간접토지이용변화는 기존에 사용하던 토지 용도(예: 식량 생산)에서 현재 바이오매스 생산으로 용도가 변경된 것으로 인해 시스템경계 외부에서 발생하는 토지 이용의 변화를 나타냄
 - 예를 들어, 농부 A가 밀 재배에서 바이오 원료인 스위치그래스 재배로 전환한 것은 직접토지이용변화의 예이며, 이로 인해 밀 공급이 감소하고 밀 가격을 상승시켜 농부 B가 농부 A의 행동의 결과로 자신의 목초지를 밀 경작으로 전환한다면 간접토지이용변화를 초래하게 됨⁶⁾

바이오에너지 LCA 시 토지이용변화에 따른 배출량 산정 현황

- ISO 14067에서 탄소발자국 산정 시 직접토지이용변화는 필수(Shall)적으로 고려할 요소로 규정하고 있으며, 간접토지이용변화의 경우 권고(Should) 사항으로 제시하고 있음
 - 직접토지이용변화는 IPCC 가이드라인을 따르도록 하나, 간접토지이용변화는 국제적으로 통용되는 방법론이 개발될 경우 ISO 표준을 마련할 것으로 제시
 - IPCC 방법론은 바이오 원료 생산 이전의 토지 사용에서 바이오 원료 생산 이후의 기본 탄소 저장량의 변화를 조사하고 이를 20년에 걸쳐 상각하는 방식으로 계산
- EU 신재생에너지 지침에서는 토지 이용 변화 전후의 탄소 축적량에 대한 실제 값 또는 표준값(IPCC 방법론)을 사용하도록 제시 (조항 115)⁴⁾
- ARENA 가이드라인에서는 직접토지이용변화의 이산화탄소 배출량은 IPCC 방법론을 기반으로 토지 사용에 대해 계산하여야 하지만, 간접토지이용변화의 온실가스 영향에 대한 정량적 평가는 상당한 불확실성이 있으며 계산 방법에 대한 명확한 합의가 없는 것으로 설명⁵⁾
- IEA 보고서에서는 간접토지이용변화를 식별하여 정량화하는 것이 어렵기 때문에 바이오에너지 생산 시 폐기물을 원료로 사용하거나 농업생산이 아닌 토지를 사용하는 등 간접토지이용변화를 최소화하는 방안을 제시함⁶⁾
 - 경제적 상호작용의 맥락에서 바이오에너지 시스템을 분석하거나 바이오에너지 생산 및 사용을 증가시키는 정책/기타 이니셔티브의 효과를 분석하는 등 소위 결과적 LCA에서는 간접토지이용변화의 계산을 시도하는 경우도 있는 것으로 언급

- LCA 수행 시 활용되는 데이터베이스(Life Cycle Inventory DataBase; LCI DB) 의 경우 대부분 직접토지이용변화는 IPCC 지침 등을 활용하여 산정하나, 간접토지이용변화는 고려하지 않음 (표7)¹⁵⁾

표 7 LCI DB별 토지이용변화 고려 현황

데이터베이스 종류	직접토지이용변화	간접토지이용변화
GaBi database	IPCC 지침에 따라 산정	고려하지 않음
GREET	IPCC 기준 및 위성 지도 활용하여 산정	고려하지 않음
International Reference Life Cycle Data System(ILCD)	IPCC 지침에 따라 산정	세부 모델링에는 포함시키기도 하나, 제품 레벨 LCA에서는 고려하지 않음
French Environmental Footprint(BPX 30-323)	IPCC 지침에 따라 산정	국제적으로 통용되는 방법론이 생길 경우 고려할 예정

출처: European Commission Joint Research Center(2010) 바탕으로 저자 작성

결론

- 바이오에너지 분야의 LCA는 주로 화석연료와 비교하여 에너지 생산 및 사용의 전과정에서 온실가스 배출량을 평가하고 이를 정책적 의사 결정 시 활용하는 목적으로 수행됨
- 시스템경계는 연료 연소에 따른 배출량이 바이오 및 화석연료에서 크게 다를 수 있으므로 Cradle to grave로 설정하는 것이 적절함
- 대상 바이오에너지 시스템과 기준 시스템을 비교할 때 Cradle to grave 경계에서의 기능단위는 열 생산(kgCO₂-eq/kWh_{heat}), 전기 생산(kgCO₂-eq/kWh_{전기}) 또는 운송(kgCO₂-eq/km)으로 정의하는 것을 권장
- 할당을 피할 수 없는 경우 물리적인 관계(질량, 부피, 에너지 등), 경제적인 가치 등의 순서로 할당 기준을 선택하는 것을 권고하며, 바이오에너지 분야에서는 주로 에너지 함량에 따른 할당 방법을 사용하는 것이 적절함
- 토지이용변화는 직접토지이용변화의 경우 실제 값 또는 표준값(IPCC 방법론)을 활용하여 계산하고, 간접토지이용변화의 경우 인과관계를 규명하고 정량화하는 것이 불가능하여 대부분 고려하지 않으므로 직접토지이용변화에 초점을 두고 고려하되 향후 간접토지이용변화에 대한 국제 통용 방법론 개발 시 반영 필요
 - ISO 14067에서도 탄소발자국 산정 시 직접토지이용변화는 필수(Shall)적으로 고려할 요소로 규정하고 있으며, 간접토지이용변화의 경우 권고(Should) 사항으로 제시
- 바이오에너지 LCA 수행 시 비교군 간 동등한 비교를 위해 본 브리프에서 제안하고 있는 시스템경계 설정, 기능단위, 할당방법, 토지이용변화 계산 방법에 따라 수행하는 것을 제안함

15) European Commission Joint Research Center, Analysis of Existing Environmental Footprint Methodologies for Products and Organizations: Recommendations, Rationale, and Alignment, 2010.

Reference

- 1) 아시아·태평양 경제협력기구, Life Cycle Assessment-ISO 14040 시리즈 실무 지침, 2004
- 2) Miguel, B., Tomas, E., Sofia, P., Kristin, J., Johan, N., Pavinee, N., Anna, W., Tomas, R., RED, PEF, and EPD: Conflicting rules for determining the carbon footprint of biofuels give unclear signals to fuel producers and customers, *Frontiers in Climate*, 2022
- 3) Azapagic, A and Stichnothe, H., Life cycle sustainability assessment of biofuels, *Handbook of Biofuels Production*, 2011
- 4) European Union, DIRECTIVE (EU) 2018/2001 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources, 2018
- 5) Australian Renewable Energy Agency, Life Cycle Assessment(LCA) of Bioenergy Products and Projects, 2016
- 6) IEA Bioenergy, Using a Life Cycle Assessment Approach to Estimate the Net Greenhouse Gas Emissions of Bioenergy, 2011
- 7) Jeswani, H., Chilvers, A., and Azapagic, A., Environmental sustainability of biofuels: a review, *Proceedings of the Royal Society A*, 2020
- 8) Pereira, L.G., Cavalett, O., Bonomi, A., Zhang, Y., Warner, E., Chum, H.L., Comparison of biofuel life-cycle GHG emissions assessment tools: The case studies of ethanol produced from sugarcane, corn, and wheat, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019
- 9) Vera, I., Hoefnagels, R., Kooij, A., Moretti, C., Junginger, M., A carbon footprint assessment of multi-output biorefineries with international biomass supply: a case study for the Netherlands, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2019
- 10) ISO 14044:2006/Amd 2:2020, Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines-Amendment 2
- 11) ISO 14067:2018, Greenhouse gases-Carbon footprint of products-Requirements and guidelines for quantification
- 12) Prasad, S., Singh, A., Korres, N.E., Rathore, D., Sevda, S., Pant, D., Sustainable utilization of crop residues for energy generation: A life cycle assessment (LCA) perspective, *Bioresource Technology*, 2020
- 13) Cherubini, F., Stromman A. H., Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges, *Bioresource Technology*, 2010
- 14) Liu, H., Huang Y., Yuan H., Yin X., Wu C., Life cycle assessment of biofuels in China: Status and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018
- 15) European Commission Joint Research Center, Analysis of Existing Environmental Footprint Methodologies for Products and Organizations: Recommendations, Rationale, and Alignment, 2010

본 내용은 녹색기술센터(GTC)의 주요사업(오상진, 이종석, 김지예, 임윤진 「탈탄소사회 구현을 위한 탄소발자국 기반 온실가스 배출량 산정 모형 개발 연구」)으로 수행한 내용을 요약·정리한 것입니다.



04554 서울특별시 중구 퇴계로173
남산스퀘어 빌딩 17층
Tel. 02.3393.3900
Fax. 02.3393.3919~20
www.gtck.re.kr

* 본 GTC BRIEF의 내용은 필자의 개인적 견해이며, 센터의 공식적인 의견이 아님을 알려드립니다.