

지능형 디지털플랫폼 기반의 혁신 융·복합 기후기술 개발  
탈탄소사회 구현을 위한 탄소발자국 기반  
온실가스 배출량 산정 모형 개발 연구

Development of Evaluation model for GHGs emission Based on  
Carbon Footprint

2022. 12.



지능형 디지털플랫폼 기반의 혁신 융·복합 기후기술 개발  
탈탄소사회 구현을 위한 탄소발자국 기반  
온실가스 배출량 산정 모형 개발 연구

Development of Evaluation model for GHGs emission Based on  
Carbon Footprint

2022. 12.



# 제 출 문

국가녹색기술연구소 소장 귀하

본 보고서를 “탈탄소사회 구현을 위한 탄소발자국 기반 온실가스 배출량 산정 모형 개발 연구” 의 보고서로 제출합니다.

2022. 12.

주관연구기관명 : 국가녹색기술연구소

부 서 명 : 기술총괄부

연구책임자 : 오 상 진

연 구 원 : 이 종 석

: 임 윤 진

: 김 지 예

: 신 종 석

위탁연구기관/연구책임자 : (주)엔스타알앤씨/이 광 원



# 요 약 문

## I. 서 론

### □ 연구의 배경 및 필요성

- 전 세계적으로 글로벌 기후위기 문제를 해결하기 위한 기술정책 해법인 탄소중립(Carbon neutrality) 등장
  - 탄소중립은 온실가스 배출을 최대한 줄이고, 남은 온실가스를 흡수 또는 제거해서 실질적인 온실가스의 배출량이 ‘0(Zero)’가 되는 상태를 의미
- 유럽 그린딜(EU Green Deal)을 시작으로 국가별 탄소중립 정책 수립
  - 유럽이 그린딜을 통해 2050 기후중립 목표를 발표('19.12) 한 이후, 중국('20.09), 일본('20.10), 한국('20.12) 등 국가별 탄소중립 목표 선언 및 추진전략 발표
  - 2050 탄소중립 달성을 목표로 하는 기후목표상향동맹(Climate Ambition Alliance)에 전 세계 136개국이 참여
- ‘2030 NDC 달성’ 및 ‘2050 탄소중립’을 위한 온실가스 감축 기술별 탄소 배출량 정량화 필요
  - 최근 「2050 탄소중립 추진전략('20.12)」 수립을 통해 국가 탄소중립의 방향성을 제시하고 있으나, 해당 국가전략 이행에 따른 온실가스 감축효과 분석연구는 미비한 수준
  - 특히, 탄소의 환경적·경제적 가치를 고려한 온실가스감축인지 예산제도의 효과적인 이행을 위하여 R&D 단계에 있는 기술의 온실가스 분석모형 개발 필요
- 탄소중립 기술별 특성 및 유망 신기술의 특성을 반영할 수 있는 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA) 중심의 온실가스 배출량 산정 필요

### □ 연구목적

- 본 연구의 최종 목표는 탄소중립 기술 대상 LCA 중심의 온실가스 배출량 산정 시뮬레이터 개발 및 활용방안 제시
  - 탄소중립 에너지 연구 개발 이전 단계에서 전과정 온실가스 배출량을 산정할 수 있으며, 국내 기존기술 대비 신기술에 대하여 LCA를 기반으로 탄소중립의 효과성을 정량화할 수 있는 시뮬레이션 툴로써 활용

### □ 연구내용 및 추진체계

- (방법론 및 동향분석) 탄소발자국 산정방법론 및 국제표준화·정책·시뮬레이터 개발 동향분석을 통한 시뮬레이터 개발 기반 구축
  - 탄소발자국 및 LCA 방법론 분석을 통하여 시뮬레이터 개발 시 중점 고려사항 도출

- 탄소발자국 국제표준화 및 국내외 정책동향 분석
- 탄소발자국 및 LCA 시뮬레이터 개발 동향 분석을 통한 LCA에 대한 전문지식이 없는 연구개발자용 시뮬레이터 개발 방향성 제시
- (시뮬레이터 개발) 바이오에너지 탄소발자국 시뮬레이터 개발
  - 바이오에너지 기술분류체계 조사를 통한 연구대상 기술 선정 및 탄소발자국 산정방법론 조사
  - 바이오에너지 기술별 주요 투입/산출 항목 수집
  - 주요 투입/산출물별 LCI DB 연계 방안 마련
  - 바이오에너지 탄소발자국 시뮬레이터 개발 및 검증
- (추진체계) 연구수행 과정에서의 적절성 및 연구결과의 효과성 제고를 위한 외부전문가 및 위탁기관과의 협조체계 구축
  - (총괄위원회) 대상기술의 적절성을 검토하고 대상기술에 대한 탄소발자국 시뮬레이터 개발을 위한 시스템경계 및 데이터 수집 범위를 검토
  - (LCA 분과위원회) 상세한 방법론 검토를 위한 전문가 집단으로 기술별 투입/산출 항목 LCI DB의 적절성 및 연계 방안을 검토

## II. 국내외 탄소발자국 동향분석

### □ 탄소발자국과 전과정평가 방법론

- ISO 14044 및 14067에서는 기능단위, 시스템경계, 데이터 수집, 할당방법, 토지이용변화에 대하여 검토하여 시뮬레이터 개발 시 중점 고려사항 도출
  - (기능단위) 기존 및 신기술에 대하여 비교하여 환경성에 대한 우위를 제시하고자 할 경우 두 시스템의 기능단위는 같아야 함
  - (시스템경계) 시스템경계를 Cradle to Gate 및 Grave로 설정하는지에 따라 결과값이 상이하므로, 분석 목적에 따른 시스템경계 설정이 중요
  - (데이터 수집) 원재료 취득단계부터 폐기단계까지 데이터를 수집해야 하지만 현실적으로 어려운 경우, 구축되어 있는 LCI DB를 사용할 수 있음
  - (할당방법) 할당을 피할 수 없는 경우 첫 번째로는 물리적(질량, 에너지 함량 등) 관계, 두 번째로는 경제적 가치(시장가격 등)로 할당함
  - (토지이용변화) 탄소발자국 산정 시 직접토지이용변화(dLUC)는 필수(Shall)적으로 고려할 요소로 규정하고 있으며, 간접토지이용변화(iLUC)의 경우 권고(Should) 사항임

### □ 탄소발자국 국제표준화 동향

- 국제적으로 LCA 측면에서의 온실가스 배출량 산정의 중요성이 점점 더 대두 될 것을 시사



- ISO/TC 207/SC7에서 2020년부터 탄소중립 정량화를 위한 표준인 ISO 14068을 신규 제정 중임
- 해당 표준에서는 배출권거래제에서 다루고 있는 직접 및 간접(에너지 사용) 배출량 개념을 넘어서 LCA 기반의 탄소배출량을 포함하도록 함

□ 국내외 탄소발자국 정책동향

- 기존 사업장 단위의 온실가스 배출량에서 제품 단위의 탄소발자국으로 중심이 이동하고 있으며, 향후 규제화 될 가능성이 크기 때문에 선제적으로 기술, 공정, 제품에 대한 탄소발자국 산정이 필요함을 시사
- (EU) 탄소국경조정제도(CBAM)의 경우 전력 소비로 인한 간접배출량만 고려하고 있지만, 향후 배출범위를 모든 Supply chain 차원의 간접배출량으로 확대할 가능성을 시사하고 있으며, 제품환경발자국(PEF) 제도 및 신 EU 배터리 규제안을 통하여 LCA 중요성 강조
- (미국) 캘리포니아를 시작으로 「청정 구매법」이 발효됨에 따라 타 연방 정부까지 확대되고 있으므로 향후 탄소발자국 관련 정책 규제가 심화될 것으로 예상
- (한국) 국제 탄소발자국 규제에 대응하기 위하여, 정부(환경부) 주도로 해외 상호인정이 가능하도록 환경성적표지 작성지침 확대 등 다양한 노력을 진행하고 있으나 급변하는 규제에 대응하기 위해서는 산업계 차원에서의 전략 마련 필요

□ 탄소발자국 시뮬레이터 개발동향

- 연구개발자용 시뮬레이터 개발 방향성 제시
- (용도) 기존에 개발된 6개 시뮬레이터 중 5개의 시뮬레이터는 LCA 전문가가 아닐 경우 사용하는 것이 힘들 것으로 판단되므로 비전문가용 시뮬레이터 개발 필요
- (데이터 입력) 모든 단위공정 및 전과정 단계별로 사용자가 투입/산출을 입력하고 각 투입/산출에 해당하는 LCI DB를 연결해야 하는 번거로움이 있으므로 투입/산출 입력 시 자동으로 LCI DB 및 배출계수와 연계될 수 있도록 개발 필요
- (할당방법) 별도의 가이드 없이 사용자가 적합한 할당방법을 선택하여 적용하는 것이 대부분이므로 특정 산업/기술군에서 개발된 PCR(Product Category Rule) 및 가이드라인을 검토하여 일반적으로 활용되고 있는 할당방법을 미리 시뮬레이터 설계 시 반영 필요
- (기능단위) 시뮬레이터를 특정 산업 및 기술군별로 따로 개발함으로써 기능단위를 디폴트 값으로 정의하여 개발 필요

III. 탄소발자국 기반 온실가스 배출량 산정 시뮬레이터 개발

□ 연구대상 기술분야 선정

- 국가과학기술자문회의 탄소중립 중점기술(안)을 활용하여 세부 대상기술 선정
  - 바이오에너지 분야 분류체계에서 제시한 11개 소분류 중 유사 및 중복 기술을 통합하여 6개(바이오 고형연료, 바이오가스, 바이오디젤, 바이오휘발유, 바이오중유, 바이오항공유) 기술 선정
  - 바이오에너지의 주요 사용 형태는 스팀(열), 전기, 수송연료 3개 분야로 구분

□ 탄소발자국 산정방법론 조사

- 바이오에너지 탄소발자국 산정방법론 조사를 통한 기능단위, 시스템경계 설정, 할당방법, 토지이용변화, 지구온난화지수를 결정
  - (기능단위) 열(스팀) 및 전력의 경우 1MJ 바이오에너지 사용(연소)으로, 수송연료의 경우 이동거리(km)로 정의
  - (시스템경계) EU 신재생에너지 지침 등 바이오에너지 LCA 가이드라인을 바탕으로 바이오매스(feedstock) 생산(재배) 또는 수집단계, 수송, 바이오에너지 생산공정 및 사용(연소)단계까지를 포함
  - (할당방법) 바이오에너지 생산공정에서는 연료와 부산물에 대한 에너지 함량(저위발열량)으로 할당, 에너지전환 설비의 경우 엑서지(Exergy) 기반 할당 진행
  - (토지이용변화) dLUC만 고려하며, 바이오매스의 온실가스 흡수 및 배출 산정시 CO<sub>2</sub> 흡수(Carbon uptake)량을 '0'으로 가정하고 이에 따라 바이오 CO<sub>2</sub> 배출(연료 연소 시 배출)도 '0'으로 가정
  - (지구온난화지수) 온실가스감축인지 예산제도와 의 일관성 및 향후 방법론 변경 가능성을 고려하여 IPCC 2006 및 2013 모두 적용

□ 온실가스 배출량 데이터 수집 및 시뮬레이터 개발

- 심층 문헌 조사 및 바이오에너지 기술개발 전문가 설문조사를 통한 바이오에너지 기술별 주요 투입/산출 항목 도출
- Feedstock 국내 생산 및 수출입 동향 파악을 통하여 LCI DB 선택 기준 마련
- 바이오에너지 생산공정 투입/산출물별 LCI DB 조사를 통한 시뮬레이터 연계
  - (주원료) 총 76개 feedstock 중 7개를 제외하고 시뮬레이터에 반영
  - (운송) 해외로부터 수입되는 feedstock은 표준항해거리표를 활용하여 거리를 반영하였고, 국내 feedstock은 환경성적표지 작성지침의 최대거리 적용
  - (부원료) 총 62개 부원료 중 23개를 제외하고 시뮬레이터에 반영
  - (유틸리티) 전기의 경우 Ecoinvent DB 내 한국 medium voltage를 적용하였고 스팀은 사용자가 직접 총 5개의 source 별 스팀을 선택할 수 있도록 반영
  - (폐기물/폐수) 사용자가 발생하는 재활용 폐기물양과 소각/매립되는 폐기물로만 구분하면 통계자료를 바탕으로 지정/일반폐기물로 구분되어 LCI DB와 자동으로 연결되도록 설계

#### IV. 탄소발자국 산정 시뮬레이터 구성현황

##### □ 시뮬레이터 사용자 활용 부분

- 2장에서 모색한 개발방향을 바탕으로 비전문가가 사용할 수 있도록 기능 구현
  - (데이터 입력) 바이오에너지 생산공정에 대한 투입/산출물 데이터를 입력하면 자동으로 LCI DB와 연결되어 결과값이 도출되도록 설계
  - (할당방법) 제품 및 부산물의 저위발열량을 입력하게 되면 자동으로 할당
  - (기능단위) 스팀(열), 전기의 경우 MJ 단위로 고정, 수송연료는 km 단위로 고정

##### □ 시뮬레이터 개발자 활용 부분

- 향후 확장성을 위하여 총 6개 Sheet로 구성되어 있는 Backdata를 활용하여 투입/산출물별 LCI DB 추가 및 연료원별 배출계수 변경 가능

##### □ 탄소발자국 시뮬레이터 검증

- PFAD 기반의 바이오디젤에 대한 연구논문과 비교분석을 통하여 시뮬레이터 검증
  - 연구논문에서의 탄소발자국은 30.6gCO<sub>2</sub>-eq/MJ로 나타났으며, 시뮬레이터 산출 탄소발자국은 28.1gCO<sub>2</sub>-eq/MJ로 유사한 결과를 나타냄

#### V. 결론 및 향후 계획

##### □ 결론

- 정부 차원에서 탄소중립 국가전략 이행을 위한 온실가스 배출 모델 적용 방향을 제시할 수 있음
  - 석유기반 연료 및 기존 바이오에너지 기술과 신기술에 대하여 LCA를 기반으로 국내 탄소중립의 효과성을 정량화할 수 있을 것으로 기대
  - 특히, 정부출연연구소 부문에서 R&D 단계에 있는 바이오에너지 기술에 대하여 온실가스 감축효과를 선제적으로 제시함으로써 향후 정책입안자의 의사결정에 기여할 수 있음

##### □ 향후 계획

- 바이오에너지 탄소발자국 시뮬레이터의 고도화
  - 1차년도에 반영하지 못한 바이오매스(Feedstock) 중 8개와 부자재 23개 반영하기 위하여 다양한 DB, 문헌, 전문가 활용을 통하여 시뮬레이터 내 다양한 DB 탑재
  - 한국환경산업기술원 주도로 제/개정하고 있는 국내 LCI DB와 향후 연계 필요
- 탄소발자국 시뮬레이터 기술범위 확대
  - 시뮬레이터의 활용성 증대를 위하여 「탄소중립 기술혁신 추진전략('21.3)」에 제시된 핵심기술을 아우를 수 있도록 기술범위의 확대가 필요

# S U M M A R Y

## I . Introduction

### Research Background

- Carbon neutrality, a solution of technology policy to solve the global climate crisis, has been emerging worldwide
  - Carbon neutrality means having a balance between emitting carbon and absorbing or removing carbon from the atmosphere, where the amount of carbon emission is ‘0(zero)’
- Starting with the EU’ s Green Deal, countries established a carbon-neutral policy
  - After EU announced its 2050 climate-neutral goal through the Green Deal (’19.12), China (20.09), Japan (20.10), and Korea (20.12) among many more declared their own carbon-neutral goals and strategies
  - To achieve carbon neutrality by 2050, 136 countries participated in the Climate Ambition Alliance
- There is a need to quantify carbon emission by technologies for greenhouse gas reduction to achieve 2030 NDC’ goals and ‘2050 carbon neutrality’
  - While the direction of Korea’ s carbon neutrality was presented through the establishment of the 「2050 Carbon Neutral Strategy (’20.12)」 , the analyses on the effect of the implementation of the relevant national strategy on greenhouse gas (GHG) reduction remain insufficient
  - In order to effectively implement Greenhouse Gas Reduction Cognitive Budget System (Green Budgeting) which considers environmental and social costs of carbon, it is particularly necessary to develop a model to evaluate GHG of technology at its R&D level
- Hence, it is necessary to estimate GHG emissions using Life Cycle Assessment (LCA) that can reflect the characteristics of each carbon-neutral technology and promising new technology

### Research Purpose

- The ultimate goal of this study is to develop a simulator for calculating GHG emissions of carbon-neutral technology using LCA and provide suggestions for utilization
  - Specifically, this study aims to provide a simulation tool to estimate GHG

emissions throughout the life cycle of carbon-neutral energy R&D and quantify the effectiveness of carbon neutrality by allowing comparison with conventional energy technologies in Korea

□ Research Methodology and Framework

- (Methodology and Trend Analysis) Establishing the basis for simulator development through comprehensive literature review of carbon footprint calculation methodology and international standardization, policy, and simulator development trends
  - Deriving key implications for developing a simulator through analyzing methodologies of carbon footprint and LCA
  - Analyzing international and domestic international standardization of carbon footprint and policy trends
  - Presenting the direction for future simulator development for researchers without much expertise
- (Simulator Development) Developing a carbon footprint simulator for bioenergy technologies
  - Investigating literature on carbon footprint calculation methodology and selecting research targets through studying bioenergy technology classification system
  - Collecting key inputs/output items of bioenergy technologies
  - Proposing an effective way to link inputs/outputs with existing LCI DB
  - Developing and verifying the bioenergy carbon footprint simulator
- (Research Framework/Organization) Establishing of a cooperative system with external experts and entrusted institutions to streamline the research implementation and strengthen validity and reliability of the study
  - (General Committee) Reviewing the appropriateness of the target technology, the scope of system boundary, and data collection for the development of a carbon footprint simulator
  - (Subcommittee on LCA) assessing appropriateness and linkage of technology input/output items LCI DB to review detailed methodologies

II. Analysis of international and domestic carbon footprint trends

□ Carbon Footprint and Life Cycle Assessment

- ISO 14044 and 14067 review functional units, system boundaries, data

collection, allocation methods, and land use changes to derive key implications for simulator development

- (Functional Unit) Functional unit provides an environmental advantage over existing or new technologies
- (System Boundary) It is integral to set the system boundary in accordance to the purpose of analysis as the results may variate depending on whether the system boundary is set to Cradle to Gate or to Grave
- (Data Collection) Despite the fact that data must be collected from raw material extraction to disposal, it is realistically difficult to do. In this case, existing LCI DB can be used
- (Allocation) If allocation is unavoidable, it is first advised to allocated according to physical properties (e.g., mass, energy). A second option would be allocating based on economic values (e.g., market price).
- (Land Use Change) When calculating carbon footprint, dLUC “shall” be considered whereas iLUC “should” be considered

Analysis of trend in international standardization of carbon footprint

- o It underscores the global importance of estimating GHG emissions from a perspective of life-cycle thinking
  - ISO/TC 207/SC7 has newly established ISO 14068 as a standard for quantifying carbon neutrality since 2020
  - The standard includes LCA-based carbon emissions beyond the concept of direct and indirect (energy use) emissions covered by the Emissions Trading System

Analysis of trend in international and domestic carbon footprint policy

- o The focus is shifting from GHG emission at the facility level to carbon footprint at the product level, and it is highly likely to be regulated in the future, which suggests the need to preemptively estimate carbon footprint of technology, processes, and products
  - (EU) EU’s CBAM currently considers only indirect emissions from power consumption but the analysis highlights the possibility of expanding the scope of emissions to include all levels of supply chain in the near future. This once again emphasizes the importance of LCA through PEF and new EU battery regulations
  - (US) With California as their model, many state governments and the Federal Government are instigating their own 「Buy Clean」 policies and initiatives, which further indicates more rigid carbon footprint regulations.

- (Korea) In order to respond to the rapid pace of international carbon footprint regulations, the Korean government (Ministry of Environment) is implementing various strategies to expand the guidelines for mutually recognizable Environmental Product Declaration (EPD). Yet, more robust efforts at industrial level are required.

□ Analysis of trend in development of carbon footprint simulator

- Presenting the direction of simulator development for researchers
  - (Application) 5 out of 6 commercialized simulators are strictly suited for LCA experts, making it impractical and inconvenient for non-professional researchers to estimate life cycle carbon footprints
  - (Data input) Since it is cumbersome for a user to provide all the input/output data and link the LCI DB to each input/output, there is a greater need to develop a non-professional user-friendly simulator that automatically connects provided input/output to the LCI DB and the emission coefficient
  - (Allocation) As most users discretionary choose and apply allocation methods without proper guidance, there is a need to reflect the most widely used allocation method through the comprehensive review of PCR and guidelines developed by specific industries/technical groups
  - (Functional unit) Simulators need to be developed separately for specific industries and groups, defining functional units as default values

### III. Development of a Simulator for Estimating Greenhouse Gas Emission Based on Carbon Footprints

□ Selection of a technology field

- Selected detailed sets of target technologies based on a draft of the Presidential advisory council on science & technology's carbon-neutral technology
  - After integrating similar or redundant technologies, selected six technologies (Solid biofuel, Biogas, Biodiesel, Bio-gasoline, Bio heavy oil, Bio jet fuel) among 11 sub-categories of the bioenergy sector classification system
  - Categorized the bioenergy's main usage in three key types: steam(heat), transportation fuel, and electricity

- Study on the Estimation Methodology for Carbon Footprint
  - Functional unit, system boundary, allocation, land use change, and Global Warming Potential index are determined through rounds of survey on the estimation methodology for carbon footprint of bioenergy
    - (Functional unit) Functional units are defined as 1MJ bioenergy use (combustion) for heat (steam) and electricity production, and as distance (km) for transportation fuel production
    - (System boundary) Grounded on EU' s Renewable Energy Directive, an LCA-based guidelines, system boundary for bioenergy includes biomass production (cultivation) or collection stage, transportation, bioenergy production process, and use (combustion) stage
    - (Allocation) Two ways of allocation are energy content (low calorific value) for the bioenergy production process and exergy for energy conversion facilities
    - (Land use change) Only dLUC is considered in this model, and when calculating GHG absorption and emission of biomass, the amount of carbon uptake is assumed to be "0." Hence, biogenic CO<sub>2</sub> emission (discharged during fuel combustion) is also assumed to be "0"
    - (Global Warming Potential) The simulation model can be adapted to both IPCC 2006 and 2013 considering the consistency with the Greenhouse Gas Reduction Cognitive Budget System (Green Budgeting) and the possibility of variation in the methodology.
  
- Greenhouse Gas Emissions Data Collection and Simulator Development
  - Derived key inputs/outputs for each bioenergy technology through a comprehensive examination of literature and expert consultation and surveys in bioenergy technology development
  - Systematized LCI DB selection criteria by identifying patterns in domestic production and flows in import and export of bioenergy feedstock
  - Linked the simulator with LCI DB by conducting rounds of survey of input/output of bioenergy.
    - (Main raw material) A total of 76 feedstock LCI DB excluding 8 of which do not have LCI DB is embedded in the simulator
    - (Transportation) Transportation distance of exported feedstock has been based on Standard Navigation Distance Table, and transportation distance of domestic feedstock is based on the longest distance from the EPD Guidelines



in Korea

- (Sub materials) A total of 38 out of 62 LCI DB for subsidiary materials has been reflected in the simulator. The LCI DB for the other 23 subsidiary materials could not be found.
- (Utility) For electricity Korea medium voltage from Ecoinvent DB has been applied. For steam, a user can select from 5 different sources of steam.
- (Waste/Waste water) Once a user distinguishes between the amount of recycled waste and incinerable or landfill waste, the LCI DB has been programmed to automatically classify into designated or general waste based on statistical data

#### IV. Composition Status of Carbon Footprint Simulation model

##### Utilization from the user' s side

- o Implemented functions specifically for non-experts based on the development direction sought in Chapter 2
- (Data input) Once a user provides inputs of the bioenergy production process, the input data will be mechanically linked to the embedded LCI DB
- (Allocation) The simulator is systemed to automatically assign products and by-products generated throughout the production process when the user enters the low calorific value
- (Functional unit) Steam (heat) and electricity are fixed in MJ units, and transportation fuel is fixed in km units

##### Utilization of the simulator developer' s side

- o For future scalability, backdata consisting of 6 separate sheets can be used to add LCI DB by input/output and change emission factor by fuel source

##### Verification of Carbon Footprint Simulator

- o Validation of the simulator developed through comparative analysis with research paper that calculated the carbon footprint of PFAD-based biodiesel
- The CFP value in the research paper was 30.6gCO<sub>2</sub>-eq/MJ, and the simulator calculated CFP value was 28.1gCO<sub>2</sub>-eq/MJ, showing similar results.

#### V. Conclusions and Future Developments

##### Conclusion

- o The simulator is expected to bolster government-level application of GHG

emission models to implement national carbon-neutral strategies

- The carbon footprint calculation model can quantify the effectiveness of domestic carbon neutrality of both fossil-based traditional bioenergy technologies and renewable energy technologies based on LCA
- In particular, the government-funded research institute can contribute to future policymakers' decision-making by proactively presenting GHG reduction potentials on bioenergy technologies in the R&D stage

#### □ Future Developments

- Advance the current carbon footprint simulator for bioenergy
  - More DBs will be installed into the simulator through the use of various DBs, literature and experts committees to reflect 8 of the biomass (feedstock) and 23 subsidiary materials that were not reflected in the first year
  - More domestic LCI DB, which is being enacted/revised to be given by Korea Institute of Environmental Industry and Technology Institute will be added
- Expand technology fields for carbon footprint simulators
  - In order to increase the usability of the simulator, it is necessary to expand the scope of target technologies to include core technologies proposed in the 「Strategy for Technology Innovation for carbon neutrality ('21.3)」

# 목 차

제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 연구 배경 및 목적 .....	3
1. 연구 배경 및 필요성 .....	3
2. 연구 목적 .....	5
제 2 절 연구내용 및 추진체계 .....	7
1. 연구내용 .....	7
2. 추진체계 및 프로세스 .....	7
제 2 장 국내외 탄소발자국 동향 분석 .....	9
제 1 절 탄소발자국과 전과정평가 방법론 .....	11
1. 목적 및 범위 정의 .....	13
2. 전과정 목록분석 .....	15
3. 전과정 영향평가 .....	20
4. 전과정 해석 .....	22
제 2 절 탄소발자국 국제표준화 동향 .....	24
1. 제 3분과위원회(SC3) 국제표준화 동향 .....	24
2. 제 5분과위원회(SC5) 국제표준화 동향 .....	26
3. 제 7분과위원회(SC7) 국제표준화 동향 .....	27
제 3 절 국내외 탄소발자국 정책 동향 .....	29
1. EU .....	29
2. 미국 .....	36
3. 한국 .....	39
제 4 절 탄소발자국 시뮬레이터 개발 동향 .....	41
1. LCA 시뮬레이터 개발 동향 .....	41
2. 탄소발자국 시뮬레이터 개발동향 .....	46
제 3 장 탄소발자국 기반 온실가스 배출량 산정 시뮬레이터 개발 .....	55
제 1 절 연구대상 기술분야 선정 .....	57
1. 대상기술 정의 .....	57

제 2 절 탄소발자국 산정방법론 조사 .....	60
1. 기능단위(Functional unit) .....	60
2. 시스템경계 설정 .....	61
3. 할당방법 .....	65
4. 토지이용변화, 바이오 온실가스 흡수 및 배출 .....	68
5. 지구온난화지수 .....	69
제 3 절 온실가스 배출량 데이터 수집 및 시뮬레이터 개발 .....	73
1. 바이오에너지 기술별 주요 투입/산출물 데이터 조사 .....	73
2. Feedstock 별 수입 및 국내 생산동향 .....	85
3. 바이오에너지 생산공정 투입/산출물별 LCI DB 수집 및 연계 .....	113
<b>제 4 장 탄소발자국 산정 시뮬레이터 구성현황 .....</b>	<b>129</b>
제 1 절 시뮬레이터 사용자 활용 부분 .....	133
1. 바이오에너지 종류 선택 및 제조공정 투입/산출 입력 .....	133
1.1 사용단계 입력 .....	137
1.2 전과정 탄소발자국 계산 결과 .....	138
제 2 절 시뮬레이터 개발자 활용 부분 .....	140
1. 사용자 투입/산출 입력 부분 내 개발자 활용 기능 .....	140
2. 시뮬레이터 내 Backdata 관리 기능 .....	142
제 3 절 탄소발자국 시뮬레이터 검증 .....	145
1. 시뮬레이터 검증을 위한 PFAD 기반 바이오디젤 생산 기술 .....	145
2. 결과 비교를 통한 검증 .....	149
<b>제 5 장 결론 및 향후 계획 .....</b>	<b>153</b>
제 1 절 결론 .....	155
제 2 절 향후 계획 .....	157
<b>참고문헌 .....</b>	<b>159</b>
[별 첨] 바이오에너지 기술별 투입/산출물 전문가 설문조사지 .....	163

# 표 목 차

<표 1-1> GTC 탄소발자국 시뮬레이터 개발 및 활용 계획 .....	6
<표 2-1> ISO 14044 및 14067에서 제시하고 있는 할당 우선순위 .....	18
<표 2-2> 지구온난화 영향범주(i 영향범주)에 대한 특성화 단계 예시 .....	22
<표 2-3> 바이오디젤의 전과정 단계별 탄소발자국 예시(단위: kgCO <sub>2</sub> -eq/MJ) .....	22
<표 2-4> ISO/TC 207 분과위원회 및 표준 제정 현황 .....	24
<표 2-5> ISO/TC 207/SC3 국제표준 제/개정 현황 .....	25
<표 2-6> ISO/TC 207/SC5 국제표준 제/개정 현황 .....	26
<표 2-7> ISO/TC 207/SC7 국제표준 제/개정 현황 .....	27
<표 2-8> 「Fit for 55」의 주요 내용 .....	29
<표 2-9> EU의 CBAM 시행 타임라인 .....	30
<표 2-10> CBAM 법률안 주요 변경 현황 .....	31
<표 2-11> 주요 EU 국가에서 혼용되고 있는 EPD 및 탄소라벨링 인증제도 .....	32
<표 2-12> 미국 내 주요 행정구역별 LCA 기반 공공조달 정책 .....	37
<표 2-13> 탄소발자국 및 LCA 시뮬레이터 분석 결과 .....	53
<표 3-1> 에너지 부문 탄소중립 기술 11개 선정 .....	58
<표 3-2> 일반제품 및 바이오에너지 시스템경계 정의 차이점 .....	61
<표 3-3> 바이오에너지 LCA 가이드라인 및 문헌에서 제시한 시스템경계 .....	64
<표 3-4> 바이오에너지 LCA 수행 시 할당방법별 장단점(Liu et al.(2018)) .....	66
<표 3-5> 본 연구에서 정의한 바이오에너지 탄소발자국 시뮬레이터 할당방법 .....	68
<표 3-6> Greenhouse gas protocol 온실가스 인벤토리 배출계수 .....	69
<표 3-7> 연료별 연소 배출계수 계산 .....	72
<표 3-8> 바이오 고형연료 주요 투입·산출 항목표 .....	76
<표 3-9> 바이오가스 주요 투입·산출 항목표 .....	77
<표 3-10> 바이오중유 주요 투입·산출 항목표 .....	78
<표 3-11> 바이오휘발유 주요 투입·산출 항목표 .....	79
<표 3-12> 바이오디젤 주요 투입·산출 항목표 .....	81
<표 3-13> 바이오항공유 투입·산출 항목표 .....	83
<표 3-14> 2016-2020 연도별 목재 펠릿 생산량 .....	86

<표 3-15> 바이오 고품연료(목재펠릿) 에너지 생산량/발전량 .....	86
<표 3-16> 바이오 고품연료 주원료 - 전문가 설문조사 결과 .....	87
<표 3-17> 주요 국가별 대나무 수입량 .....	88
<표 3-18> 고품연료 feedstock 별 국내 주요 생산지역, 해외 주요 수입국가 .....	89
<표 3-19> 2016-2020 국내 바이오가스 생산량 .....	89
<표 3-20> 2016-2020 바이오가스 에너지 생산량/발전량 .....	90
<표 3-21> 바이오가스 주원료 - 전문가 설문조사 결과 .....	90
<표 3-22> 2021년 국내 바이오가스 원료별 생산/이용 현황 .....	91
<표 3-23> 2020 폐기물 재활용 실적 및 업체 현황 .....	91
<표 3-24> 바이오가스 feedstock 별 국내 주요 생산지역, 해외 주요 수입국가 .....	91
<표 3-25> 2014-2019 연도별 바이오중유 원료 사용량 .....	92
<표 3-26> 2016-2019 국내 바이오중유 시장 규모 .....	92
<표 3-27> 2016-2020 바이오중유 에너지 생산량 .....	92
<표 3-28> 바이오중유 주원료 - 전문가 설문조사 결과 .....	93
<표 3-29> 2012-2021 국내 팜유와 그 분획물 수입 금액 및 수입 중량 .....	93
<표 3-30> 팜유 수입국가 및 수입량 .....	94
<표 3-31> 바이오중유 feedstock 별 국내 주요 생산지역, 해외 주요 수입국가 .....	95
<표 3-32> 바이오휘발유 주원료 - 전문가 설문조사 결과 .....	95
<표 3-33> 국내 바이오휘발유 feedstock 별 생산량 현황 .....	96
<표 3-34> 주요 국가별 옥수수 수입량 .....	96
<표 3-35> 주요 국가별 감자 수입량 .....	97
<표 3-36> 국내 호밀 지역별 생산량 .....	98
<표 3-37> 주요 국가별 밀 수입량 .....	98
<표 3-38> 주요 국가별 사탕무 수입량 .....	99
<표 3-39> 국내 지역별 보리 생산량 .....	99
<표 3-40> 바이오휘발유 feedstock 별 국내 주요 생산지역, 해외 주요 수입국가 ...	100
<표 3-41> '16년 기준 국내 바이오디젤 feedstock 수급 현황 .....	101
<표 3-42> 바이오디젤 주원료 - 전문가 설문조사 결과 .....	102
<표 3-43> 주요 국가별 팜유 수입량 .....	103
<표 3-44> 주요 국가별 유채씨 수입량 .....	104
<표 3-45> 국내 지역별 보리 생산량 .....	105
<표 3-46> 주요 국가별 대두 및 분획물 수입량 .....	106

<표 3-47> 주요 국가별 현미 수입량 .....	107
<표 3-48> 바이오디젤 feedstock 별 국내 주요 생산지역 및 해외 주요 수입국가 ..	108
<표 3-49> 바이오휘발유 주원료 - 전문가 설문조사 결과 .....	108
<표 3-50> 주요 국가별 카사바 신선·건조 수입량 .....	110
<표 3-51> 주요 국가별 카사바칩 수입량 .....	110
<표 3-52> 주요 국가별 해바라기씨유 수입량 .....	111
<표 3-53> 바이오항공유 feedstock 별 국내 주요 생산지역 및 해외 주요 수입국가 .....	112
<표 3-54> 바이오 기술 전문가 설문조사 결과 Feedstock 리스트 및 시뮬레이터 포함 여부 .....	113
<표 3-55> feedstock 별 적용된 LCI DB명 .....	117
<표 3-56> 환경성적지침 부속서 3-표준항해거리표 .....	119
<표 3-57> 환경성적지침 부속서 3-권역별 수송 거리 .....	120
<표 3-58> 바이오 기술 전문가 설문조사 결과 부원료 리스트 및 시뮬레이터 포함 여부 .....	121
<표 3-59> 부원료별 적용된 LCI DB명 .....	123
<표 3-60> 바이오 기술 전문가 설문조사 결과 유틸리티 리스트 및 시뮬레이터 포함 여부 .....	125
<표 3-61> 유틸리티별 적용된 LCI DB명 .....	126
<표 3-62> 바이오 기술 전문가 설문조사 결과 폐기물, 폐수명 및 시뮬레이터 포함 여부 .....	127
<표 3-63> 국내 사업장 폐기물 3년 평균 발생량 및 소각/매립 구성비('18~'20년) .....	128
<표 4-1> PFAD를 사용한 바이오디젤 생산공정 GtG 데이터 .....	147
<표 4-2> 산출물별 환경부하 할당 인자 .....	148
<표 5-1> 본 연구 및 기존 탄소발자국 시뮬레이터 개발 사례 간 비교분석 .....	156

# 그림 목 차

[그림 1-1] Climate Ambition Alliance: Net Zero 2050 참여 동향 .....	3
[그림 1-2] 2050 탄소중립 추진전략에 따른 온실가스 분석모형 개발의 필요성 .....	4
[그림 1-3] ISO/TC 207에서 제정 중인 탄소중립 국제표준 .....	5
[그림 1-4] 추진체계 및 프로세스 .....	8
[그림 2-1] LCA 및 탄소발자국 산정을 위한 전과정 단계 .....	11
[그림 2-2] 국제표준에서 정의하고 있는 LCA framework .....	12
[그림 2-3] 바이오에너지의 Cradle to Gate 시스템경계 예시 .....	14
[그림 2-4] 바이오에너지의 Cradle to Grave 시스템경계 예시 .....	15
[그림 2-5] 전과정 목록분석 수행 절차 .....	16
[그림 2-6] 국내외 구축되어 있는 LCI DB 현황 .....	17
[그림 2-7] 탄소발자국 산정 시 필수(Shall) 및 선택적(Should)으로 고려해야 할 요소 .....	19
[그림 2-8] 전과정 영향평가 단계별 상호관계 .....	20
[그림 2-9] PAS 2060을 기반으로 제품/조직의 탄소중립 정량화를 위한 표준안 (ISO 14068) .....	28
[그림 2-10] PEF 제도의 단계별 추진현황 .....	33
[그림 2-11] PEF 방법론에서 고려하고 있는 16가지 환경영향범주 .....	34
[그림 2-12] 신 EU 배터리 규제안 .....	35
[그림 2-13] 「연방 지속가능성 계획」 주요 내용 .....	38
[그림 2-14] 환경산업기술원에서 지원하는 2가지 인증제도 및 7대 환경영향범주 ....	39
[그림 2-15] Simapro 사용 시 단위공정별 투입/산출 입력 기능 .....	41
[그림 2-16] Simapro 기능단위 및 영향평가 방법 선택 기능 .....	42
[그림 2-17] GaBi 사용 시 단위공정별 투입/산출 입력 기능 .....	43
[그림 2-18] GaBi 기능단위 선택 기능 .....	43
[그림 2-19] ezEPD 단위공정별 투입/산출 입력 기능 .....	44
[그림 2-20] ezEPD 기능단위 및 할당근거 입력 기능 .....	45
[그림 2-21] GREET model에서 고려하고 있는 탄소발자국 산정 범위 .....	46
[그림 2-22] GREET model 에너지소비량 입력 Sheet .....	47



[그림 2-23] GREET model 상위흐름(upstream) 데이터 입력 Sheet .....	47
[그림 2-24] GREET model 할당방법 정의 기능 .....	47
[그림 2-25] GREET model 탄소발자국 결과 예시 .....	48
[그림 2-26] GHGenius 투입/산출 데이터 입력 기능 .....	49
[그림 2-27] GHGenius 바이오에너지 생산공정 투입 부자재 입력 기능 .....	49
[그림 2-28] GHGenius 투입물 별 할당방법 선택 기능 .....	50
[그림 2-29] GHGenius 탄소발자국 결과 예시 .....	50
[그림 2-30] 태양광 모듈 탄소배출량 검증 시스템 데이터 입력 .....	51
[그림 2-31] 태양광 모듈 탄소배출량 검증 시스템 탄소발자국 결과 예시 .....	52
[그림 3-1] 바이오에너지 분류체계 내 탄소발자국 시뮬레이터 개발 대상기술 .....	59
[그림 3-2] 탄소발자국 산정 대상 기술 분야별 최종 Pathway .....	59
[그림 3-3] IEA의 바이오에너지 시스템경계 정의 예시 .....	62
[그림 3-4] EU 신재생에너지 지침 - 바이오에너지 전과정 탄소발자국 산정방법론 ....	63
[그림 3-5] 기존 바이오 에탄올 전과정 온실가스 시뮬레이터의 시스템경계 정의 ....	63
[그림 3-6] 본 연구의 바이오에너지 시스템경계 정의 .....	65
[그림 3-7] 스팀과 열이 동시 생산되는 공정에 대한 온실가스 산정 방법 .....	67
[그림 3-8] 바이오에너지 기술별 주요 투입·산출물 데이터 조사 방법 .....	73
[그림 3-9] 바이오에너지 생산공정 GtG 데이터 조사 .....	74
[그림 3-10] 기술별 전문가 대상 설문조사지 .....	75
[그림 3-11] 국내 팜유 생산 동향 (2016년~2020년) .....	102
[그림 4-1] 바이오에너지 6개 기술 전과정 탄소발자국 시뮬레이터 사용자 입력화면 .....	131
[그림 4-2] 바이오에너지 전과정 탄소발자국 시뮬레이션 결과 화면 .....	132
[그림 4-3] 바이오에너지 사용 형태 및 방법론 선택 예시 .....	133
[그림 4-4] 연료 종류 선택 예시 .....	134
[그림 4-5] 바이오연료 제조단계 CFP 계산 결과표 .....	134
[그림 4-6] 바이오연료 제조단계의 탄소발자국 계산 - 투입·산출물 데이터 입력 표 .....	135
[그림 4-7] 바이오연료 사용단계 탄소발자국(CFP) 계산 - 사용단계 연소효율(연비) 입력 .....	137
[그림 4-8] 탄소발자국(CFP) 계산 - 바이오가스 사용단계 연소효율 입력 예시 .....	138
[그림 4-9] 바이오연료 전과정 탄소발자국(CFP) 계산 결과 및 화석연료 비교 .....	139

[그림 4-10] 개발자용 입력화면 펼치기 화면 .....	140
[그림 4-11] 바이오에너지 생산공정까지의 단계별/투입·배출물질별 CFP 분석표 .....	141
[그림 4-12] 산출물별 탄소발자국 할당계수 산정 기능 .....	142
[그림 4-13] Feedstock LCI DB 추가 기능 Sheet .....	143
[그림 4-14] 투입/산출물별 온실가스 배출계수 계산 시트 .....	143
[그림 4-15] PFAD를 사용한 바이오디젤 시스템경계 .....	146
[그림 4-16] 바이오디젤 생산공정 투입·산출물 데이터 .....	148
[그림 4-17] PFAD 제조단계 CFP .....	149
[그림 4-18] 투입·산출물질별 탄소발자국 결과 .....	150
[그림 4-19] PFAD 사용 바이오디젤 전과정 CFP .....	150
[그림 4-20] PFAD 바이오디젤 CFP 비교 .....	151
[그림 4-21] 환경산업기술원에서 제/개정 중인 LCI DB .....	157
[그림 4-22] 탄소중립 기술혁신 10대 핵심기술 .....	158

# C O N T E N T S

<b>Chapter 1 Introduction .....</b>	<b>1</b>
Part 1. Research Background and Purpose .....	3
1. Research Background .....	3
2. Research Purpose .....	5
Part 2. Research Methodology and Framework .....	7
1. Research Methodology .....	7
2. Research Framework .....	7
<b>Chapter 2 Analysis of global and domestic carbon footprint trends .....</b>	<b>9</b>
Part 1. Carbon Footprint and Life Cycle Assessment .....	11
1. Goal and Scope definition .....	13
2. Life cycle inventory analysis .....	15
3. Life cycle impact assessment .....	20
4. Interpretation .....	22
Part 2. Analysis of trend in international standardization of carbon footprint .....	24
1. ISO/TC207/SC3 .....	24
2. ISO/TC207/SC5 .....	26
3. ISO/TC207/SC7 .....	27
Part 3. Analysis of trend in global and domestic carbon footprint policy .....	29
1. EU .....	29
2. United States .....	36
3. Korea .....	39
Part 4. Analysis of trend in development of carbon footprint simulator .....	41
1. LCA simulator .....	41
2. Carbon footprint simulator .....	46
<b>Chapter 3 Development of a Simulator for Estimating Greenhouse Gas Emission Based on Carbon Footprints .....</b>	<b>55</b>

Part 1. Selection of a technology field .....	57
1. Define target technology .....	57
Part 2. Study on the Estimation Methodology for Carbon Footprint .....	60
1. Functional unit .....	60
2. System Boundary .....	61
3. Allocation methods .....	65
4. Land use, GHG emissions and removals .....	68
5. Global warming potential .....	69
Part 3. Greenhouse Gas Emissions Data Collection and Simulator Development ..	73
1. Investigation of major input/output data in bioenergy technology .....	73
2. Import and domestic production trends of feedstocks .....	85
3. Collection and connection of input/output LCI DB in simulator .....	113
<b>Chapter 4 Composition Status of Carbon Footprint Simulation model ....</b>	<b>129</b>
Part 1. User utilization part .....	133
1. Selection of bioenergy types and enter input/output .....	133
Part 2. Developer utilization part .....	140
1. Developer utilization function in user part .....	140
2. Backdata management function in the simulator .....	142
Part 3. Carbon Footprint Simulator Verification .....	145
1. PFAD-based biodiesel production technology for simulator verification ..	145
2. Verification through result comparison .....	149
<b>Chapter 5 Conclusions and Future Developments .....</b>	<b>153</b>
Part 1. Conclusions .....	155
Part 2. Future Developments .....	157
<b>Reference .....</b>	<b>159</b>
[Appendix] Expert questionnaire of input/output parameter bioenergy technology ...	163

# 제1장 서론



# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구 배경 및 목적

### 1. 연구 배경 및 필요성

전 세계적으로 글로벌 기후위기 문제를 해결하기 위한 기술정책 해법인 “탄소중립(Carbon neutrality) 개념이 등장하였다. 탄소중립은 온실가스 배출을 최대한 줄이고, 남은 온실가스를 흡수 또는 제거해서 실질적인 온실가스의 배출량이 ‘0(Zero)’ 가 되는 상태를 의미한다.

국제적으로 탄소중립을 위하여 유럽 그린딜(EU Green Deal)을 시작으로 2050 기후중립 목표를 발표('19.12)하였고, 중국('20.09), 일본('20.10), 한국('20.12) 등 국가별 탄소중립 목표 선언 및 추진전략 발표하였다. 또한 2050 탄소중립 달성을 목표로 하는 기후목표상향동맹(Climate Ambition Alliance)에 전 세계 136개국이 참여함으로써 전 세계적으로 기후위기 대응을 위한 탄소중립 노력에 가속화를 하고 있다.

[그림 1-1] Climate Ambition Alliance: Net Zero 2050 참여 동향



출처: <https://climateaction.unfccc.int/?coopinitid=94>, 2022,10.26. 접속

우리나라는 「2050 탄소중립 추진전략('20.12)」 수립을 통해 국가 탄소중립의 방향성을 제시하고 있으나, 해당 국가전략 이행에 따른 온실가스 감축효과 분석연구는 미비한 수준이다. 특히, 국가 예산을 편성함에 있어 탄소의 환경적·경제적 가치를 동시에 고려해야 한다는 탄소중립기본법 제24조 ‘온실가스감축인지 예산제도’가 본격적으로

시행됨에 따라 R&D 단계에 있는 기술의 온실가스 분석모형 개발이 필요한 상황이다. 실제로 2020년 12월에 발표된 탄소중립 추진전략에 따르면 [그림 1-2]와 같이 신기술 개발·적용에 따른 온실가스 감축 변화 확인을 위한 온실가스 분석모형 개발의 필요성을 강조하고 있다. 향후 국가 탄소중립을 위한 기술개발 전략을 수립하고 이행하는 과정에서 유망 신기술 출현이 예상됨에 따라 지역별, 산업 영역별로 기술 적용에 의한 온실가스 배출량 감축효과를 정량적으로 측정할 수 있는 방법론이 필요한 상황이다.

[그림 1-2] 2050 탄소중립 추진전략에 따른 온실가스 분석모형 개발의 필요성

② 지원방식체계

- 핵심기술 분야 R&D 성과 통합 연계 및 효과적 지원체계 구축·운영
  - (지원방식) 목표를 명확히 설정하는 '임무지향 R&D' 및 실증 단계까지 지원하는 '순주기 R&D' 추진
    - 에너지 공급산업건물수송 등 LEDS 부문별 감축 지원 목표를 명확히 설정
  - (효과분석) 부문별 신기술 개발·적용에 따른 온실가스 감축 변화 확인을 위한 '온실가스 분석모형' 개발
 

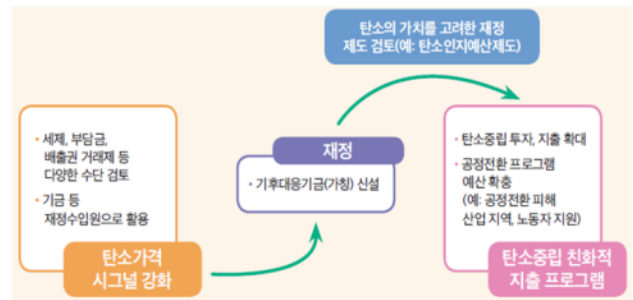
혁신기술  
원천·기반 연구

← R&D 성과 통합 실증  
추가 R&D 수행 →

융합 연구, 통합운전,  
성능 평가

←

온실가스  
분석모형
  - (추진체계) R&D 방향성 및 목표, 성과 등은 국가과학기술자문위 산하 '탄소중립 R&D 특위(신설)'를 통해 관리



출처 : 2050 탄소중립 추진전략('20.12)

온실가스 분석모형을 개발하기 위해, 분석 범위를 정의하는 것이 중요하다. 온실가스 배출량은 크게 직접배출 및 간접배출로 구분할 수 있다. 직접배출(Scope 1)은 사업장 내에서 발생하는 온실가스로 정의할 수 있으며 간접배출은 전력 및 열 사용에 따른 배출(Scope 2)과 원료 사용 등 전 Supply chain에서 발생하는 배출(Scope 3)로 정의한다.

국내 온실가스 배출권거래제에서는 Scope 1, 2만을 고려하고 있으나, EU 탄소국경조정제도(Carbon Border Adjustment Mechanism; 이하 CBAM), 新 배터리 지침, 미국의 공정전환 및 경쟁법(Fair Transition and Competition Act) 등에서는 전과정평가(Life Cycle Assessment, 이하 LCA)를 기반으로 Scope 3 배출량까지 고려하는 것을 강조하고 있다.

특히 국제표준화기구(International Organization for Standardization; 이하 ISO) 환경경영표준화 기술위원회(Technical Committee 207; 이하 TC 207)에서는 2020년부터 PAS 2060을 기반으로 탄소중립 정량화를 위한 표준인 ISO 14068을 신규 제정 중이며 해당 표준에서는 배출권거래제에서 다루고 있는 직접 및 간접(에너지 사용) 배출량 개념을 넘어서 LCA 기반의 탄소배출량을 포함하도록 하고 있다.




[그림 1-3] ISO/TC 207에서 제정 중인 탄소중립 국제표준

← ICS ← 13 ← 13.020 ← 13.020.40

# ISO/CD 14068

## Greenhouse gas management and climate change management and related activities — Carbon neutrality

### General information

Status :  Under development

Edition : 1

Technical Committee : ISO/TC 207/SC 7 Greenhouse gas and climate change management and related activities

ICS : 13.020.40 Pollution, pollution control and conservation



This standard contributes to the following Sustainable Development Goals:



출처 : <https://www.iso.org/standard/43279.html>, 2022.10.26. 접속

이에 따라 본 연구에서는 탄소중립 기술별 특성 및 유망 신기술의 특성을 반영할 수 있는 LCA 중심의 탄소발자국 산정 시뮬레이터를 제시하고자 한다.

## 2. 연구 목적

본 연구의 최종목표는 탄소중립 기술 대상 LCA 중심의 온실가스 배출량 산정 시뮬레이터 개발 및 활용방안 제시에 있다. 총 2개년에 걸쳐 진행되는 본 연구의 1차년도 목표는 온실가스 감축 분야 내 에너지 생산 부문 기술의 탄소발자국 산정 시뮬레이터 개발 및 활용방안을 제시하는 것이다.

<표 1-1> GTC 탄소발자국 시뮬레이터 개발 및 활용 계획

구분	1차년도	2차년도
기술범위	- 바이오에너지 기술	- 에너지 분야 기술범위 확대(태양광, 풍력 등)
개발	- 주요 투입/산출 항목 조사 - 원료, 부자재 등 LCI DB 조사 및 연계 - 프로토타입 시뮬레이터 개발	- 1차년도 LCI DB 개선 및 추가 - 시뮬레이터 기능 고도화
적용	- Ecoinvent DB 활용한 검증 - 바이오에너지 R&D 탄소발자국 산정 수요자 제공	- 기관 내부 정보시스템(녹색기술 Data-Lab. 등) 연동을 통한 온실가스 배출량 평가시스템 구축

본 연구에서 개발된 프로토타입 시뮬레이터는 탄소중립 에너지 연구 개발 이전 단계에서 전과정 온실가스 배출량을 산정할 수 있으며, 국내 기존기술 대비 신기술에 대하여 LCA를 기반으로 탄소중립의 효과성을 정량화할 수 있는 시뮬레이션 툴로써 활용될 수 있다. LCA에 대한 전문지식이 없는 연구개발자용 S/W라는 것이 장점이자 연구 차별성이며, 정부출연연구소 부문에서 R&D 단계부터 온실가스 감축효과를 선제적으로 제시함으로써 정책입안자의 의사결정에도 기여할 수 있다.

## 제 2 절 연구내용 및 추진체계

### 1. 연구내용

- (방법론 및 동향분석) 탄소발자국 산정방법론 및 국제표준화·정책·시물레이터 개발 동향분석을 통한 시물레이터 개발 기반 구축
  - 탄소발자국 및 LCA 방법론 분석을 통하여 시물레이터 개발 시 중점 고려사항 도출
  - 탄소발자국 국제표준화 및 국내외 정책동향 분석
    - (표준화) ISO/TC 207에서 제정 및 신규 제·개정 중인 표준화동향 분석
    - (정책동향) EU, 미국, 한국에서 추진 중인 탄소발자국 정책동향 분석
  - 탄소발자국 및 LCA 시물레이터 개발 동향 분석을 통한 LCA에 대한 전문지식이 없는 연구개발자용 시물레이터 개발 방향성 제시
  
- (시물레이터 개발) 바이오에너지 탄소발자국 시물레이터 개발
  - 바이오에너지 기술분류체계 조사를 통한 연구대상 기술(6개 기술) 선정
  - 바이오에너지 기술 탄소발자국 산정방법론 조사
    - IPCC 2006 및 2013에서 제시하고 있는 지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP) 조사 및 선정
    - 바이오에너지 LCA 선행연구 및 가이드라인 조사를 통한 기능단위, 시스템경계, 할당방법 및 토지이용변화 고려 방법 설정
  - 바이오에너지 기술별 주요 투입/산출 항목 수집
    - (Step 1) 바이오에너지 기술별 LCA 문헌 및 LCI DB 조사를 통한 Gate-to-Gate(GtG) 투입/산출 데이터 리스트 구축
    - (Step 2) 기술별 전문가 설문조사를 통한 주요 투입/산출 항목 확정
  - 주요 투입/산출물별 LCI DB 연계 방안 마련
    - (Step 1) Feedstock 별 주요 수입국 및 국내 생산 동향 파악을 통한 주요국 선정
    - (Step 2) 주요국별 Feedstock, 부원료(예. 촉매), 유틸리티, 폐기물/폐수처리 LCI DB 조사
  - 바이오에너지 탄소발자국 시물레이터 개발 및 검증
    - LCI DB 연계하여, 바이오에너지 생산공정 데이터 입력 시 자동으로 탄소발자국 및 감축효과 시각화
    - 연구논문 內 PFAD기반 바이오디젤 GTG를 바탕으로 시물레이터 시범 적용 및 검증

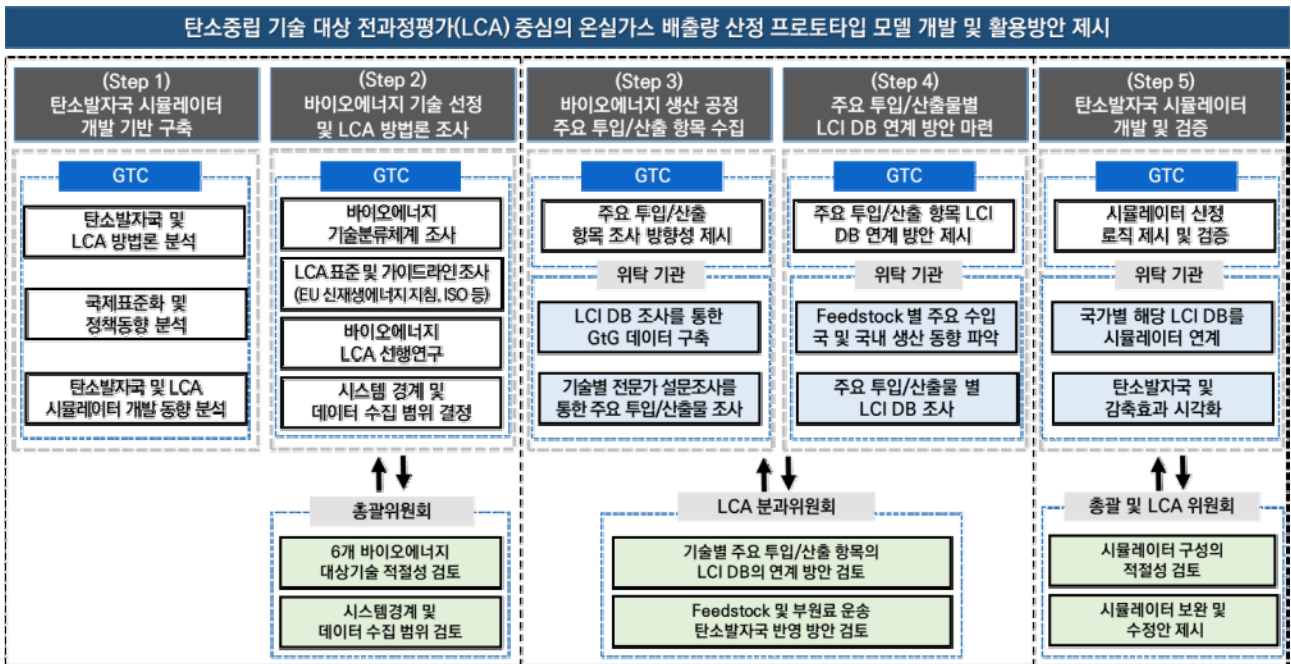
### 2. 추진체계 및 프로세스

본 연구 추진을 위해서 국가녹색기술연구소는 탄소발자국 시물레이터 개발을 위한 기반을 구축하고 LCA에 대한 전문지식이 없는 연구개발자용 시물레이터 개발 방향성을 제시하였다. 또한 연구대상 기술에 대한 탄소발자국 선행연구를 수행하고 LCI DB 연계 방안을 제시하였다. 본 시물레이터 개발은 신규성이 매우 강한 성격을 지니므로 최종산출물에 대한 외부 공신력의 확보가 가장 중요한 요소이다. 따라서 연구진에서는

연구수행 과정에서의 적절성 및 연구결과의 효과성 제고를 위한 외부전문가 및 위탁기관과의 협조체제를 구축하였다.

외부전문가는 총괄위원회 및 LCA 분과위원회로 총 2개의 위원회를 구성하였다. 총괄위원회는 대상기술의 적절성을 검토하고 대상기술에 대한 탄소발자국 시뮬레이터 개발을 위한 시스템경계 및 데이터 수집 범위를 검토하였다. LCA 분과위원회는 상세한 방법론 검토를 위한 전문가 집단으로 기술별 투입/산출 항목 LCI DB의 적절성 및 연계 방안을 검토하였다. 마지막으로 2개의 위원회 모두 시뮬레이터 구성 및 기능의 적절성을 검토하도록 검증 체계를 구성하였다.

[그림 1-4] 추진체계 및 프로세스



## 제2장 국내외 탄소발자국 동향 분석



## 제 2 장 국내외 탄소발자국 동향 분석

### 제 1 절 탄소발자국과 전과정평가 방법론

탄소발자국(Carbon footprint)이란 LCA를 기반으로 정량화하며, 제품의 원료채취, 생산, 수송·유통, 사용, 폐기 등 전과정에서 발생하는 온실가스가 기후변화에 미치는 영향(kg CO<sub>2</sub>-eq)을 의미한다.

[그림 2-1] LCA 및 탄소발자국 산정을 위한 전과정 단계



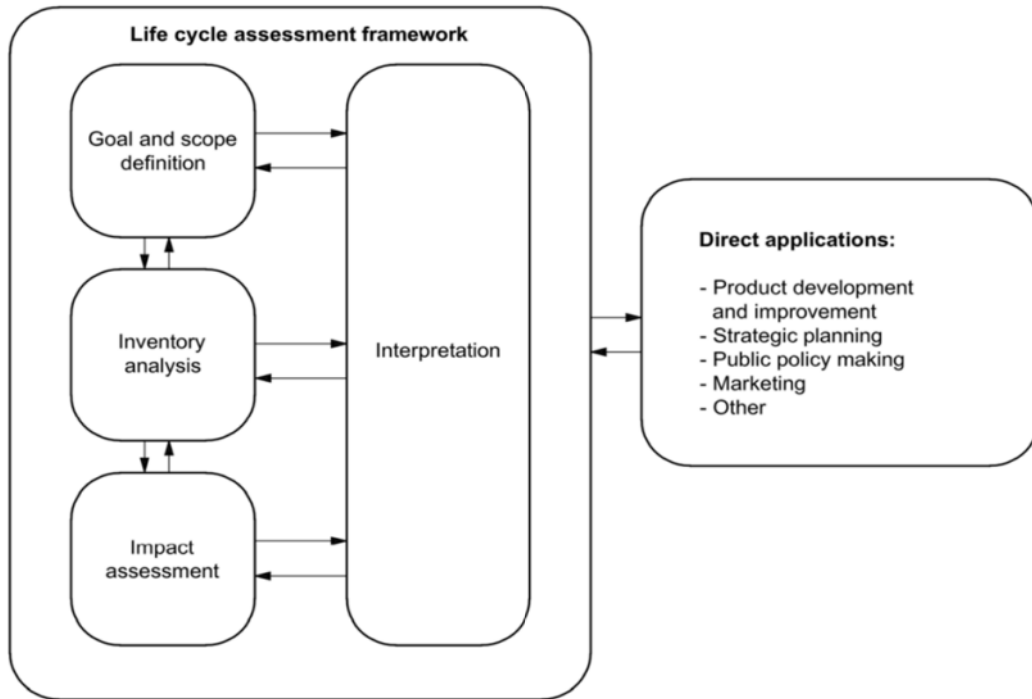
LCA는 제품 및 시스템의 전과정에 걸쳐 발생하는 잠재적인 환경영향을 정량화할 수 있는 평가기법으로 국제적으로 표준화되어 있는 방법론이다. LCA를 통하여 다양한 환경영향범주(Impact category)에 대한 영향을 정량화할 수 있으며 그 중 지구온난화(Global warming)에 영향을 주는 것을 흔히 탄소발자국으로 정의한다.

탄소발자국을 산정하는 첫째 목표는 제품의 전과정에 걸쳐 발생된 온실가스 배출량을 정량적으로 파악하고, 이들이 지구온난화에 미치는 영향 정도(온실가스 영향값)을 산정하는 데 있다. 또 다른 목표는 제품 전과정 상에서 지구온난화에 미치는 영향이 큰 투입물(input)/배출물(output) 파라미터(예: 소재, 에너지, 수계/대기/토양으로의 배출(emission))와 공정, 부품, 전과정 단계(예를 들어 사용, 유통, 폐기단계 등) 및 활동(예를 들어 재활용, 매립, 소각 등) 등을 규명하는 데 있다. 따라서 탄소발자국 산정을 위해 LCA 수행은 필수적이다.

LCA는 목적 및 범위정의(Goal and scope definition), 전과정 목록분석(Life cycle inventory: 이하 LCD), 전과정 영향평가(Life cycle impact assessment: 이하 LCIA), 전과정해석(Life cycle interpretation)의 4단계로 구성된다<sup>1)</sup>. [그림 2-2]는 LCA 기본원칙에 대한 국제표준인 ISO 14040을 인용한 그림으로, 이들 4단계 사이의 관계를 보여주고 있다. 각 단계에 대한 간략한 설명은 아래에 제시하였고, 수행방법 등과 같은 상세한 내용은 각 단계별로 탄소발자국에 초점을 두고 기술하였다.

1) ISO 14040(2006), Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework

[그림 2-2] 국제표준에서 정의하고 있는 LCA framework



출처 : ISO 14044(2006)

LCA를 수행하는 이유, 대상 청중 및 공정, 기술, 제품을 정의하는 것이 목적 정의에 포함되며 범위 정의에서는 시스템경계, 기능단위 등에 관하여 정의하게 된다. 시스템경계가 결정되면 각 단위공정별로 투입물인 원자재 및 에너지와 산출물인 제품, 부산물 및 대기, 토양, 수계 배출물을 수집한다. LCI 결과는 시스템 내의 각 단위공정에서 제품까지의 투입물과 산출물의 기여도에 따라 계산된 후 최종 산출된다. 이처럼 LCI에서는 제품 전과정에서 발생하는 환경부하 정보를 정량적으로 산출한다.

LCIA 단계에서는 시스템의 환경부하를 토대로 환경영향이 평가된다. 해당 영향범주에 상응인자를 적용하여 환경영향을 정량화한다. 이 과정을 특성화(Characterization)라고 한다. 정규화(Normalization) 및 가중치 부여(Weighting)를 수행하여 환경영향에 대한 정보를 더 체계적으로 정리할 수 있다. LCIA는 이처럼 제품에 의해 발생하는 환경영향에 대한 정보를 제공한다.

전과정해석 단계는 분석된 영향평가 결과를 바탕으로 LCA 수행목적에 따라 해석하는 단계다. LCA 수행목적에 따라 기여도 분석을 통하여 환경영향이 가장 높은 단위공정, 전과정 단계 등을 분석할 수 있으며 이를 통하여 개선 방향 제시, 환경성 정보 제공을 할 수 있다.



## 1. 목적 및 범위 정의

### 1.1 목적 정의

LCA 수행자는 목적에 대하여 분명히 해야 하며, 해당 결과를 어떤 분야에 적용할 것인지, 잠재적인 대상 청중은 누구 인지를 명확히 해야 한다. 예를 들어 특정 기술 개발 시 기존기술과 비교하여 환경성 우위를 제시할 수도 있으며 Value Chain에 있는 고객사에게 특정 제품에 대한 환경성 정보를 제공하는 것이 목적이 될 수 있다. 수행목적에 따라 범위가 정의되므로 LCA 수행 시 목적을 먼저 명확히 해야 한다.

### 1.2 범위 정의

연구범위 정의는 연구 대상이 되는 제품시스템, 시스템경계, 기능단위 및 영향평가를 진행할 영향범주에 대하여 정의하는 것이다. 특히 LCA 결과는 기능단위를 기준으로 산정되며, 설정한 시스템경계에 따라 데이터 수집 범위가 달라지므로 범위 정의에서 가장 중요한 부분이라고 할 수 있다.

#### 가. 기능단위(Functional unit)

LCA에서 '기능단위'라는 용어는 연구 중인 시스템의 기능을 설명하고 연구의 기반이 되는 분석 단위를 나타내며, 기능단위의 선택은 연구 목표에 따라 결정되고 연구 대상 시스템과 주요 목적 기능을 대표해야 한다. 특히 기존 및 신기술에 대하여 비교하여 환경성에 대한 우위를 제시하고자 할 경우 두 시스템의 기능단위는 동일 해야 한다. 예를 들어, 샴푸의 기능만을 가진 제품 A와 컨디셔너(conditioner)의 기능을 함께 가진 제품 B에 대한 비교 LCA를 수행할 경우, 동일 기능단위를 설정하기 위한 대안은 2가지이다. 컨디셔너 기능을 제품 A에 추가하거나, 컨디셔너 기능을 제품 B에서 삭제하여 동일한 기능단위로 맞추는 것이다. 이후 대안에 따라 시스템경계를 설정하고, 해당 투입 및 산출물 데이터를 수집한다.

#### 나. 시스템경계(System boundary)

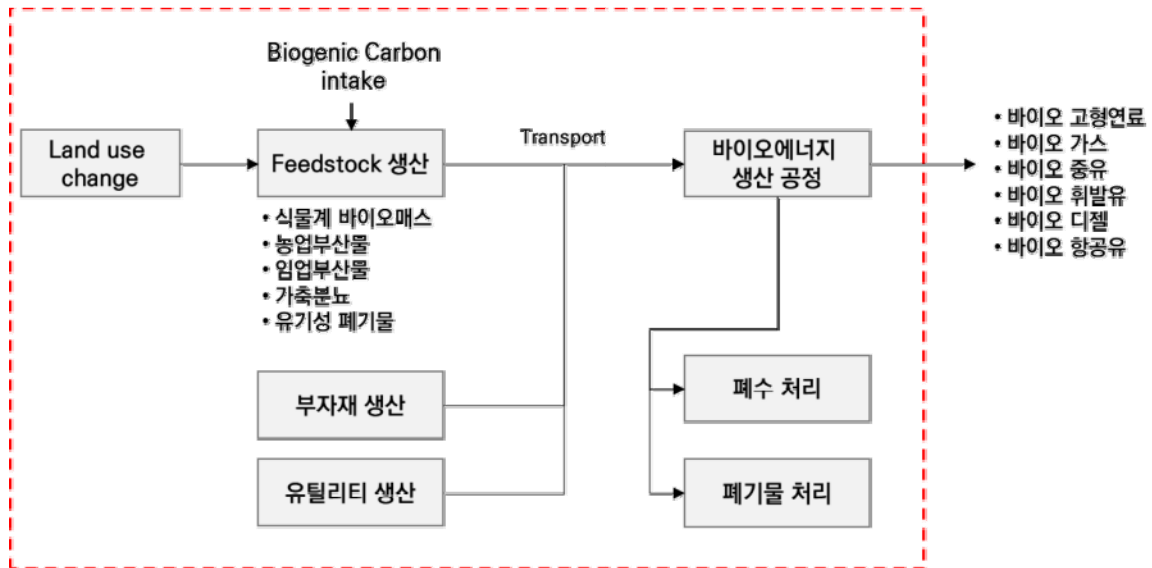
LCA에서 시스템경계 설정은 가장 중요한 부분이며, 설정한 기능단위에 따라 분석하고자 하는 단위공정 및 전과정 단계의 집합으로 정의할 수 있다. 시스템경계는 비교 대상과 기준 시스템에서 모든 전과정 단계, 에너지 사용, 물질 흐름 및 온실가스 배출을 포함해야 하며, 유효한 비교를 위해 동일한 자원으로 시작하여 동일한 에너지 서비스를 제공하도록 경계를 설정해야 한다.

일반적으로 시스템경계는 제품 및 서비스의 전과정을 고려할 수 있도록 원료채취, 제조, 운송, 사용, 폐기단계까지를 모두 포함하는 것으로 하나 제품 및 서비스 특성을 고려하여 별도로 정의할 수 있다. Cradle to gate는 원료채취부터 제품생산 후 출하 직전까지의 공정만을 고려하는 것을 의미하며, 일반적으로 하위공정을 추적하기 힘든 B2B 기업 제품 분석 시 활용하고 있다. Cradle to grave는 원료채취부터 제품의 폐기단계까지의 모든

공정을 고려하는 것을 의미하며, 일반적으로 하위공정까지 추적할 수 있는 B2C 기업 제품 분석 시 활용하고 있다. 수송연료에 대한 시스템경계 설정 시에는 Cradle to gate는 Well to tank, Cradle to grave는 Well to wheel로 표현하기도 한다.

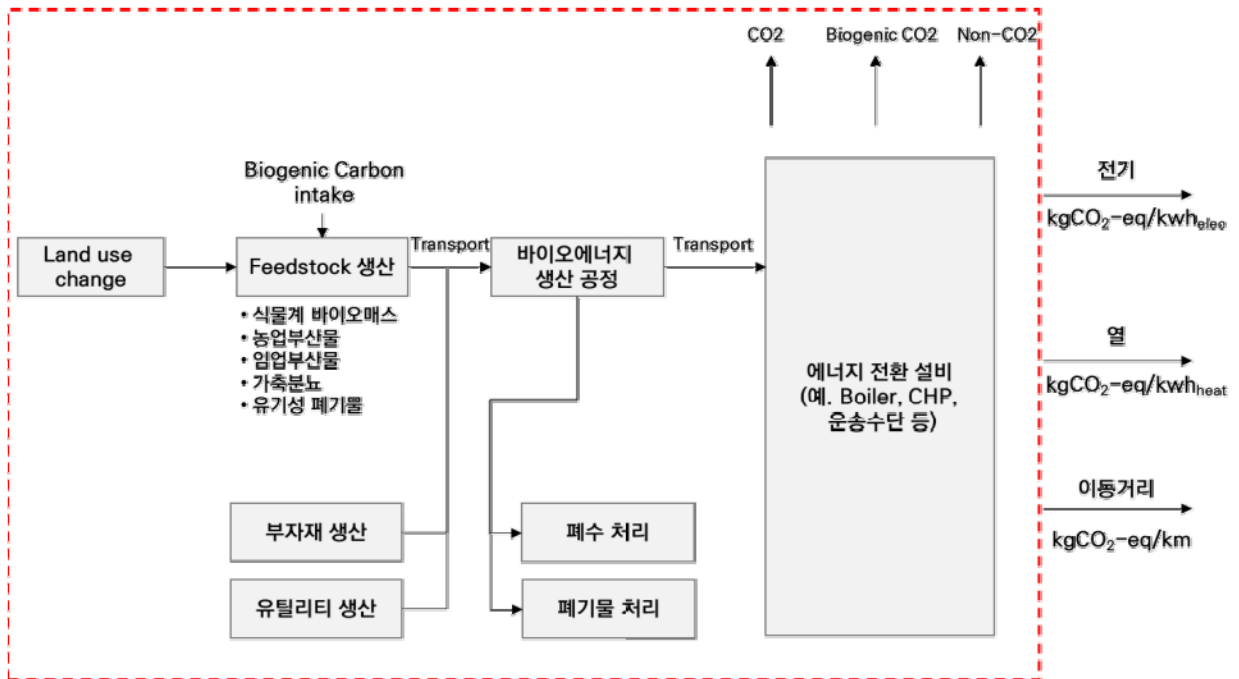
바이오에너지 시스템경계를 예시로 Cradle to gate 및 grave에 대한 차이점을 설명하고자 한다. 바이오에너지의 전과정 단계는 바이오매스 경작, 운송, 바이오에너지 생산, 사용으로 구분할 수 있을 것이다. 이때, 바이오연료의 경우 사용형태에 따라 전기, 열, 수송연료의 형태로 변환된 후 연소되기 때문에 사용 및 폐기단계를 동일하게 볼 수 있다. 바이오에너지 LCA 시스템경계를 Cradle to gate까지 정의할 경우 [그림 2-3]과 같이 바이오연료 생산공정까지를 포함하는 것으로 정의할 수 있다. 이 경우에는 바이오매스 경작과정에서 흡수하는 이산화탄소는 바이오연료 자체에 포함되어 결과값이 도출될 것이다.

[그림 2-3] 바이오에너지의 Cradle to Gate 시스템경계 예시



반면, Cradle to grave까지로 정의할 경우 [그림 2-4]와 같이 바이오연료를 활용하여 에너지를 생산하는 에너지전환 설비까지를 포함하게 되며, 이때 바이오연료 연소로부터 발생하는 환경영향까지 모두 고려하게 된다.

[그림 2-4] 바이오에너지의 Cradle to Grave 시스템경계 예시



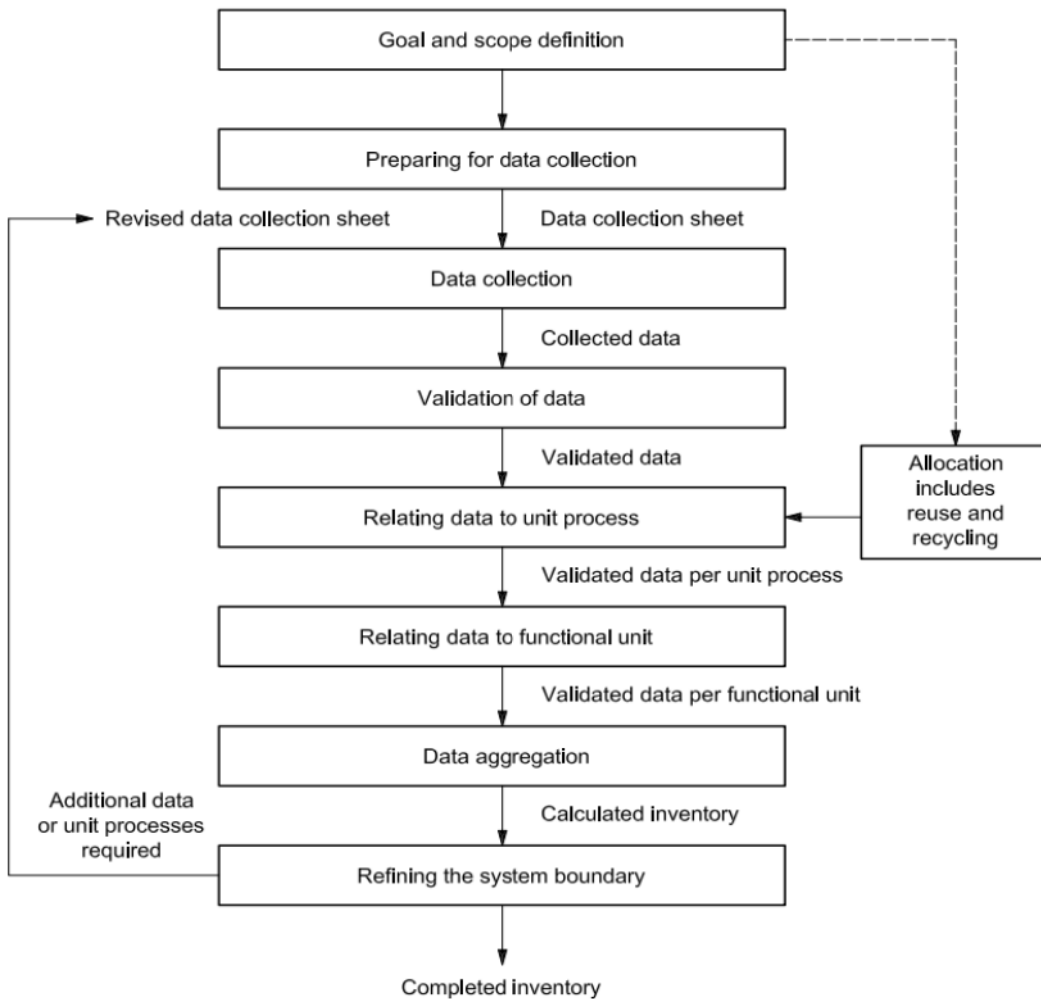
이렇듯 동일하게 바이오에너지에 대하여 LCA를 수행함에도 불구하고 시스템경계를 어떻게 설정하는지에 따라 결과값이 상이하므로, 분석 목적에 따른 시스템경계 설정이 중요하다.

## 2. 전과정 목록분석

전과정 목록분석 단계에서는 설정한 시스템경계에 따라 투입되는 원료 및 에너지와 시스템에서 배출되는 모든 제품, 부산물 및 수계/토양/대기 배출물의 종류와 양을 규명하고 이를 기능단위 기준으로 나타낸다. [그림 2-5]는 ISO 14044에서 제시된 전과정 목록분석 수행 절차이며 ISO 14044 및 14067<sup>2)</sup>에서 강조하고 있는 데이터 수집, 할당, 토지이용변화에 사항을 중점적으로 아래에 설명하였다.

2) ISO 14067(2018), Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification

[그림 2-5] 전과정 목록분석 수행 절차



출처 : ISO 14044(2006)

## 2.1 데이터 수집

제품에 대한 LCA를 수행할 경우 일반적으로 생산담당자가 진행하게 되며, R&D 단계에 있는 기술의 경우 기술개발 담당자가 진행하게 된다. 이때 데이터 수집을 위하여 설문서를 활용하게 되며, 일반적으로 수집대상 공정, 투입물(원료, 부자재, 에너지, 운송) 및 산출물(제품, 부산물, 대기, 수계, 토양 배출물) 항목 및 양이 설문서의 주요 항목이 된다.

데이터 수집대상 기간은 모든 단위공정에서 동일해야 하며 일반적으로 데이터 수집기간은 1년간의 데이터를 수집하여 계절적 특성 등에 의한 차이가 없도록 고려한다. LCA 대상 제품 제조공정과 연결된 상위공정 데이터 수집 시 원재료 취득단계부터 원료로의 가공까지의 데이터를 수집해야 하지만 현실적으로 어려운 경우가 많다. 이러한 경우에는 국가에서 구축되어 있는 LCI DB를 사용할 수 있다.

수집된 데이터는 공정 또는 전과정 단계별로 검증을 거쳐야 한다. 이때, 물질 및 에너지 수지를 확인함으로써 검증을 진행할 수 있다.

## 2.2 공공 전과정목록 데이터베이스(LCI DB)

위에서 서술한 바와 같이, 제품/공정/기술에 대하여 LCA 수행 시 현실적으로 모든 Supply chain에 존재하는 데이터를 수집하는 것은 불가능하다. 이에 따라 [그림 2-6]과 같이 국가 및 분야별로 사용할 수 있는 LCI DB가 구축되어 있으며 이를 유료 또는 무료로 제공하고 있다.

[그림 2-6] 국내외 구축되어 있는 LCI DB 현황



출처 : <https://www.openlca.org/lca-data/>, 2022.10.26. 접속

LCI DB의 시스템경계는 원료물질의 채취에서 원료 제조, 에너지 사용 및 공정까지 포함되어 있다. 이때 공정은 제조공장의 출하 직전까지의 모든 활동을 포함한다. 예컨대, 바이오매스인 옥수수 생산의 경우 경작에 필요한 토지이용 및 경작과정에서 필요한 모든 단위공정과 활동들이 시스템경계에 포함되어 있다. 이처럼 시스템경계에 대한 정보가 포함된 공공 LCI DB의 사용은 전과정 목록데이터의 수집에 대한 부담을 덜어줄 수 있다.

## 2.3 할당

각 단위공정 별로 수집 및 검증된 데이터를 기능단위로 정규화함으로써 환경부하를 정량화할 수 있다. 예를 들어, 연간 바이오디젤 100MJ 생산 시 투입 및 배출되는 각각의 총량을 100MJ로 나눔으로써 1MJ 바이오디젤 생산 시 발생할 수 있는 환경부하를 정량화하는 것이다. 하지만 해당 공정이 주요 제품 이외에 부산물을 배출할 경우에는 전체공정에서 발생하는 환경부하를 부산물에 분배해야 할 것이다.

LCA 연구에서 할당은 제품시스템에서 두 가지 이상의 산출물이 발생하는 경우 대상제품이 아닌 다른 제품(부산물 등)으로 인한 환경부하를 제품시스템에서 제외함으로써

대상제품의 환경부하를 적절하게 분배하여 정량화하는 것을 의미한다. 예를 들어, 바이오디젤 생산공정에서 바이오디젤과 글리세린이 동시에 생산될 경우 모든 공정의 환경부하를 바이오디젤 및 글리세린에 적절한 기준을 통해 분배하는 것을 의미한다.

<표 2-1> ISO 14044 및 14067에서 제시하고 있는 할당 우선순위

단계	설명
1단계	1) 할당 해야 하는 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 산출물은 서로 다른 제품 또는 기능 간의 기본 물리적 관계(예. 질량, 에너지함량, Carbon contents 등)를 반영하는 방법
3단계	물리적 관계로 만으로 할당이 불가능할 경우, 투입량은 제품과 기능 간에 서로 다른 관계(예. 경제적 가치)를 반영하는 방법으로 할당되어야 함

ISO 14044 및 14067 표준에서는 <표 2-1>과 같이 가능하면 공정을 세분화하거나와 같이 시스템 확장을 통해 할당을 피해야 한다고 권장하고 있으나, 각 제품별 결과값을 제시하기 위해서 할당은 필수 불가결한 요소이다.

할당을 피할 수 없는 경우 물리적 또는 경제적 관계에 기반한 할당 요소를 사용하여 제품과 부산물 간에 환경부하를 할당할 수 있으며, <표 2-1>과 같이 우선순위를 제시하고 있지만 일반적으로 연구자 판단에 따라 할당 기준을 선택하여 수행한다. 이때 경제적 가치로 할당하는 것은 제품 및 부산물의 시장가격이 생산공정에 투입 및 배출되는 환경부하가 비례하여 배분된다는 가정을 기반으로 한다.

앞서 국제표준에서 제시하고 있는 할당 기준이 명확하지 않다고 서술한 바와 같이, 국제표준에서도 제품 및 기술군별 별도의 제품범주규칙(Product Category Rule, 이하 PCR)이 존재하는 경우 이를 활용 할 수 있다고 명시하고 있다. 실제로 대표적인 화학업체인 BASF의 경우 BASF에서 생산하는 제품의 PCR이 존재하는 경우에는 우선적으로 해당 가이드라인을 따라 할당하고 있으나, 부재 시 2가지 산출물 간의 시장가격이 크게 차이 날 경우에는 경제적 가치에 따라 할당을 진행하고 있다.

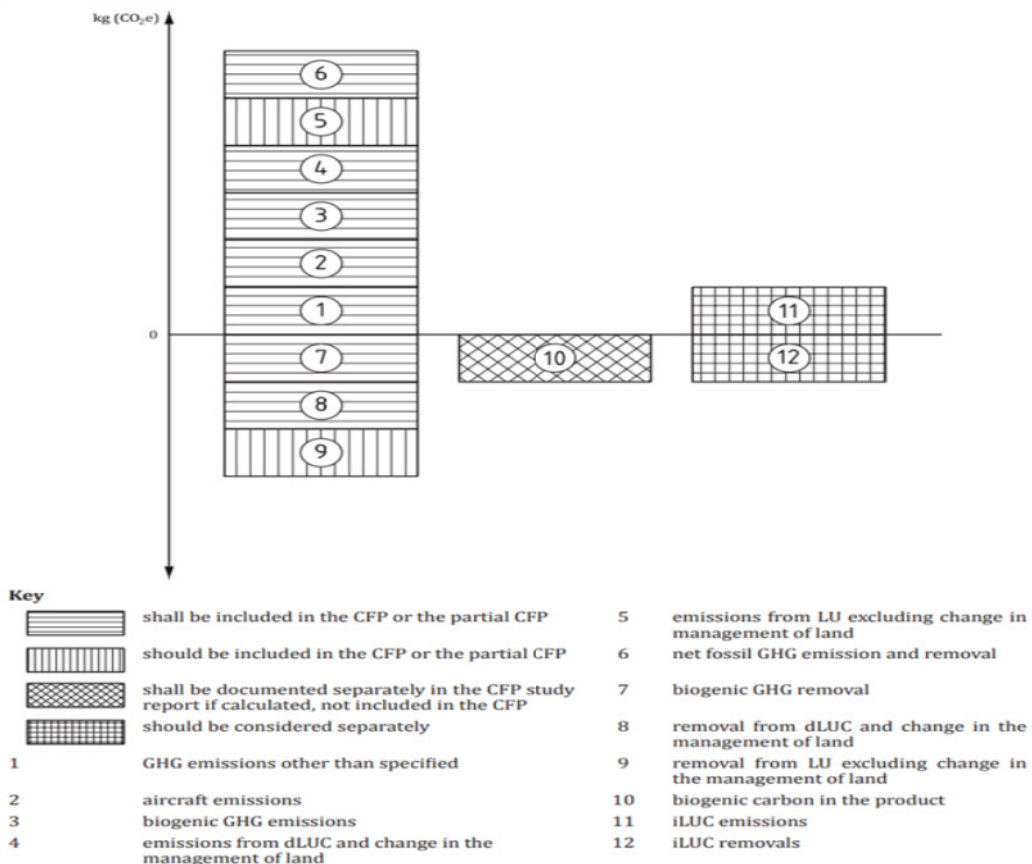
## 2.4 토지이용변화

ISO 14067에서는 전과정 목록분석 단계에서 토지이용변화에 따른 탄소배출량 산정을 강조하고 있다. 토지이용변화(Land Use Change; 이하 LUC)는 직접(direct land use change; 이하 dLUC) 또는 간접(indirect land use change; 이하 iLUC)의 두 가지 방식으로 발생할 수 있으며, 이는 온실가스 배출량 산정에 중대한 영향을 미칠 수 있다.

일반적으로 dLUC는 바이오매스를 생산하기 위해 토지 용도를 변경하는 것으로 LCA의 시스템경계 내에 포함되며, iLUC는 원래 사용하던 토지 용도(예: 식량 생산)에서 현재 바이오매스 생산으로 용도가 변경된 것으로 인해 시스템경계 외부에서 발생하는 토지 이용의 변화를 나타낸다. 예컨대, 농부 A가 밀 재배에서 바이오 원료인 스위치그래스 재배로 전환한 것은 dLUC의 예이며, 이러한 dLUC로 인해 밀 공급이 감소하여 밀 가격을 상승시켜 밀 수요를 다소 감소시키고 다른 곳에서 밀 생산량을 증가시켜, 농부 B가 농부 A 행동의 결과로 자신의 목초지를 밀 경작으로 전환한다면 iLUC를 초래하게 되는 것이다.

이러한 이유로 ISO 14067에서도 아래 [그림 2-7]에 제시한 바와 같이 탄소발자국 산정 시 dLUC는 필수(Shall)적으로 고려할 요소로 규정하고 있으며, iLUC의 경우 권고(Should) 사항으로 제시하고 있다.

[그림 2-7] 탄소발자국 산정 시 필수(Shall) 및 선택적(Should)으로 고려해야 할 요소

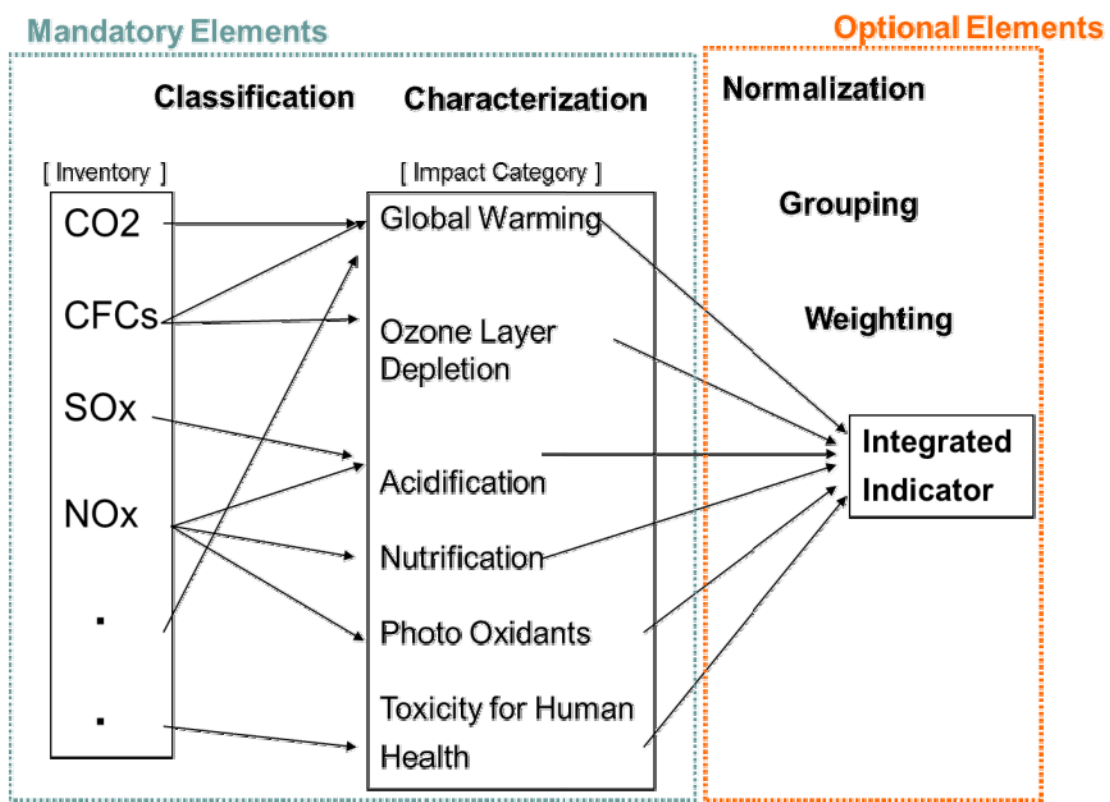


출처 : ISO 14067(2018)

### 3. 전과정 영향평가

LCIA는 LCI 결과를 이용하여 제품시스템의 잠재적인 환경영향을 평가하는 것이 목적이며, 환경에 미치는 영향 정도를 정량적이고 정성적으로 산정하여 주어진 시스템이 환경에 미치는 영향을 종합적으로 평가하는 것을 포함한다. 전과정 영향평가는 분류화(Classification), 특성화(Characterization), 정규화(Normalization), 가중치부여(Weighting)의 4단계로 구성된다. 이 4가지 단계에서 정규화와 가중치부여는 선택적인 과정이며, 분류화와 특성화는 전과정 영향평가에서 필수적인 과정이다. 이에 본 보고서에서는 분류화 및 특성화에 대해서만 다루도록 한다. [그림 2-8]은 전과정 영향평가의 요소들 간의 상호관계를 보여준다.

[그림 2-8] 전과정 영향평가 단계별 상호관계



#### 3.1 분류화

분류화는 목록분석에서 도출된 결과를 해당 환경영향범주에 연결시키는 과정으로 목록분석 결과에서 나온 각 투입, 산출 항목을 예상되는 환경영향범주에 맞게 연결하는 것이다. 또한 전과정 영향평가에서 고려되는 환경영향범주를 결정하는 것 또한 중요한 과제이다. LCA에서는 다양한 영향범주를 고려할 수 있으며 환경부 환경산업기술원에서 지원하고 있는 환경성적표지작성 지침에서는 7개의 영향범주를 다루고 있으며, EU Product Environmental Footprint 제도에서는 총 16개의 영향범주를 고려한다. 영향범주는 연구의 목적에 따라 선택하여 사용할 수 있으며, 탄소발자국을 산정하는 것이 목적이라면 지구온난화에 대한 영향만 고려하게 된다.



### 3.2 특성화

분류화 단계가 완료되면, 영향범주에 해당하는 각 목록항목이 야기하는 환경영향을 정량화한다. 해당 영향범주에서 주어진 목록항목의 기여도를 특성화시켜주는 특성화 계수(characterization factor)를 정량화하는 수단으로 사용한다. 특성화 계수는 주어진 영향범주에서 해당 목록 항목 간의 상대적인 기여도를 나타내 준다. 각 항목의 기여도가 정량화되면, 각각 정량화된 영향이 같은 차원이나 단위를 갖기 때문에 동일 영향범주 내에서 정량화된 영향을 통합하거나 추가할 수 있다. 그리하여 제품시스템의 전과정 목록분석 결과로부터 주어진 영향범주의 환경영향을 계산할 수 있다.

주어진 영향범주에서 목록항목에 따라 변하는 환경영향을 정량화하는 데 특성화 계수 또는 상응인자가 핵심 요소이다. 특성화 계수는 화학에서의 등가 원리(equivalency principle)에 기반한다.

예컨대, 탄소발자국 산정 시 CO<sub>2</sub>와 CH<sub>4</sub>가 지구온난화에 영향을 준다는 것을 알고 있으나 그 기여도는 다르다. 대기 과학 연구자들은 일반적으로 1g의 CH<sub>4</sub>는 지구온난화에 CO<sub>2</sub> 23g과 같은 기여도를 갖는다는 것을 알아냈다. 이것은 지구온난화에 영향을 주는데 1g의 CH<sub>4</sub>는 CO<sub>2</sub> 23g과 등가임을 의미한다. 그러므로 1g CH<sub>4</sub>가 지구온난화에 미치는 영향은 23g CO<sub>2</sub>-eq라고 표현할 수 있다. 그래서 CH<sub>4</sub>의 상응인자 또는 특성화 계수는 23g CO<sub>2</sub>-eq이고 이 값은 CH<sub>4</sub>의 지구온난화지수(Global Warming Potential, 이하 GWP)라고 말한다. IPCC에서는 주기적으로 온실가스의 GWP를 업데이트하여 공개하고 있으며, 탄소발자국 산정 시에 일반적으로 이를 활용하여 산정한다.

특성화 계수를 이용하면, 주어진 영향범주에 목록항목이 미치는 환경영향은 식 (1)과 같이 표현하여 정량화할 수 있다.

$$CI_{i,j} = Load_j \times eqv_{i,j} \quad (1)$$

여기서,

CI<sub>i,j</sub> = j번째 목록항목이 i번째 영향범주에 미치는 특성화된 환경영향(characterized impact)의 크기, g x-eq/fu

fu = 기능단위

Load<sub>j</sub> = j번째 목록항목의 양(환경부하량), g/fu

eqv<sub>i,j</sub> = i번째 영향범주에 속한 j번째 목록항목의 상응(특성화 계수)인자 값, g x-eq/g

모든 j번째 목록항목들을 합했을 때 i번째 영향범주에 미치는 총 환경영향은 식 (2)처럼 얻게 된다.

$$CI_i = \sum CI_{i,j} = \sum Load_j \times eqv_{i,j} \quad (2)$$

<표 2-2>는 임의의 예를 들어 특성화된 지구온난화 영향(탄소발자국)을 산정하는 예를 제시하였다. 해당 예시는 단위공정 및 특정 전과정 단계의 결과로 볼 수 있으며, 각각의

단위공정 및 모든 전과정 단계별로 적용하여 분석할 수 있다. 특성화를 실행하기 전에는 각 목록항목들에 의한 지구온난화 영향은 알 수 있지만, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CFC11의 목록항목 전체가 유발하는 환경영향은 알 수 없다. 3가지 항목의 부하량 정보가 그 항목들이 유발하는 환경영향의 정도를 의미하는 것은 아니다. 일단 특성화 단계가 완료되면, 각 항목의 정량적인 환경영향 정보뿐만 아니라 총 환경영향 정보를 이용할 수 있게 된다.

<표 2-2> 지구온난화 영향범주(i 영향범주)에 대한 특성화 단계 예시

목록항목(j)	Load <sub>j</sub> (g/fu)	eqv <sub>j</sub> (g CO <sub>2</sub> -eq/g)	Cl <sub>j</sub> (g CO <sub>2</sub> -eq/fu)
CO <sub>2</sub>	1,000	1	1,000
CH <sub>4</sub>	10	23	230
CFC 11	0.01	4,500	45
합계 (∑ Cl <sub>j</sub> )	Cl = ∑Cl <sub>j</sub>		1,275

#### 4. 전과정 해석

전과정 해석단계는 LCA 수행목적에 따라 목록분석 및 영향평가 결과를 분석하여 결론을 도출하는 단계이다. ISO 14044 및 14067에 따르면 전과정해석의 3가지 주요 단계는 다음과 같다. 첫째는 주요 이슈(key issue) 규명, 두 번째는 완전성, 민감도, 불확도 및 일관성 검사를 통한 평가, 세 번째는 제안 및 결론이다.

##### 4.1 주요 이슈(Key issue) 규명

주요 이슈는 일반적으로 제품시스템의 총 환경영향 중에서 기여도가 큰 활동, 공정, 물질, 부품 또는 전과정 단계를 뜻한다. LCA 수행목적 중 하나는 제품시스템의 환경상 취약점을 규명하고, 그 취약점을 개선하는 것이기 때문에 주요 이슈 규명은 제품 환경성을 개선하려는 목적의 LCA에서는 반드시 수행되어야 한다.

제품시스템의 주요 이슈 또는 환경상 취약점 규명에는 기여도분석(Contribution analysis)이 이용된다. 주요 이슈 규명에는 특성화된 환경영향, 가중치 부여된 환경영향 또는 목록분석 결과를 이용할 수 있다. 이 중에서 흔히 특성화된 환경영향평가 결과를 사용한다.

<표 2-3> 바이오디젤의 전과정 단계별 탄소발자국 예시(단위: kgCO<sub>2</sub>-eq/MJ)

목록항목	단위공정(활동)					총합	비율(%)
	dLUC	경작	운송	생산	사용(연소)		
CO <sub>2</sub>	0.2	0.08	0.004	0.03	0	0.314	79.5
CH <sub>4</sub>	0.06	0.005	0.001	0.005	0.001	0.072	18.2
CFC11	0.008	0	0.001	0	0	0.009	2.3
합계	0.268	0.085	0.006	0.035	0.001	0.395	100
비율(%)	67.8	21.5	1.5	8.9	0.3	100	

〈표 2-3〉에서 바이오디젤 제품시스템에 대한 지구온난화의 총 환경영향은 0.395 kgCO<sub>2</sub>-eq/MJ이다. 특성화된 환경영향표의 모든 목록항목들을 제품시스템의 총 환경영향으로 나누어 총 환경영향에 대한 각각의 퍼센트로 표현한다. 표에서 각각의 퍼센트 수치는 제품시스템의 총 지구온난화 영향에 대한 특정 목록항목과 관련된 각 단위공정(활동)들의 기여도를 의미한다.

〈표 2-3〉를 이용해 주요인자를 규명할 때는, 환경영향 중 기여도가 가장 큰 인자를 주요인자라고 할 수 있다. 첫째, 주요 단위공정(활동)의 경우 토지이용변화 및 경작단계라고 해석할 수 있으며 주요 목록항목은 CO<sub>2</sub>이다. 규명된 주요인자는 개선조건으로 반영할 수 있다.

## 4.2 일관성, 민감도, 일관성 검사를 통한 평가

목적 및 범위정의 단계에서는 데이터 품질, 목적, 주요가정, 시스템경계 설정 등과 같은 전과정평가 수행의 기본 전제들이 생성된다. 목록분석 단계에서는 데이터를 수집하고, 전과정 영향평가 단계에서 목록항목들의 영향을 평가한다. 전과정해석 단계의 첫번째 과정에서 주요인자를 규명하였다. 하지만, 이런 모든 결과는 앞에서 정의한 가정, 데이터 품질, 사용된 방법론 같은 기본 전제들을 기초로 한다. 따라서 완전성, 민감도, 일관성 검사를 통해 이런 모든 결과들을 조직적으로 평가할 필요가 있다.

## 제 2 절 탄소발자국 국제표준화 동향

국제표준화기구(ISO)는 1947년에 설립된 비정부기구(NGO)로 학문적, 기술적, 경제적 등 활동 분야에서 국제적으로 통용되는 표준을 개발하고 보급하고 있다. ISO는 1993년 환경경영표준화 기술위원회(Technical Committee; 이하 TC 207)를 설립하고 산하에 6개의 분과위원회(Sub Committee; 이하 SC)를 구성하여 LCA, 환경라벨링, 온실가스경영 및 관련활동 등에 대한 국제표준 제정 중이다. <표 2-4>와 같이 현재까지 총 58건의 표준을 제정하였으며, 현재 신규 14건의 표준을 개/제정 중에 있다.

<표 2-4> ISO/TC 207 분과위원회 및 표준 제정 현황

분과위원회	분과위원회 명칭	제정	제정 중
SC1	(영문) Environmental management systems (국문) 환경경영시스템	10	2
SC2	(영문) Environmental auditing and related environmental investigations (국문) 환경심사 및 조사	3	1
SC3	(영문) Environmental labelling (국문) 환경라벨링	8	1
SC4	(영문) Environmental performance evaluation (국문) 환경성과평가	9	0
SC5	(영문) Life cycle assessment (국문) 전과정평가	15	4
SC7	(영문) Greenhouse gas and climate change management and related activities (국문) 온실가스경영 및 관련 활동	13	6

출처 : ISO 공식 홈페이지<sup>3)</sup>를 바탕으로 저자 작성

본 절에서는 탄소발자국 및 LCA와 가장 관련성이 높은 SC3, SC5, SC7에서 다루고 있는 국제표준화 동향에 관하여 기술하고자 한다.

### 1. 제 3분과위원회(SC3) 국제표준화 동향

ISO/TC207/SC3에서는 환경 분야의 라벨링에 대한 방법을 표준화, 기업의 자가선언 평가표지, 제3자에 의한 인증 프로그램에 대한 원칙 등에 대한 표준을 관리하고 있으며, 대표적으로 ISO 14029등 8건의 표준이 제정되어 있으며, 현재 1개 표준에 대하여 개정 진행 중이다.

3) ISO, STANDARDS BYISO/TC 207 Environmental management, <https://www.iso.org/committee/54808/x/catalogue/p/1/u/0/w/0/d/0>, 2022.10.26. 접속

&lt;표 2-5&gt; ISO/TC 207/SC3 국제표준 제/개정 현황

ISO 규격	통상명칭	규격의 개요	제/개정 연도
ISO 14024	환경표지 (Type I)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Type I 프로그램(제도) 개발을 위한 원칙과 절차에 관한 표준</li> <li>- Type I 프로그램은 동일 제품군 중에서 환경성이 탁월한 상품에 대하여 환경표지 사용을 인증하는 제도</li> </ul>	2018
ISO 14021	환경성 자기주장 (Type II)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 제품의 생산자가 자체적으로 제품의 환경성에 관한 주장을 할 수 있는 방법 및 조건에 관한 표준</li> <li>- 생산자의 무분별한 환경성 주장에 따른 소비자 기만행위 및 혼란 예방을 위하여 제품의 환경적 특성 주장 방법·조건 등을 정함</li> </ul>	2021
ISO 14025	환경성적표지 (Type III)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Type III 프로그램(제도) 개발을 위한 원칙과 절차에 관한 표준</li> <li>- 제품에 대한 전과정평가(LCA)를 토대로 제품의 환경성을 정량적으로 분석하고 표지(데이터)를 인증하는 제도</li> </ul>	2006
ISO 14026	환경라벨링 커뮤니케이션	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 환경과 관련된 제품 발자국(탄소발자국 등)의 커뮤니케이션 시 원칙, 요구사항에 대한 표준</li> </ul>	2017
ISO/TS 14027	제품범주규칙	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Type III 프로그램(제도)에 적용될 수 있는 제품범주규칙(Product Category Rule) 개발 시 고려해야 할 항목에 관한 지침</li> </ul>	2017
ISO/DIS* 14020	환경라벨링 프로그램 (제도) 일반 원칙	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 환경라벨링과 관련하여 Type I~III 등 모든 제품환경성선언에 있어 공통되는 용어 정의, 일반 원칙 및 요구사항에 대한 표준</li> </ul>	개정 중 (2019~)
ISO/TS** 14029	환경라벨링 프로그램(제도)의 상호인정	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 다양한 EPD 인증제도 간 상호인정협정(MRA)을 위한 요구사항을 정의하고, MRA 개발 후 외부 커뮤니케이션에 대한 표준</li> </ul>	신규 제정 (2022.04)

출처 : ISO 공식 홈페이지<sup>4)</sup>를 바탕으로 저자 작성

\* Draft International Standard

\*\* Technical Specification

현재 개정 중인 ISO 14020의 경우 2019년부터 개정을 진행 중이며, 주요 변경 내용은 신규 표준 제정에 따라 ISO 14020 패밀리표준(ISO 14021~14029 등)의 연관관계에 대하여 재정의를 진행하고 있다. 해당 표준은 제3자 인증을 통한 친환경 상품의 실별, 친환경상품의 자가선언, 환경정보 공개 등을 골자로 하고 있으며, 환경 위해적인 상품의 소비 억제하려는 목적이 있으나 한편으로는 비관세장벽으로 작용할 수 있다.

특히 2022년에 신규 제정된 ISO 14029는 한국 및 스웨덴이 공동의장으로 개발한 표준으로 국제적으로 산재되어 있는 환경성적표지인증(Environmental Product Declaration,

4) ISO, STANDARDS BY ISO/TC 207/SC 3 Environmental labelling, Retrieved from <https://www.iso.org/committee/54836/x/catalogue/>, 2022.10.26. 접속

EPD) 제도 간 상호인정체계 구축을 위한 프레임워크 및 요구사항을 제시하고 있으며, 이는 향후 국내의 EPD 인증제도가 단일화될 가능성을 내재하고 있다.

## 2. 제 5분과위원회(SC5) 국제표준화 동향

ISO/TC207/SC5에서는 제품 및 조직의 전과정에서 발생하는 환경영향을 정량화하기 위한 LCA 방법론에 대한 국제표준을 관리하고 있으며, 대표적으로 ISO 14044등 15건의 표준이 제정되어 있으며, 현재 4건의 표준에 대하여 신규 제정 중이다. <표 2-6>은 SC5에서 제정한 대표적인 표준이며, 신규 제정 중인 59014의 경우 현재 New proposal(NP) 제출 단계이므로 제외하였다.

<표 2-6> ISO/TC 207/SC5 국제표준 제/개정 현황

ISO 규격	통상명칭	규격의 개요	제/개정 연도
ISO 14040	LCA 원리 및 구조	○ LCA를 수행하기 위한 4가지 단계를 표준화하고, 각 단계별 원리 및 구조를 설명한 표준 - LCA 4단계 : 목적 및 범위 정의, 전과정 목록분석, 영향평가, 해석	2020
ISO 14044	LCA 요구사항 및 지침	○ LCA 4단계에 대하여 각 단계별로 수행해야 할 사항에 대하여 정의하고 가이드를 제공하는 표준	2020
ISO 14046	물발자국	○ LCA에서 고려하고 있는 영향범주인 물 부족에 대하여 정량화하기 위한 원리, 요구사항 및 가이드를 제공하는 표준	2014
ISO/TS 14072	조직 LCA 요구사항 및 지침	○ 제품이 아닌 조직(사업장 등)을 대상으로 LCA 수행 시 고려해야 할 사항 및 가이드라인을 제공하는 표준	2014
ISO/DTS* 14074	정규화, 가중화 및 전과정 해석	○ 전과정 영향평가 단계에서 선택적인 분석에 해당하는 정규화, 가중화에 대한 가이드를 제공하는 표준	제정 중 (2019~)
ISO/CD 14075	사회적 (Social) LCA	○ Social LCA를 수행하기 위한 원리 및 구조를 설명한 표준	제정 중 (2021~)
ISOWD** 14076	환경 기술경제성 평가	○ 환경-기술경제성 평가 best practice를 기반으로 수행을 위한 원리, 요구사항 및 가이드를 제공하는 표준	제정 중 (2022~)

출처 : ISO 공식 홈페이지<sup>5)</sup>를 바탕으로 저자 작성

\* Draft Technical Specification

\*\* Working Draft

5) ISO, STANDARDS BYISO/TC 207/SC 5 Life cycle assessment, Retrieved from <https://www.iso.org/committee/54854/x/catalogue/>, 2022.10.26. 접속

ISO 14040 및 14044는 앞서 1절에서 소개한 바와 같이, LCA 수행을 위한 4가지 단계에서 수행 절차를 설명한 표준이다. 기존에는 4가지 단계별로 각각의 표준이 제정되어 있었으나 폐지되었다. LCA 수행 시 선택 사항인 정규화 및 가중화 단계에 대한 가이드를 ISO 14074를 통해 2019년부터 제정 진행 중이다.

특히 TC 207은 환경경영과 관련된 기술위원회임에도 불구하고 2021년부터는 사회성을 정량화할 수 있는 방법론을 개발하고 있으며 2022년부터는 환경성과 경제성을 동시에 고려할 수 있는 가이드라인을 개발 중이다. 이는 국제적으로 LCA 수행 시 환경성뿐만 아니라 사회성 및 경제성을 모두 강조할 것으로 예상된다.

### 3. 제 7분과위원회(SC7) 국제표준화 동향

ISO/TC207/SC7에서는 제품/사업장 및 프로젝트의 온실가스 배출량 산정 및 검증 방법, 배출량 검증 기관 인정기준 등에 대한 국제표준을 관리하고 있으며, 탄소발자국 관련 대표 표준으로는 ISO 14067등 13건의 표준이 제정되어 있으며, 6건의 표준이 신규 제정 중이다. 아래 <표 2-7>은 탄소발자국과 관련성이 높은 표준을 제시하였다.

<표 2-7> ISO/TC 207/SC7 국제표준 제/개정 현황

ISO 규격	통상명칭	규격의 개요	제/개정 연도
ISO 14064-1	온실가스 산정 및 검증	○ 조직(기업) 수준의 온실가스 배출량 산정 및 보고에 대한 표준	2018
ISO 14064-2		○ 프로젝트 수준의 온실가스 배출량 산정 및 보고에 대한 표준	2019
ISO 14064-3		○ 온실가스 명세서의 검증에 대한 표준 및 지침	2019
ISO 14067	탄소발자국	○ 제품 탄소발자국 산정을 위한 요구사항 및 지침	2018
ISO/CD* 14068	탄소중립	○ 제품/조직의 탄소중립 정량화를 위한 표준 - 탄소중립의 정의, 적용 범위, 기간, 관리 조직, 외부 감축 노력의 인정 및 활용, 검증 방안뿐만 아니라 탄소중립을 달성했음에 대한 외부 의사소통 방안 등에 대한 표준	제정 중 (2020~)
ISO/DIS 14083	운송 수단 탄소발자국	○ 운송 수단(항공, 파이프라인, 철송, 내항선)의 Supply chain에서 발생하는 온실가스를 정량화 방법에 대한 표준	제정 중 (2019~)

출처 : ISO 공식 홈페이지<sup>6)</sup>를 바탕으로 저자 작성

\* Committee Draft

6) ISO, ISO/TC 207/SC 7 Greenhouse gas and climate change management and related activities, Retrieved from <https://www.iso.org/committee/546318/x/catalogue/>, 2022.10.26. 접속

ISO 14064는 총 3가지 파트에 걸쳐 조직(기업)차원의 규칙, 프로젝트 차원의 규칙, 마지막에는 평가 및 검증으로 구성되어 있다. ISO 14064-1에서는 조직 전반의 온실가스 인벤토리에 대한 설계, 개발, 관리, 보고 및 검증을 다루고 있다. ISO 14064-2에서는 탄소저감 및 저장 프로젝트와 같이 온실가스 배출을 감소시키거나 제거를 위해 설계된 프로젝트에 관한 원칙과 요구사항을 규정하고 있다. 마지막으로 ISO 14064-3에서는 타당성 검증에 대한 지침이며 이는 조직 또는 온실가스 프로젝트 모니터링 및 보고에 적용될 수 있다.

ISO 14067은 제품 탄소발자국 산정을 위한 표준으로 기본적인 원리는 LCA 표준인 ISO 14040 및 14044에 기초하고 있다. 제품, 공정, 기술의 전과정 측면에서 온실가스 배출 인벤토리를 분석하고 이 중 온실가스에 해당하는 물질에 대하여 IPCC에서 제시하는 GWP 중 100년 주기 동안의 GWP를 고려하여 온실가스 배출량을 산정한다.

특히 ISO 14068은 2020년부터 신규로 제정되고 있는 표준으로 PAS 2060을 기반으로 제품/조직의 탄소중립 정량화를 위한 표준안이다([그림 2-9] 참고). PAS 2060은 조직이 환경 인증 정보를 투명하고, 정확하게 제시할 수 있는 가이드라인 및 탄소중립성에 대한 주장을 신뢰할 수 있게 하는 방법을 제공하고 있다. 해당 표준에서는 배출권거래제에서 다루고 있는 직접 및 간접(에너지 사용) 배출량 개념을 넘어서 LCA 기반의 탄소배출량을 포함하도록 하고 있다는 것이 특이점이다. 현재 Committee draft(CD)가 개발되어 회원기관들의 투표까지 진행된 상태이며 투표 결과에 따라 Draft International Standard(DIS)로 등록될 예정이다. 이에 따라 국제적으로 LCA 측면에서의 온실가스 배출량 산정의 중요성이 점점 더 대두될 것을 시사하고 있다.

[그림 2-9] PAS 2060을 기반으로 제품/조직의 탄소중립 정량화를 위한 표준안(ISO 14068)





## 제 3 절 국내외 탄소발자국 정책 동향

### 1. EU

2019년 12월 우르줄라 폰테어라이엔(Ursula Von der Leyen)을 수장으로 EU 집행위원회가 새롭게 출범한 이후, EU는 2050년 탄소중립을 목표로 설정하고 이를 달성하기 위한 다양한 정책을 수립하고 있다. 2019년 12월 11일, EU 집행위원회는 2050년 탄소중립 목표 달성을 위해 사회 전 분야를 전환하기 위한 전방위적 로드맵인 유럽 그린딜(European Green Deal; 이하 그린딜)을 발표하였고 이후 후속 정책을 잇달아 발표하였다. 본 보고서는 그중에서도 제품의 전과정에서 발생하는 탄소발자국을 고려하는 탄소국경조정제도, 제품환경발자국, EU 배터리 규제(안)를 중심으로 보고자 한다.

#### 1.1 탄소국경조정제도(CBAM)

2021년 7월 14일, EU 집행위원회는 2030년까지 EU의 탄소 배출량을 1990년 수준 대비 55% 감축하기 위한 입법안 패키지인 「Fit for 55」를 제시하였다. 동 입법안 패키지는 탄소 가격결정 관련 입법안 4개, 감축목표 설정 관련 입법안 4개, 규정 강화 관련 입법안 4개와 포용적 전환 등으로 구성되어 있으며 EU의 배출권거래제(Emissions Trading System; 이하 EU ETS)를 강화하고 CBAM을 도입하는 것을 핵심으로 하고 있다.

<표 2-8> 「Fit for 55」의 주요 내용

구분	내용
배출권거래제 신설/강화	기존 온실가스 배출권거래제 적용 대상인 전력, 철강, 화학 등에 해운, 육상운송 및 건축물 분야를 추가하고 항공 분야 온실가스 배출 할당량을 단계적으로 축소
<b>탄소국경조정제도(CBAM) 도입</b>	<b>탄소누출을 막기 위해 EU 배출권거래제와 연계하여 2026년부터 역내 수입품에 탄소배출량에 따른 비용 부과</b>
에너지 관련 지침 개정	에너지조세지침, 재생에너지지침 및 에너지효율지침 개정을 통해 탄소감축 목표를 상향 조정하고 친환경에너지로의 전환에 대한 인센티브 부여
탄소흡수원 확대	토지이용 및 산림에 관한 규정 개정을 통해 순 온실가스 흡수 목표 상향
내연기관 규제 및 대체 연료 인프라 확충	2035년부터 내연기관 출시를 금지하며, 친환경 차량 개발, 생산 및 사용을 촉진하기 위해 대체 연료 인프라 확충 목표 제시
항공 및 해운 연료 지침	항공 및 해운 부문에서 친환경 연료 사용 독려를 위해 관련 지침 신설
사회적으로 공정한 전환	경제 및 사회의 친환경 전환

출처: 장영욱·오테현 (2021)<sup>7)</sup>

7) 장영욱·오테현(2021), 「EU 탄소감축 입법안(‘Fit for 55’)의 주요 내용과 시사점」, 『KIEP 세계경제 포커스』, 4(44)

CBAM이 제시된 이유에는 EU 내 환경규제를 강화할수록, 생산시설이 규제가 약한 지역으로 이전하거나, 역내 기업들은 저탄소 제품생산을 위한 설비투자 등으로 생산원가가 높아져 역외국 대비 불공정한 상황에 놓이게 된 배경이 있다. 따라서 EU 집행위원회는 공정한 경쟁 환경(leveling the playing field)을 조성하고, 역내 산업의 비용부담을 상쇄하기 위해 CBAM을 제시하였다. 또한, 수입에서 발생한 탄소 배출량이 현재 EU 전체 탄소 배출량의 20% 이상에 해당하고 있으므로 EU ETS와 연계해서 상대적으로 온실가스 감축 노력이 미흡한 국가에서 EU로 제품 수출 시 탄소배출이 이전하는 탄소 유출(Carbon leakage)에 비용부담을 시키려는 의도로 해석되기도 한다.

<표 2-9> EU의 CBAM 시행 타임라인

시기	주요 내용
2019.12	- European Green Deal 발표 - 2050년까지 탄소중립 목표
2020.03	- 2030 기후목표 계획(climate & energy framework) 발표 - 주체적인 실행계획 발표(2030년까지 탄소배출량 55% 감축)
2021.06	- CBAM 초안 일부 언론 공개
2021. 07	- 2030 기후목표 계획 달성을 위한 입법안('Fit for 55') 발표 - 해당 개정안에 CBAM 초안이 포함됨(EU 집행위원회 법률안 공개)
2022. 03	- EU 이사회 법률안 공개(집행위원회(안)와 유사)
2022. 06	- EU 의회 법률 수정안 공개
2022 하반기	- EU 의회, 이사회, 집행위원회 협상을 거쳐 최종 CBAM 법률안 공개 예상

EU CBAM은 2022년 10월 현재까지도 입법 절차 진행 중이다. EU 입법은 집행위원회가 법률안 초안을 준비하고 이사회, 의회 간의 협의를 걸쳐 입법된다. 집행위원회에서 2021년 6월 CBAM 관련 언론 보도를 통하여 적용 품목, 시행 시기, 배출범위 등 초안을 공개하였으나 7월 공표한 초안과 일부 상이하였다.

EU 집행위원회에서 7월 공표한 초안에서는 철강, 알루미늄, 시멘트, 비료, 전력 생산 총 5개 품목에 적용하는 것으로 발표하였으며 시행 시기는 2023년~2025년까지의 과도기를 거쳐 2026년 1월부터 시행하는 것으로 결정하였다. 또한 배출범위는 사업장 내에서 직접적으로 발생하는 Scope 1 배출량으로 한정하였다.

다만 EU 의회 수정본(' 22.06)에서는 집행위원회 초안과 달리 기존 5대 품목 외에 유기화학, 플라스틱, 수소, 암모니아 4개 품목을 추가하고 사용하는 전기 생산에 따른 간접배출량(Scope 2)도 고려하는 것으로 확대하였으며 과도기를 1년 더 부여함으로써 2027년 1월부터 시행하는 것으로 결정하였다. 이에 따라 최종적으로 2022년 하반기에 EU 의회, 이사회, 집행위원회 협상을 거쳐 최종 CBAM 법률안을 도출할 것으로 예상된다.

&lt;표 2-10&gt; CBAM 법률안 주요 변경 현황

구분	언론 보도 초안('21.06)	EU 집행위원회 초안('21.07)	EU 의회 수정본('22.06)
적용 품목	철강, 알루미늄, 시멘트, 비료, 전력 생산 총 5대 품목	철강, 알루미늄, 시멘트, 비료, 전력 생산 총 5대 품목	5대 품목 외 유기화학, 플라스틱, 수소, 암모니아 추가
시행 시기	2026년 1월 (과도기: '23~'25)	2026년 1월 (과도기: '23~'25)	2027년 1월 (과도기: '23~'26)
배출범위	직접배출, 간접배출(전력 소비)	직접배출	직접배출, 간접배출(전력 소비)

출처: 김동구, 손인성(2021)<sup>8)</sup> 및 European Parliament(2022)<sup>9)</sup> 바탕으로 저자 작성

최종 CBAM 법률안 도출에 따라 주요내용이 달라질 수 있지만 가장 최근 공개된 EU 의회 수정본에 따르면, 2023년 1월 1일부터 CBAM 전환기간으로 EU 역내 이산화탄소 배출량이 큰 시멘트, 전기, 비료, 철강, 알루미늄, 유기화학, 플라스틱, 수소, 암모니아 수입품의 온실가스 배출량을 신고해야 한다. CBAM이 공식적으로 시행될 예정인 2027년부터는 비EU 국가의 수입업자는 ①위 제품을 생산하는 제조단위별 각 제품의 총량, ②각 제품의 실제 탄소배출량, ③각 제품의 간접적인 실제 탄소배출량, ④수입 상품의 원산지에서 부과되는 탄소가격(탄소배출에 부과되는 금전적 부담으로 탄소세, 세금, ETS 하에서의 배출허용량 등)에 대한 정보가 포함된 CBAM 보고서를 EU에 의무적으로 제출해야 한다.

또한 입법안 추가문서<sup>10)</sup>에서는 탄소발자국 산정 시 LCA를 적용한 환경발자국(Product Environmental Footprint; 이하 PEF) 방법론 및 탄소발자국 국제표준(ISO 14067) 사용 권고하고 있다. 이는 현재까지는 전력 소비로 인한 간접배출량만 고려하고 있지만, 향후 배출범위를 모든 Supply chain 차원의 간접배출량으로 확대할 가능성을 시사하고 있다. 특히, 8장 제30조 및 (52) 항목에 따르면 EU 집행위원회는 과도기 이후부터 부속서에 제시된 품목 외에도 타 품목으로 확대하고 간접배출량까지 고려하기 위하여 EU PEF 방법론에 기반하여 탄소 배출량 산정법을 개발하여 제출해야 함을 명시하고 있다.

## 1.2 제품환경발자국(PEF) 제도

전 세계적으로 450개 이상의 친환경 및 저탄소 인증제도가 존재하고 EU 내에만 230개 이상의 제도가 존재한다.<sup>11)</sup> 그만큼 제품 간 환경성과 비교가 어려운 실정이다. 이를 고려하여 2013년 4월, EU 집행위는 친환경시장통합정책(Single Market for Green Product

8) 김동구, 손인성. 유럽 그린딜 내 탄소국경세 도입 시 글로벌 가치사슬 영향 및 국내 대응방안 연구. 2021

9) European Parliament, Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing a carbon border adjustment mechanism, AMENDMENTS 001-184, 2022

10) European Commission, Commission Staff Working Document Impact Assessment Report, SWD(2021) 643 final, 2021

11) Partl, H. et al.(2021), Product Environmental Footprint (PEF)

[https://ec.europa.eu/environment/eusds/smgp/pdf/PEF-Webinar-Sphera-2021-05-25\\_v7\\_1.pdf](https://ec.europa.eu/environment/eusds/smgp/pdf/PEF-Webinar-Sphera-2021-05-25_v7_1.pdf)

Initiative; 이하 SMGP)을 제안했다. 본 이니셔티브는 효과적으로 제품의 환경영향이 비교 가능하고 단일 환경인증 제품이 유통되는 시장을 의미한다. 따라서 PEF는 SMGP의 일환으로 기존 EU 시장에서 혼용되고 있는 환경라벨링(Environmental Product Declaration; 이하 EPD) 및 탄소발자국 인증제도를 통합하고 제품 및 기업의 환경성과에 대한 명확성과 신뢰성을 확보하며, 서로 비교할 수 있도록 개선하고자 한다. PEF 정보를 소비자에게 전달함으로써 정확하고 확실한 정보에 입각한 구매 결정을 가능하게 하여 더 친환경적인 제품의 사용을 촉진할 수 있다.

<표 2-11> 주요 EU 국가에서 혼용되고 있는 EPD 및 탄소라벨링 인증제도

국가	인증기관	제도 명	국제 표준	환경라벨 종류	분야	표지
스웨덴	International EPD	International EPD	ISO 14025	제3유형 환경성적표지	-	
독일	환경자연보호, 원자력안전부	Blue Angel	ISO 14024	제1유형 환경표지	8개 비식품 분야	
	건축환경연구소 (IBU)	IBU EPD	ISO 14025	제3유형 환경성적표지	건축	
스페인	스페인규격인증 협회 (AENOR)	AENOR N Label	GHG 프로토콜 ISO 14067 PAS 2050	탄소라벨링	12개 식품 및 비식품 분야	
이탈리아	Carbon Footprint Italy	Carbon Footprint Italy	ISO 14067 PAS 2060	탄소라벨링	식품, 비식품, 조직	
오스트리아	기후보호, 환경, 에너지, 모빌리티, 혁신기술부	Austrian Ecolabel	ISO 14024	제1유형 환경표지	-	

2013년에 PEF는 EU Recommendation 2013/179/EU에 처음으로 포함됐으며, EU는 PEF 방식을 도입하기 위해 지난 2013년부터 2018년까지 일부 상품을 대상으로 파일럿 단계를 착수했고 계속해서 방법론의 완성도를 높여왔다. 파일럿 단계에서는 주로 제품 전과정의 잠재적인 환경영향을 계산하기 위한 구체적인 지침이라고 할 수 있는 Product Environmental Footprint Category Rule (PEFCR) 구축을 위한 프로세스 검증 및 이해관계자들과의 의사소통을 위한 테스트가 수행되었다. 현재는 PEF 정책을 채택하기 전 파일럿 단계에서 구축한 PEFCR를 모니터링하고, 새로운 PEFCR을 구축하고, 전반적인 개선을 위한 전환단계를 시행 중이다.

## [그림 2-10] PEF 제도의 단계별 추진현황

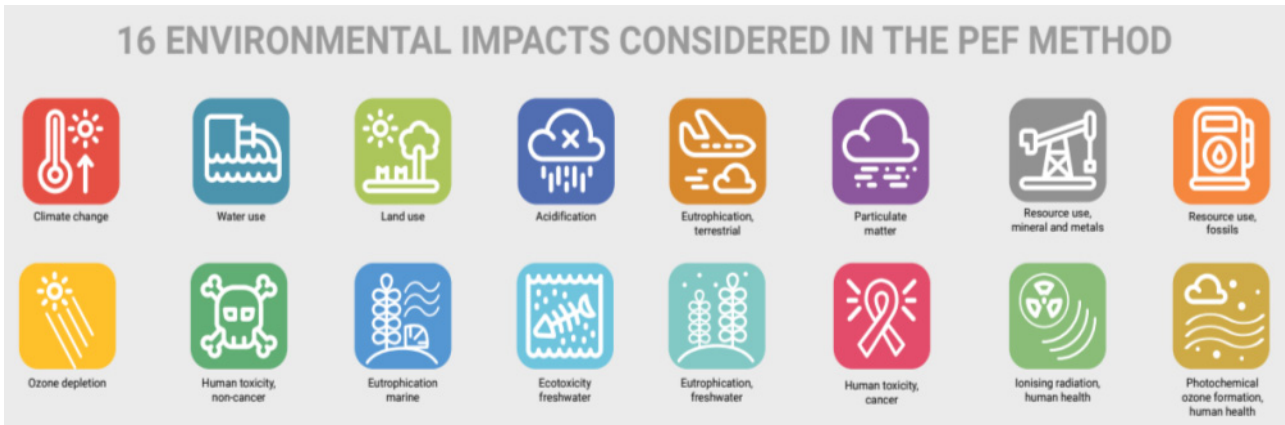


출처: European Commission(2013)<sup>12)</sup>, European Commission(2017)<sup>13)</sup>, European Commission(2021a)<sup>14)</sup>, Zampori and Pant(2019)<sup>15)</sup>

PEF 방법론은 ISO TC 207의 국제표준(ISO 14040, 14044, 14025 등)에 기반하여 제품/조직의 전과정 동안 발생하는 환경영향을 정량화하고 공개하는 제도라고 볼 수 있다. LCA를 기반으로 제품 및 서비스의 전과정, 즉 원자재의 취득부터 가공, 유통, 사용 및 폐기까지 제품 시스템의 모든 단계를 통해 제품의 환경성을 정량화하는 방법이다. PEF 방법에서는 16가지 환경영향 카테고리(기후변화, 산성화, 부영양화, 광물 및 금속자원 사용 등)를 사용하여 제품 및 서비스의 환경성을 평가한다.

- 12) European Commission(2013), Commission Recommendation of 9 April 2013 on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013H0179&from=SV>
- 13) European Commission(2017), Guidance for the development of Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs), version 6.3, [https://eplca.jrc.ec.europa.eu/permalink/PEFCR\\_guidance\\_v6.3-2.pdf](https://eplca.jrc.ec.europa.eu/permalink/PEFCR_guidance_v6.3-2.pdf)
- 14) European Commission(2021a), Commission Recommendation (EU) 2021/2279 of 15 December 2021 on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations, <http://data.europa.eu/eli/reco/2021/2279/oj>
- 15) Zampori, L. and Pant, R.(2019), Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, DOI:10.2760/424613

[그림 2-11] PEF 방법론에서 고려하고 있는 16가지 환경영향범주



출처: United Nations Environment Programme (2022)<sup>16)</sup>

2020년 5월에 발표한 「신순환경제 행동계획(A New Circular Economy Action Plan)」에서도 기업들이 PEF 방법론을 사용하여 환경성을 입증할 것을 제안하고 있다. 특히, 2021년 12월 EU 집행위원회에서도 제품/조직의 환경성 측정 방법과 커뮤니케이션 원칙이 담긴 권고문<sup>17)</sup>을 채택함으로써 환경성 평가와 관련된 정책 및 제도에서 PEF 방법론을 사용하도록 장려하고 있다. 최종적으로 EU에서는 PEF 제도의 규제화를 위하여 다양한 이해관계자 설문을 바탕으로 컨설팅(의견수렴 절차)을 진행(‘20.12)하였고 2022년 최종 결정 예정이다.

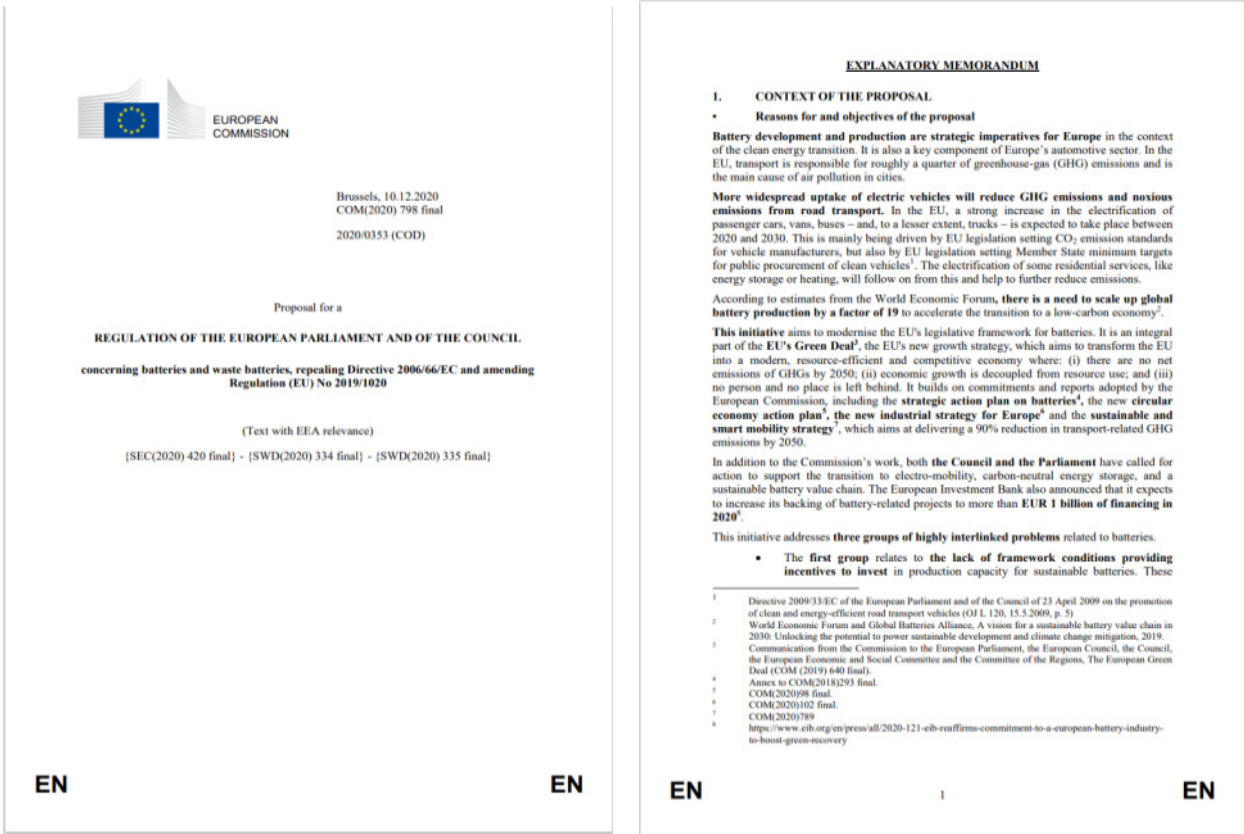
### 1.3 신 EU 배터리 규제안

탄소중립을 달성하기 위해 전 세계 여러 국가들은 내연기관을 퇴출하고 전기차를 도입하고 있다. 이미 유럽 및 캘리포니아에서는 2035년부터 내연기관 판매를 중단하기로 하였으며, 한국 역시 현 정부가 2035년부터 내연기관차 신규등록 금지 공약을 내놓았다. 이에 따른 세계 배터리 수요는 2030년까지 14배 증가할 것으로 예측되고 있다. 하지만 전기차 공급이 확대되면서 폐배터리 배출 문제의 심각성도 제기되고 있다. 현재 전기차에 사용되는 리튬이온 배터리에는 리튬·산화코발트·니켈 등 여러 금속이 포함되어 있는데, 전기차 배터리 수요를 따라잡기에 공급이 턱없이 부족할뿐더러 리튬 광산 개발에는 환경오염이 뒤따른다는 점이 문제가 되고 있다. 이에 오래전부터 적극적으로 전기차 도입을 해왔던 EU는 기존 배터리 지침(2006/66/EC)을 폐지하고 탄소중립 목표 달성과 지속가능한 배터리를 위한 「신 EU 배터리 규제안」을 2022년 3월 10일에 통과시켰다.

16) United Nations Environment Programme(2022), All you need to know about PEF: A factsheet for businesses, <https://www.oneplanetnetwork.org/sites/default/files/from-crm/InTex%2520-%252007272022.pdf>

17) European Commission, COMMISSION RECOMMENDATION on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organizations, 9332 final, 2021

[그림 2-12] 신 EU 배터리 규제안



출처: European Commission (2020)<sup>18)</sup>

「신 EU 배터리 규제안」이 적용되는 대상 제품으로는 이동식(스마트폰, 전자기기 등), EV·차량용, LMT(light means of transport; 전기자전거, 스쿠터 등), 산업용 등 모든 종류의 배터리가 포함된다. 또한, 본 지침은 해당 종류의 배터리 생산 전과정에 걸쳐 ①재활용원료 비율 강화, ②라벨링, ③배터리 수거, ④탄소발자국, ⑤공급망 실사 등 지속가능한 기준을 쟁점으로 이에 대한 의무 강화를 통해 배터리의 탄소발자국을 점진적으로 최소화할 것이라고 발표했다. 특히 이번 지침에 새롭게 추가된 내용으로 2024년 7월 1일부터 EU 국가에 전기자동차 및 내부 저장용량이 2kWh를 초과하는 충전식 산업용 배터리를 EU 시장으로 수출할 경우 전과정 탄소배출량 표기(탄소발자국에 대한 선언 및 등급)를 의무적으로 해야 하며, 2026년 1월 1일부터 탄소발자국 등급이 표시된 라벨을 부착해 배터리가 환경에 미치는 영향을 공개할 예정이다. EU 의회가 올해 7월에 공개한 브리핑에 의하면 2027년 7월 1일부터는 일정 수준 이하로 탄소발자국 상한선을 설정하고 이를 넘긴 배터리는 EU 내에서의 배터리 판매를 제한하며 배터리 수명주기, 충전용량, 위험물질 포함 여부, 수거 정보 등의 정보 표기도 의무화할 것이라고 예고했다.<sup>19)</sup>

18) European Commission(2020), Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020PC0798>

19) European Parliament(2022a), New EU regulatory framework for batteries, [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689337/EPRS\\_BRI\(2021\)689337\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689337/EPRS_BRI(2021)689337_EN.pdf)

또한, EU 집행위는 배터리에 대한 탄소발자국 산정방법 등에 필요한 세부기준을 2023년 7월 1일까지 마련할 계획이라고 공개한 바 있다. 탄소발자국 등급 및 선언은 제품 기술문서(technical documentation)에 포함되어야 하며, 2025년 말까지 시행법령을 마련해 제품별 구체적인 라벨 요구사항을 수립할 예정이다. 따라서 각국의 배터리 제조사는 탄소발자국이 낮은 원재료를 확보하고 유해 화학물질의 배출 없이 배터리를 제조하는 기술 개발을 위한 노력이 잇따를 것으로 예상된다.

## 2. 미국

탄소중립에 대한 미국의 노력은 오바마 정부 때부터 일정 부분 시작되어 왔으나 트럼프 행정부는 2017년 6월 1일에 오바마 정부가 비준했던 파리기후협정에 대해서 탈퇴의사를 밝히며 구체적인 진행을 하지 못했다. 따라서 미국은 탄소중립 아젠다에서 가장 앞서나가고 있는 유럽에 비해서는 다소 뒤처지기 시작했다. 하지만 트럼프 전 대통령의 재선이 실패하고 바이든 대통령이 새롭게 취임하면서 미국의 탄소중립 달성 목표는 전환점을 맞이하게 되었다. 바이든 대통령은 파리기후협정에 복귀하는 절차를 위한 행정명령에 2021년 1월 20일에 서명하는 것을 시작으로 트럼프 정부시기에는 주 정부나 지방정부 차원에서만 이뤄지던 탄소중립 관련 정책들이 연방 정부 차원에서 적극적으로 추진될 수 있게 되었다고 볼 수 있다. 미국 내에서도 특히 환경규제가 까다롭기로 유명한 캘리포니아는 일관성 있게 실질적 기후변화 및 탄소 규제정책을 펼쳐왔으며 캘리포니아의 정책이 모델이 되어 다른 주와 연방 정부로 확대되는 추세이다.

### 2.1 Buy Clean California Act (청정 구매법)

수년간의 탄소발자국 감축 규제 및 벌금제도를 거친 캘리포니아는 2017년 10월 16일, 공공 건축사업에 사용되는 자재의 탄소 함량을 고려하도록 요구하는 세계 최초의 LCA 기반의 입법안인 “Buy Clean California Act”, 일명 「청정 구매법」을 정식으로 발효했다. 청정 구매란 자재 생산과 관련된 전과정 배출량을 고려하여 embodied emission이 적은 건설 자재의 구매를 촉진하는 정책이다. 「청정 구매법」에 따르면 2020년 1월 1일부터는 제조사에 4개의 건축 자재(탄소강 철근, 구조용 강재, 판유리, 광물섬유 단열재)에 대한 EPD 정보를 필수로 제출해야 한다. 적용 대상 건축자재 범주도 추후 콘크리트, 시멘트 및 알루미늄과 같은 탄소 다 배출 제품도 포함할 것으로 전망되고 있다.

2021년부터는 최대허용탄소배출량을 초과한 공급업체는 캘리포니아 정부 조달 입찰 참가 자격이 제한된다. 2022년 7월 1일부터 캘리포니아는 EPD를 사용하여 적격 자재의 GWP 제한 준수를 검토하기 시작했으며 이 또한 2025년부터는 3년 주기로 업데이트될 예정이다. 「청정 구매법」은 캘리포니아 정부의 공공 프로젝트에 특화되어 있지만, 캘리포니아를 시작으로 다른 주 및 시 차원에서 유사한 프로그램 및 다양한 LCA 기반 정책이 이미 시행되고 있다. 이는 탄소발자국 계산을 위한 LCA의 광범위한 사용으로 해석할 수 있다.



&lt;표 2-12&gt; 미국 내 주요 행정구역별 LCA 기반 공공조달 정책

연도	행정구역	법안명	EPD 대상 품목
2017	캘리포니아	Buy Clean California Act	탄소강 보강 철근, 건축용 강철, 판유리, 미네랄 목재보드 단열재,
2019	포틀랜드	New Requirements for Concrete	콘크리트
2019	미네소타	Maximum Acceptable GWP Standard (HF 2204)	탄소강 보강 철근, 건축용 강철, 판유리, 미네랄 목재보드 단열재
2021	뉴욕	Senate Bill S542A	콘크리트
2021	캘리포니아	Buy Clean California Act: Environmental Product Declarations concrete (SB-778)	콘크리트
2021	콜로라도	Global Warming Potential For Public Project Materials (HB 21-1303)	아스팔트 및 아스팔트 혼합물, 시멘트 및 콘크리트 혼합물, 유리, 포스트 텐션 스틸, 철근, 건축용 강철, 목재
2021	뉴저지	Senate Bill 3091 Assembly Bill 5223	콘크리트
2021	워싱턴	Buy Clean and Buy Fair Washington Act (HB 2744)	건축용 콘크리트, 철근, 건축용 강철 및 목재 제품
2022	오리건	Buy Clean Oregon (HB 4139)	콘크리트, 아스팔트, 철 등

캘리포니아의 「청정 구매법」을 모델로 삼아 미국 연방 기관 역시 지속가능성, 기후 적응 및 회복력 노력을 활성화하기 위해 신속하게 움직이고 있으며 바이든 행정부는 2021년 12월 미국산 저탄소 재료 사용을 지원하기 위해 「연방 지속가능성 계획(Federal Sustainability Plan)」 및 행정명령 14057(Executive Order 14057)을 내놓았다. 또한, 바이든 행정부는 해당 행정명령 하에 저탄소 건설자재 사용을 도모하기 위해 자금 및 구매 건축 자재의 90%를 차지하고 있는 20개 이상의 미국 연방 기관이 포함되어 있는 Buy Clean Task Force를 발족시키면서 연방 차원에서의 「청정구매계획(Federal Buy Clean Initiative)」를 개시했다. 이를 통해 바이든 행정부는 처음으로 연방 조달 및 연방 자금 지원 프로젝트에서 건축 자재의 잠재적 온실가스 배출량 및 오염 물질에 대한 고려를 늘리고 미국산 저탄소 건축 자재 공급 및 사용을 적극적으로 격려하고 있다. 본 계획에서는 각 기관이 시설과 업무를 확실하게 기후변화의 영향에 적응시키고 회복력을 높이기 위해 강구하는 절차의 개요를 제시하고 있다.

미국 교통부(DOT)는 2022년 6월 EPD의 활용도를 높이고 내재 탄소 배출량이 낮은 제품 및 재료의 사용을 장려하기 위해 저탄소 조달 파일럿(Lower Carbon Procurement Pilot)을 시작했으며 2022년 4월, 연방 고속도로 관리국(Federal Highway Administration)은 LCA PAVE라는 포장도로 재료 및 설계 결정의 환경영향을 평가하는 도구를 출시하며 교통 분야에서의 전과정 배출량을 줄이는 데에 기여하고 있다.

에너지부(DOE)는 교육, 기술 지원 및 혁신 보조금을 통해 청정구매를 지원하고 있다.

건축기술사무소(Building Technology Office)는 전체 건물 전과정 분석을 위한 GREET과 같은 도구를 만들고 있으며, 첨단제조사무소(Advanced Manufacturing Office)는 특정 제품에 대한 표준 설정을 지원하기 위해 LIGHTEnUp, MFI와 같은 도구를 지원하고 있다.

국방부(DOD)에서도 저탄소 건축자재로의 전환을 가속화하기 위해 차후 프로젝트를 선별하고 미육군기술자개발센터(ERDC) 소속의 Geotechnical and Structures Laboratory 및 Construction Engineering Research Laboratory와 협력하여 저탄소 건축자재의 전과정 탄소발자국, 비용, 복원력 및 적시성을 분석하는 것을 포함하고 있다.

환경보호청(EPA)은 GHG 보고 프로그램과 EPA의 기업 기후 리더십 센터의 벤치마킹 데이터. EPA는 또한 EPD 지침을 표준화하고 개선하기 위해 외부 파트너와 협력하고 있다.

상무부(DOC)는 미국 국립표준기술원(NIST)을 통해 저탄소 시멘트 및 콘크리트에 대한 표준을 평가하고 EPD를 통해 구현된 잠재적인 탄소배출량을 Building for Environmental and Economic Sustainability(BEES) 도구에 통합하고 있다.

[그림 2-13] 「연방 지속가능성 계획」 주요 내용



출처: White House(n.d.)<sup>20)</sup>

## 2.2 공정전환 및 경쟁법

EU CBAM 도입을 예고로 미국도 유사한 개념의 제도인 「공정전환경쟁법 (Fair, Affordable, Innovative, and Resilient Transition and Competition Act or the ‘Fair Transition and Competition Act’ )」 도입을 검토 중이다. 「공정전환경쟁법」은 대규모의 미국 연방 재원조달 방안의 하나로 탄소국경조정세를 부과하는 제도이며 바이든 행정부가 2021년 7월 19일에 발의했으며 현재 검토 중이다.

해당 발의안에 따르면 미국 내 기후변화 법규를 준수하는 기업의 경쟁력을 보호하고,

20) White House(n.d.), The Federal Sustainability Plan: Catalyzing Clean Energy Industries and Jobs Through Federal Sustainability, <https://www.sustainability.gov/federalsustainabilityplan/>

탄소저감을 위해 노력하지 않는 ‘기후변화 무임승차국’ 제품에 대하여 미국에서 부과되는 환경비용만큼 세금을 부과하겠다는 것이 주요 내용이다. 탄소국경조정 수수료는 미국 내 적용 대상 제품의 단위 탄소당 환경비용을 제품 탄소배출량에 곱하여 산출하고 해당 수입제품이 미국 내에서 생산했을 때 부과되는 탄소 비용과 유사하게 적용될 것으로 예상된다.

2024년 1월 1일부터 화석연료, 알루미늄, 철강, 시멘트의 품목이 50% 이상 함유된 탄소 다 배출 제품에 대해 탄소국경조정부담금이 부과될 예정이며, EU CBAM이 초기에 LCA 기법 적용이 논의되었던 것처럼 미국의 「공정전환 및 경쟁법」의 경우도 LCA 방식을 검토 중이며 전과정 개념을 기반으로 Greenhouse Gas Index를 개발, 국가/제품별 대상 제품의 온실가스 배출계수 적용이 예상된다.

### 3. 한국

#### 3.1 환경산업기술원 환경성적표지 인증제도

국내에서는 2001년 「환경기술 및 환경산업 지원법」 제18조에 근거하여, 환경산업기술원을 주관으로 환경성적표지 인증제도를 시행하였고 2011년부터 저탄소제품 인증제도를 시행하고 있다. 이는 LCA 및 환경라벨링 국제표준 ISO 14044, 14040, 14025를 근간으로 둔 Type III 인증제도로 제품 및 서비스의 환경성 제고를 위해 제품 및 서비스의 원료채취, 생산, 수송·유통, 사용, 폐기 등 전과정에 대한 환경영향을 숫자로 계량화하여 표시하고 총 7대 환경영향 범주(탄소발자국, 물발자국, 오존층영향, 산성비, 부영양화, 광화학 스모그, 자원발자국)에 대한 각각의 결과값을 보다 정확하고 투명한 정보를 소비자에게 제공함으로써 잠재적으로 시장주도의 지속가능한 생태계 구축에 기여하는 데 그 목적이 있다.

[그림 2-14] 환경산업기술원에서 지원하는 2가지 인증제도 및 7대 환경영향범주



출처: 한국환경산업기술원 (n.d.).

환경성적표지인증 획득을 희망하는 기업은 제품 전과정에 대한 환경성평가 도구인 LCA를 수행하여야 하며, 그 결과가 환경성 정보로 제공되어야 한다. 환경성적표지인증은 법적 강제 인증제도가 아니라 기업의 자발적 참여에 의한 임의 인증제도이기 때문에 환경성적표지 인증제품은 자발적으로 제품의 환경성 정보를 공개한 제품이므로 환경 신뢰성이 우수한 제품이라고 볼 수 있다.

2009년, 환경성적표지 제도에 근거하여 별도의 탄소성적표지 제도를 도입하였고, 탄소발자국에 대한 정보만 정량화하여 공개하는 인증제도를 운영하였으나, 2016년 7월 「환경기술 및 환경산업 지원법」 개정에 따라 환경성적표지와 탄소성적표지제도를 통합하였다.

저탄소인증은 환경성적표지 인증받은 제품 중 탄소배출량을 줄이고(최소탄소감축률 기준), 동종제품의 평균배출량(최대허용배출량 기준)보다 적은 제품에 대하여 인증을 부여하는 제도라고 할 수 있다. 최대허용탄소배출량 기준은 환경성적표지 인증받은 동종제품의 평균 탄소배출량을 기초로 설정하며, 최소탄소감축률 기준은 정부의 국가 온실가스 감축목표를 기초로 3.3% 이상으로 설정하였다. 특히, 2020년 7월 녹색제품구매법 개정으로 저탄소인증 제품이 ‘녹색제품’으로 분류됨에 따라 공공기관 의무구매 대상으로 지정했다. 최근에는 국제 탄소규제(CBAM, EU PEF) 대응을 위하여, 2030년까지 총 120개 제품군에 대한 환경성적표지 작성지침을 ISO 14027 및 EU PEF 방법론에서 요구하고 있는 항목에 따라 개발함으로써 해외 상호인정을 위한 기반을 마련하고자 한다.

### 3.2 한국에너지공단 태양광 모듈 탄소검증제

한국에너지공단에서 운영하고 있는 탄소검증제란 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 제27조 제1항 및 동법 시행령 제27조 제3항에 근거하여 태양광 모듈 제품의 친환경성 강화와 글로벌 온실가스 감축 등에 기여하기 위하여 태양광 모듈 제품의 제조 전과정에서 배출되는 탄소 총량을 kg당 CO<sub>2</sub>를 계량화하여 관리하는 제도이다.

탄소배출량 산정은 두 가지 방식으로 할 수 있다. 첫 번째는 표준배출계수에 의한 방식, 두 번째는 LCA에 의한 산정방식이다. 표준배출계수 방식은 태양광모듈 탄소배출량 산정 및 검증지침의 표준배출계수를 이용하여 배출량 산정하며 LCA 방식 한국환경산업기술원의 환경성적표지와 동일하게 태양광 모듈 제조 전과정에서 발생하는 탄소배출량을 산정한다. 본 탄소검증 또한 의무제도가 아니며, 검증신청자의 필요에 따라 신청할 수 있고 검증인증서를 취득한 태양광 모듈은 “저탄소 태양광 모듈 제품 지원에 관한 운영지침”에 따라, 한국에너지공단에서 추진하는 공급의무화제도 및 보급지원사업 등에 우대 혜택을 받을 수 있게 된다.

## 제 4 절 탄소발자국 시뮬레이터 개발 동향

1~3절에서 LCA 및 탄소발자국 산정방법론, 국제표준화 및 정책동향에 대하여 분석 결과 향후 LCA 기반의 탄소발자국 산정의 중요성이 대두될 것을 알 수 있었다. 이에 따라 본 절에서는 현재 개발되어 있는 탄소발자국 및 LCA 시뮬레이터 기능에 대하여 분석하여 향후 비 전문가용 탄소발자국 시뮬레이터 개발 방향을 모색하였다.

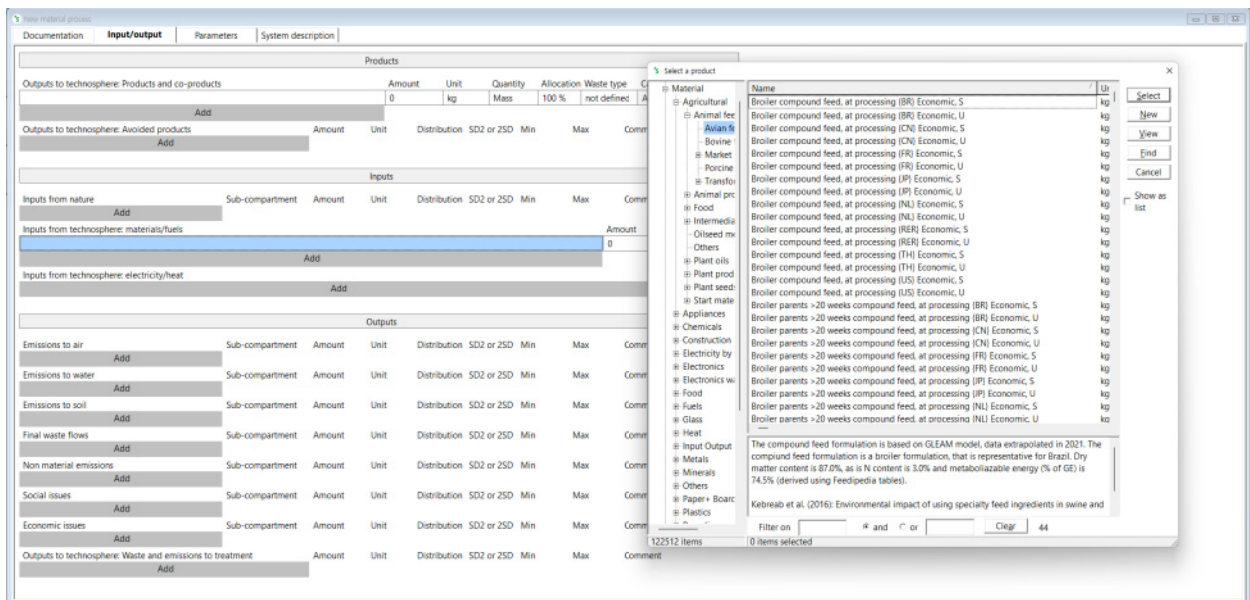
### 1. LCA 시뮬레이터 개발 동향

#### 1.1 Simapro

Simapro는 네덜란드 PRe Consulting 사에서 개발한 소프트웨어로, 2022년 현재 Simapro 9.4까지 개발되어 있다. 해당 소프트웨어에서는 1절에서 소개한 공공 LCI DB인 Ecoinvent, Agrifootprint, USLCI DB가 탑재되어 있다.

연구자가 분석하고자 하는 제품이 정해지면 제품생산을 위한 단위공정의 집합인 제품시스템을 구성하게 되며, 각각의 단위공정별 데이터를 수집하게 된다. Simapro에서는 [그림 2-15]와 같이 단위공정별 투입/산출물을 입력하게 되며, 이때 단위공정에서 투입되는 원료, 부자재와 배출되는 폐수의 처리방법에 대한 DB를 사용자가 직접 선택하여 입력하게 한다. DB 원료 수급 국가, 기술에 따라 별도로 구축되어 있기 때문에, 산업계에서는 활용 가능성이 높지만 연구개발자가 활용할 경우에는 이러한 정보를 알기 힘들 수 있다.

[그림 2-15] Simapro 사용 시 단위공정별 투입/산출 입력 기능

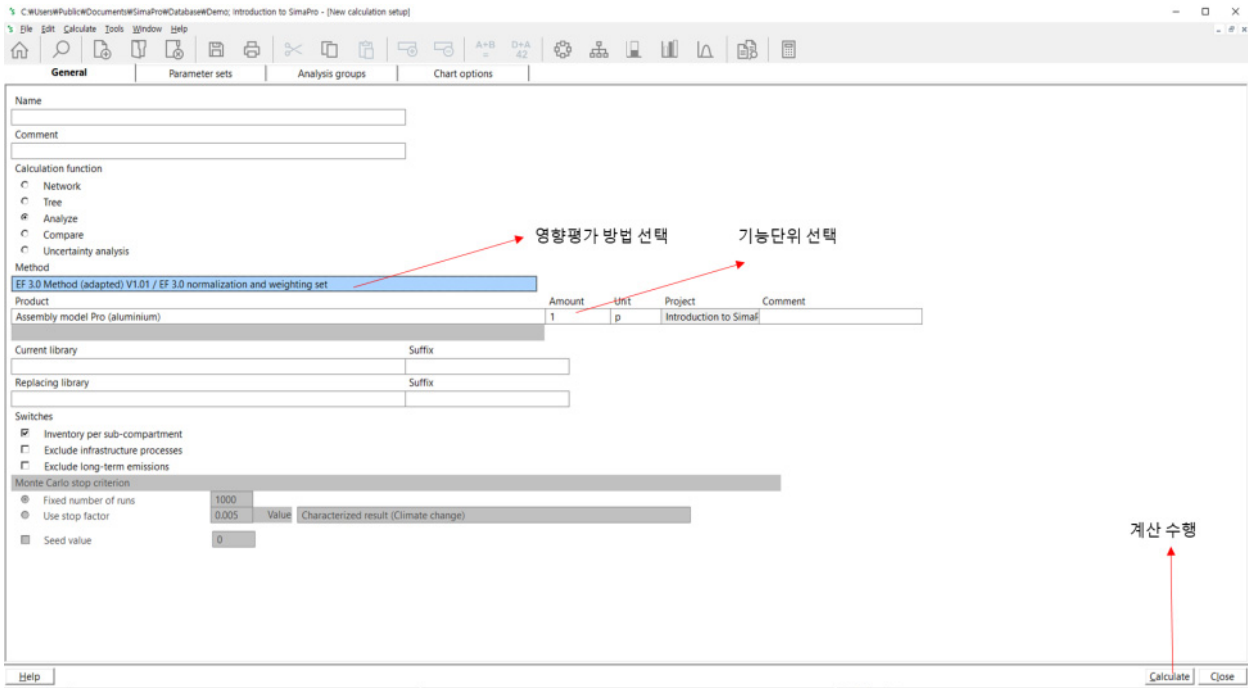


또한 단위공정별 투입/산출에 대한 데이터 입력 시 부산물이 함께 발생할 경우 Simapro에서는 할당계수를 직접 입력하는 방식으로 구현되어 있기 때문에 LCA에 대한

전문적인 지식이 없는 사용자의 경우 결과의 오류를 발생시킬 수도 있다.

마지막으로 단위공정에 대한 투입/산출 데이터 입력, DB 및 할당계수를 모두 입력하면 아래 [그림 2-16]과 같이 기능단위에 따른 환경영향을 분석할 수 있다. 다만 이 경우에도 LCA 비전문가인 사용자가 직접 기능단위 및 영향평가 방법을 선택해야 한다는 단점이 있다.

[그림 2-16] Simapro 기능단위 및 영향평가 방법 선택 기능

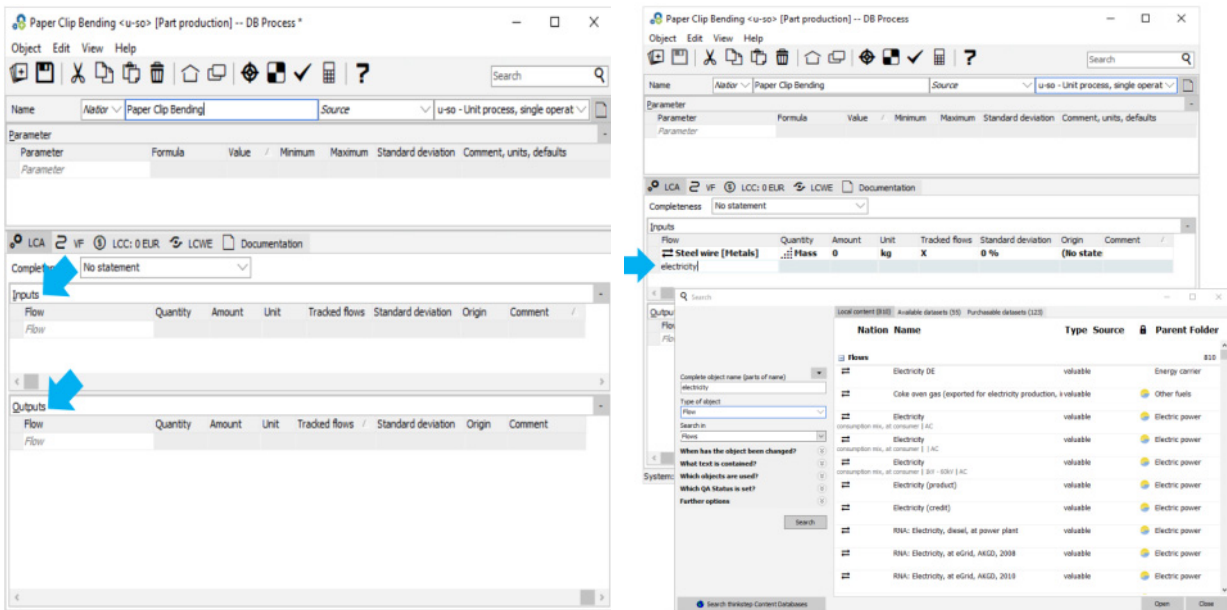


## 1.2 GaBi

GaBi 소프트웨어는 KIP(Institute for Polymer testing and Polymer science, University of Stuttgart)와 PE Europe GmbH Leinfelden-Echterdingen)사가 공동으로 개발하였으며 현재는 Sphera사에서 관리하고 있다. 개발 당시에는 자동차 업계를 타겟으로 개발하였으나 현재는 다양한 산업군에서 활용하고 있다. 해당 소프트웨어에서는 Sphera사에서 개발한 자체 DB가 내장되어 있으며 Ecoinvent 등 다양한 DB와 호환 가능하도록 설계되어 있다.

GaBi에서도 Simapro와 마찬가지로 [그림 2-17]과 같이 단위공정별 투입/산출물을 입력하게 되며, 이때 단위공정에서 투입되는 원료, 부자재와 배출되는 폐수의 처리방법에 대한 DB를 사용자가 직접 선택하여 입력하게 한다.

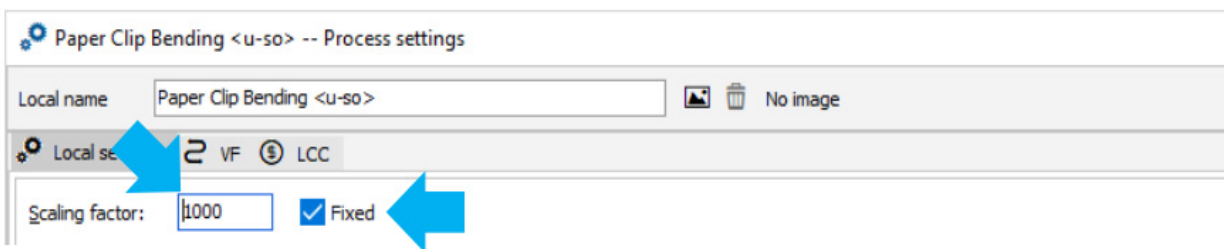
[그림 2-17] GaBi 사용 시 단위공정별 투입/산출 입력 기능



Simapro와 차이점은 단위 공정별 데이터를 모두 입력한 후 공정 간 연결 시 사용자 편의를 위하여 시각적으로 구현할 수 있도록 개발되어 있다는 것이다. 할당의 경우 사용자가 제품 및 부산물의 물리적 특성(질량, 에너지 함량, 부피 등)을 입력하면 생산량, 경제적 가치 등으로 할당 방법을 선택할 수 있도록 설계가 되어 있다.

마지막으로 단위공정에 대한 투입/산출 데이터 입력, DB 및 할당방법을 선택하면 [그림 2-18]과 같이 기능단위를 정의하고 환경영향을 정량화할 수 있다. 영향평가 방법론의 경우 Simapro와 달리 Default 값으로 방법론이 정의되어 있으나, 사용자가 선택하여 변경할 수 있다.

[그림 2-18] GaBi 기능단위 선택 기능



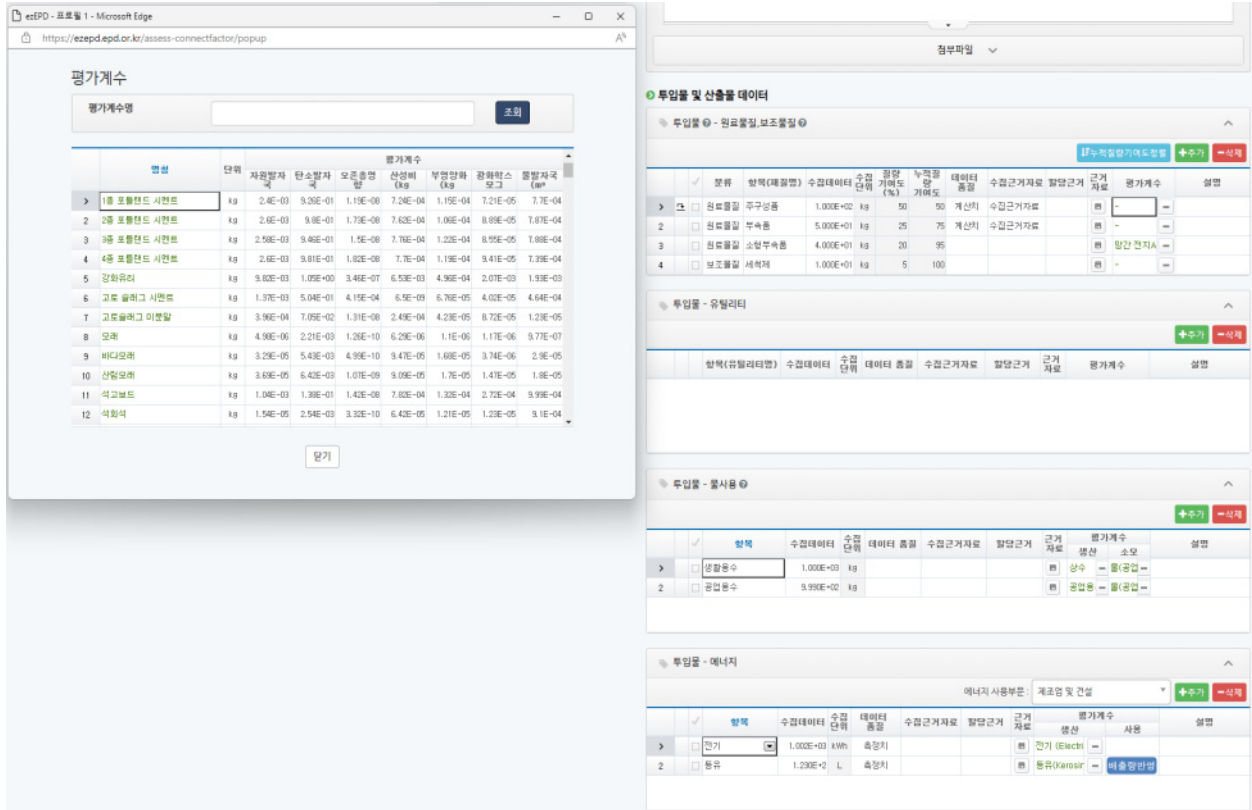
### 1.3 ezEPD

ezEPD는 환경부 환경산업기술원에서 개발한 시스템으로, 환경부에서 진행하고 있는 환경성적표지인증을 지원하기 위한 시스템이다. 해당 시스템은 환경부, 산업부에서 2000년대 초에 개발한 국내 LCI DB를 사용하게 되어 있으며 부재한 DB의 경우 별도로 Ecoinvent DB를 활용하도록 안내하고 있다.

ezEPD에서도 [그림 2-19]와 같이 단위공정별 투입/산출물을 입력하게 되어 있으며, 국내

DB를 선택하여 입력하게 된다. Simapro 및 Gabi와 다른 점은 전과정 단계를 지정하여 각 단계(예. 제조전단계, 제조단계 등)별로 입력하도록 설계되어 있다.

[그림 2-19] ezEPD 단위공정별 투입/산출 입력 기능



할당의 경우 사용자가 앞서 설명한 소프트웨어와 다르게 사용자가 직접 데이터 입력 시 적절한 근거를 바탕으로 할당한 후 데이터를 입력하도록 설계되어 있으며 근거를 [그림 2-20]과 같이 직접 입력하게 된다.

기능단위도 마찬가지로, 사용자가 입력하게 되며 제조단계의 제품 수집 데이터와 매칭을 통해 자동으로 기능단위당 환경영향을 산정하게 되어 있다. 본 시스템은 환경성적표지인증만을 위한 시스템이므로 총 7개의 환경영향범주에 대하여 지정된 방법론으로 결과값이 도출되게 된다.



[그림 2-20] ezEPD 기능단위 및 할당근거 입력 기능

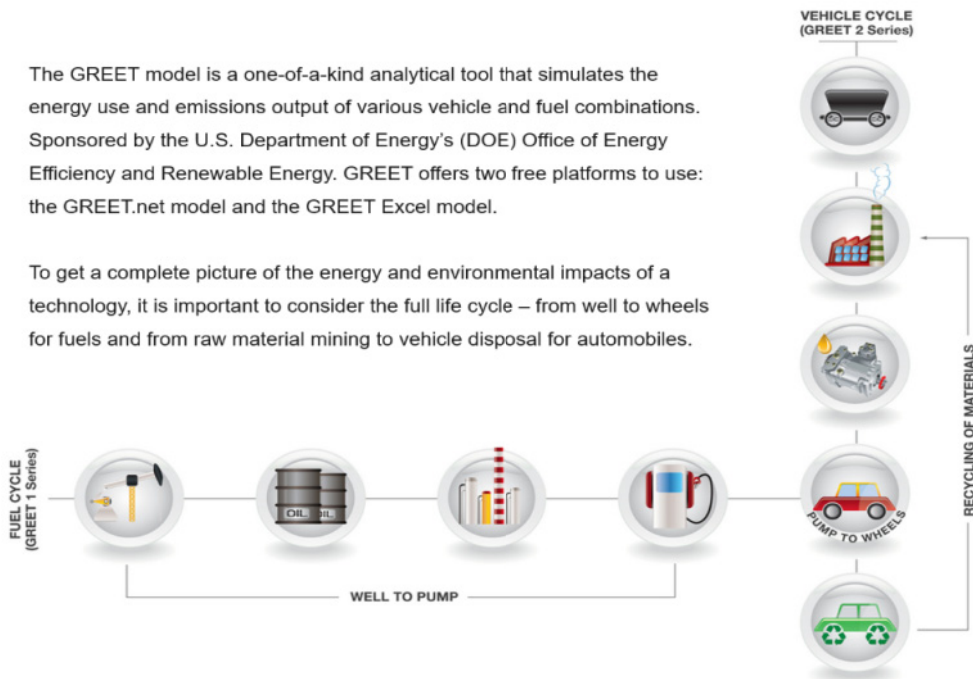
프로젝트명	생산재(Sample)															
제품 개요																
담당자																
일반정보	<p>양식 다운로드</p> <p>한글 워드 엑셀</p>	<p>작성파일 업로드</p> <p>추가</p>														
제품 구분	<input checked="" type="radio"/> 생산재 <input type="radio"/> 서비스 <input type="radio"/> 비내구재 <input type="radio"/> 에너지비사용내구재 <input type="radio"/> 에너지사용내구재 <input type="radio"/> 건축물 <input type="radio"/> 기타															
기능단위	1															
제품양	<table border="1"> <thead> <tr> <th>구분</th> <th>값</th> <th>단위</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>제품</td> <td>1,000</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">포장재</td> <td>최소포장</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>출하포장</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>합계</td> <td>1,011</td> <td>kg</td> </tr> </tbody> </table>		구분	값	단위	제품	1,000	kg	포장재	최소포장	10	출하포장	1	합계	1,011	kg
구분	값	단위														
제품	1,000	kg														
포장재	최소포장	10														
	출하포장	1														
합계	1,011	kg														
할당근거																

## 2. 탄소발자국 시뮬레이터 개발동향

### 2.1 GREET model

GREET(Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies)는 미국 Department of Energy(DOE)로부터 지원을 받아 1996년에 개발되었다. 본 모델은 엑셀 기반의 수송용 연료에 대한 탄소발자국 산정 모델이며, 엑셀과 연동하여 GUI 형태로도 이용할 수 있도록 설계되어 있다. GREET는 Fuel Cycle과 Vehicle Cycle 두 가지 형태로 나누어져 있으며 Fuel Cycle에서는 원료생산, 운송, 연료생산 및 사용까지를 고려하고 있으며, Vehicle Cycle에서는 자동차 부품, 재질 등을 생산하기 위한 탄소발자국을 고려하고 있다.

[그림 2-21] GREET model에서 고려하고 있는 탄소발자국 산정 범위



GREET model은 총 56개 Sheet로 구성되어 있으며 각 Sheet는 서로에게 영향을 미치도록 함수로 연결되도록 설계되어 있다. 데이터 입력의 경우 위에서 설명한 LCA 소프트웨어와 달리 단위공정별 및 전과정 단계별 데이터를 하나의 Sheet에서 입력하는 것이 아니라, 여러 Sheet에서 입력하게 설계되어 있다. 예컨대, 바이오디젤의 탄소발자국 산정 시에 바이오매스 경작 및 바이오디젤 생산을 위한 에너지소비량은 [그림 2-22]와 같이 “BioOil” Sheet에서 작성하게 된다.

[그림 2-22] GREET model 에너지소비량 입력 Sheet

Assumptions for Soybean, Palm and Canola Farming and Oil Extraction						
	Soybean	Palm Oil	Canola	Jatropha	Camelina*	Carinata
Farming Energy Unit	Btu/bushel	Btu/ton dry	MJ/MT dry	Btu/kg dry	Btu/kg dry	Btu/kg dry
Farming Energy	13,724	217,034	610	1,409	1,118	1,630
Bio Oil Extraction (Btu/lb of Bio Oil)	3,073	79.8	1,316	852	659	1,230
Loss Factor for Oil Extraction	1.9%	6.3%	4.0%	4.0%	4.0%	4.0%
Biomass Use for Oil Extraction (dry t/bt bio oil)	4.6	3.4	2.2	2.8	2.5	2.3
Biomass share for process fuel biomass						
	Willow	Poplar	Switchgrass	Miscanthus	Corn Stover	Forest Residue
	0%	0%	0%	0%	0%	100%

바이오매스 경작과정에서 소비되는 비료, 제초제, 살충제의 생산과 관련된 upstream에 대한 에너지 사용량 및 온실가스 배출량 데이터는 “Ag\_inputs” Sheet에서 작성하게 된다.

[그림 2-23] GREET model 상위흐름(upstream) 데이터 입력 Sheet

3) Calculation of Energy Use, Water Consumption, and Emissions of Fertilizer Production: Production Processes Only												
	Ammonia Combined (per ton of product)				Conventional Ammonia (per ton of product)				Green Ammonia (per ton of product)			
	Production	Process emissions	Transportation (as fertilizer product)	Transportation (as intermediate fertilizer inputs)	Production	Process emissions	Transportation (as fertilizer product)	Transportation (as intermediate fertilizer inputs)	Production	Process emissions	Transportation (as fertilizer product)	Transportation (as intermediate fertilizer inputs)
Urban emission share					0.0%				0.0%			
Share of total NG input as fuel					25.3%							
Energy Inputs: mmBtu per ton, except as noted					21,788				0.000	1.002		
Total Energy Input					0.404							
Natural Gas												
Electricity												
Residual Oil												
Diesel Fuel												
Coal												
LPG												
Gasoline												
Material Inputs: ton per ton, except as noted									0.822	0.178		
Nitrogen (N <sub>2</sub> )												
Hydrogen (H <sub>2</sub> )												
Chlorine (Cl <sub>2</sub> )												
Ammonia (NH <sub>3</sub> )												
Urea ((NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CO)												
Nitric Acid (HNO <sub>3</sub> )												
Ammonium Nitrate												
Phosphoric Acid (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )												
Limestone (CaCO <sub>3</sub> )												
Sulfuric Acid (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )												
Phosphoric Rock (Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> )												
Sodium Chloride (NaCl)												
Potassium Chloride (KCl)												
Potassium Hydroxide (KOH)												
Lanbanite (K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)												

사용자 편의를 고려하기 위하여 엑셀 기반으로 구현하였지만, 너무 많은 Sheet로 구성되어 있고 각각의 Sheet의 연계성을 알아야 하므로 LCA에 대한 개념이 부족한 비전문가들이나 처음 시스템을 사용하기에는 접근성이 상대적으로 떨어진다고 판단된다.

할당의 경우 상기 설명한 LCA 소프트웨어와 유사하게 사용자가 에너지 함량, 시장가격, 질량 기반 할당방법 중 직접 선택하는 것으로 설계되어 있다. 다만 특이한 점은 할당방법 외에 대체방법(Displacement)을 선택할 수 있도록 설계되어 있다. 예컨대, 바이오디젤 생산 시 글리세린이 발생하는데 이를 기존 석유 기반 글리세린을 대체 할 수 있다고 가정을 하게 된다. 이후 바이오디젤 및 글리세린 생산 시 발생하는 총 탄소발자국에 기존 석유기반의 글리세린의 탄소발자국을 제외해주는 개념이다.

[그림 2-24] GREET model 할당방법 정의 기능

Allocation Method					
Method for dealing with co-products					
	Biodiesel	Renewable diesel 1	Renewable diesel 2	Renewable gasoline	
System level allocation for soy and jatropha based fuel	1	1	1	1	
Process level allocation for all biooil-based fuels					
Feedstock	Soy oil	Palm Oil	Canola	Jatropha	1- Displacement
Fuel	Oil Extraction Process	4	4	2	2- Energy-based Allocation
	Fuel Production	Biodiesel	Renewable diesel 1	Renewable diesel 2	Renewable gasoline
		3	2	2	3- Market Value-based Allocation
					4- Mass-Based Allocation

REET model의 경우 수송용 연료에 대한 시뮬레이션 틀이므로 활용 대상이 다른 시뮬레이션 틀보다는 명확하다. 따라서 본 시뮬레이터에서는 사용자가 직접 기능단위를 정의하지 않고 에너지 및 이동 거리를 기능단위로 설정하여 두 가지 결과를 모두 제시되도록 설계되어 있으며, 전과정 단계별(원료생산, 연료생산, 사용) 결과를 산출할 수 있다.

[그림 2-25] REET model 탄소발자국 결과 예시

Item	Btu/mile or Gallon/mile or g/mile				Btu/MJ or Gallon/MJ or g/MJ			
	Feedstock		Vehicle Operation		Feedstock		Vehicle Operation	
	Feedstock	Fuel	Vehicle Operation	Total	Feedstock	Fuel	Vehicle Operation	Total
Total Energy	196	1,290	4,085	5,572	46	299	948	1,293
Fossil Fuels	184	1,046	3,367	4,597	43	243	781	1,067
Coal	16	38	0	54	4	9	0	13
Natural Gas	134	891	0	1,025	31	207	0	238
Petroleum	34	117	3,367	3,518	8	27	781	816
Water Consumption	0.1	0.3	0	0	0	0	0	0
CO2 (w/ C in VOC & CO)	-38	75	312	350	-9	17	73	81
CH4	0.280	0.201	0.015	0.496	0.065	0.047	0.003	0.115
N2O	0.000	0.029	0.004	0.033	0.000	0.007	0.001	0.008
GHGs	-29	89	314	374	-7	21	73	87
VOC: Total	0.011	0.127	0.230	0.368	0.003	0.029	0.053	0.085
CO: Total	0.023	0.056	2.741	2.820	0.005	0.013	0.636	0.654
NOx: Total	0.035	0.100	0.082	0.218	0.008	0.023	0.019	0.050
PM10: Total	0.002	0.016	0.035	0.052	0.000	0.004	0.008	0.012
PM2.5: Total	0.001	0.008	0.007	0.017	0.000	0.002	0.002	0.004
SOx: Total	0.008	0.031	0.002	0.041	0.002	0.007	0.000	0.009
BC Total	0.000	0.001	0.003	0.004	0.000	0.000	0.001	0.001
OC Total	0.001	0.001	0.002	0.004	0.000	0.000	0.000	0.001
VOC: Urban	0.002	0.063	0.161	0.226	0.000	0.015	0.037	0.052
CO: Urban	0.001	0.010	1.919	1.930	0.000	0.002	0.445	0.448
NOx: Urban	0.002	0.016	0.058	0.075	0.000	0.004	0.013	0.017
PM10: Urban	0.000	0.003	0.024	0.027	0.000	0.001	0.006	0.006
PM2.5: Urban	0.000	0.003	0.005	0.008	0.000	0.001	0.001	0.002
SOx: Urban	0.001	0.005	0.001	0.007	0.000	0.001	0.000	0.002
BC: Urban	0.000	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
OC: Urban	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000

## 2.2 GHGenius model

GHGenius는 2003년 (S&T) Squared Consultants Inc.에서 개발한 수송 연료의 탄소발자국 산정 시뮬레이터이며, REET model과 동일하게 엑셀 기반의 시뮬레이터이지만 GUI를 지원하지 않는다. 본 시뮬레이터는 처음 캐나다에 특화되어 있는 데이터를 적용하였으나 지속적으로 업데이트를 진행함으로써 미국, 멕시코 등 다양한 지역을 포함하고 있다.

GHGenius도 REET과 유사하게 총 47개의 Sheet로 구성되어 있으며, 각 Sheet는 서로에게 영향을 미치도록 함수로 연결되도록 설계되어 있다. 대부분의 각 단위공정 및 전과정 단계별 데이터 입력은 크게 “Input”, “Alt Fuel Prod” Sheet에서 진행한다. “Input” Sheet에서는 [그림 2-26]과 같이 바이오매스 생산공정, 바이오에너지 생산공정, 제초제 생산공정 등 거의 대부분의 데이터를 입력할 수 있도록 설계되어 있다.

[그림 2-26] GHGenius 투입/산출 데이터 입력 기능

PRODUCTION OF BIOMASS (Sheet: Biomass Production)										
Fertilizer & pesticides usage										
	N	P2O5	K2O	Limestone	Sulphur	Gypsum	Pesticides	Seeds	Fraction	Fraction
	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	Area Burned	Mechanically Harvested
<b>(Post-harvest loss considered in Sheet Biomass Production)</b>										
Corn (per tonne), Base year 1994	7.45	9.20	0.00	0.68	0.00	0.34	2.32			
Canola (per tonne), 2000	17.10	4.00	0.00	8.40	0.00	0.80	4.00			
Soybean (per tonne), 1994	6.30	9.89	0.00	0.74	0.00	0.52	41.67			
Palm (per tonne), 2000	3.00	11.50	0.00	3.00	0.00	0.15	0.00			
Jatropha (per tonne), 2008	3.25	14.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
Camelina (per tonne), 2012	17.10	4.00	0.00	8.40	0.00	0.80	4.00			
Algae (per tonne), 2009	5.00	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
Wood (per tonne), Base Year 2005									Wood Residue	Active value
Switchgrass (per tonne), 2000	1.65	2.75	0.00	0.00	0.00	0.30	0.00			
Corn Stover (per tonne)	1.50	11.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
Wheat Straw (per tonne)	1.85	15.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
Hay (per tonne)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
Whole Corn (per tonne), 2000	3.14	6.70	1.39	0.00	0.00	0.12	1.50			
Wheat (per tonne), 2015	8.40	2.30	0.00	1.30	0.00	0.21	35.10			
Barley (per tonne), 2015	7.50	3.10	0.00	1.40	0.00	0.30	34.18			
Peas (per tonne), 2015	9.60	1.20	0.00	1.20	0.00	0.53	69.50			
Sugarcane (per tonne), 2004	0.64	1.23	10.70	0.00	4.35	0.05	30.00	0.00	1.00	
Sugar beet (per tonne), 2007	0.73	1.99	24.58	0.00	0.00	0.07	0.07			If J122 is changed, the default
Sorghum (per tonne), 2003	4.87	0.65	0.00	0.00	0.00	0.65	1.50			
Fish (per tonne) 2000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
Nitrogen emissions from manure? (if no, emissions are assigned to livestock)	No									
<b>Fuel and power usage</b>										
	Diesel	Residual Fuel	Natural Gas	Coal	Electricity	Gasoline	LPG	Biodiesel	Ethanol	
	L	L	MJ	kg	kWh	L	L	L	L	
<b>(Post-harvest loss considered in Sheet Biomass Production)</b>										
Corn (per hectare), Base year 2010	37.40	0.00	66.0	0.00	18.00	17.90	18.90	0.00	Soy Oil	0.00
Canola (per hectare), 1994	28.99	0.00	1.6	0.00	6.89	0.00	0.00	0.00	Canola Oil	0.00
Soybean (per hectare), 2012	26.50	0.00	0.0	0.00	27.10	9.80	3.40	0.00	Soy Oil	0.00
Palm (per hectare), 2000	74.67	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Soy Oil	0.00
Jatropha (per hectare), 2008	83.73	0.00	0.0	0.00	47.64	0.00	0.00	0.00	Soy Oil	0.00
Camelina (per hectare), 2012	29.00	0.00	1.7	0.00	6.90	0.00	0.00	0.00	Soy Oil	0.00
Algae (per hectare), 2009	1.00	0.00	11.0	0.00	300.00	0.00	0.00	0.00	Soy Oil	0.00
Wood (per hectare), Base Year 2005	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Soy Oil	0.00
Switchgrass (per hectare), 2000	92.66	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Soy Oil	0.00
Corn Stover (per hectare)	59.01	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Soy Oil	0.00
Wheat Straw (per hectare)	4.30	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Soy Oil	0.00
Hay (per hectare)	60.96	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Soy Oil	0.00
Whole Corn (per hectare), 2000	97.50	0.00	5.989	0.00	739.67	0.00	86.74	0.00	Soy Oil	0.00
Wheat (per hectare), 2015	30.10	0.00	23.2	0.00	5.60	0.00	0.00	0.00	Soy Oil	0.00
Barley (per hectare), 2015	31.00	0.00	37.2	0.00	7.50	0.00	0.00	0.00	Soy Oil	0.00
Peas (per hectare), 2015	26.90	0.00	36.0	0.00	7.40	0.00	0.00	0.00	Soy Oil	0.00
Sugarcane (per hectare), 2004	340.00	0.00	0.0	0.00	37.00	0.20	0.00	37.50	Soy Oil	13.00
Sugar beet (per hectare), 2007	207.11	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Soy Oil	0.00
Sorghum (per hectare), 2003	34.80	0.00	2.402	0.00	0.00	0.00	21.29	0.00	Soy Oil	0.00
Fish Oil (per litre) 2018	0.50	0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Soy Oil	0.00

다만, 바이오에너지 생산공정에서 투입되는 부자재(예, 촉매, 산 등)는 [그림 2-27]과 같이 “Alt Fuel Prod” Sheet에서 입력하도록 설계되어 있다. 이러한 입력체계 또한 GREET과 유사하게 Sheet의 연계성을 알아야 하므로 시뮬레이터를 처음 접하는 사용자 입장에서는 입력에 있어 어려움을 느낄 수 있다고 판단된다.

[그림 2-27] GHGenius 바이오에너지 생산공정 투입 부자재 입력 기능

PRODUCTION OF ALTERNATIVE FUELS										
Fuel -->	FTD100	FTD100	BTL100	FTD100	FTD100	FTD100	Gasoline	Gasoline	MA100	MA100
Feedstock -->	NG	Coal	Wood	RDF	LFG	Electricity	NG	Wood	Wood	RDF
Base year -->	1994	2000	2012	2000	2017	2020	2014	2012	2012	2000
Inputs (below) per output -->	litre	litre	litre	litre	litre	litre	litre	litre	GJ	GJ
Ratio of feedstock energy** to fuel output energy	1.75	1.79	2.39	2.14	1.91		1.75	2.51	2.18	2.59
Acetic acid, (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ammonia (NH3) (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ammonium sulphate (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Bleaching Earth (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Calcium chloride (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Carboxymethyl cellulose (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Citric acid (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2 (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.60	0.00	0.00	0.00	0.00
Cobalt Catalyst (Co(NO3)2) (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEGMME (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Dimethyl disulphide (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Enzymes (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ethanol (L)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hydrochloric acid, kg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hydrogen (kg) see below	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Iron Chloride (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Limestone (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Magnesium silicate (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Magnesium sulphate (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Methanol (L)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Monoethanolamine (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NaOH (kg) (100%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
Nitric acid (kg) (100%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nitrogen - liquid (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Nitrogen - gaseous (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Olivine (kg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

할당방법과 관련해서는 GREET와 유사하게, 대체방법, 질량, 에너지 기반 방법론으로 나누어 사용자가 선택할 수 있도록 구현되어 있다. 다만, 차이점은 경제적 가치에 대한 할당방법은 제외되어 있으며 [그림 2-28]과 같이 각 투입물별 할당방법을 별도로 선택하게 되어 있다는 점이다.

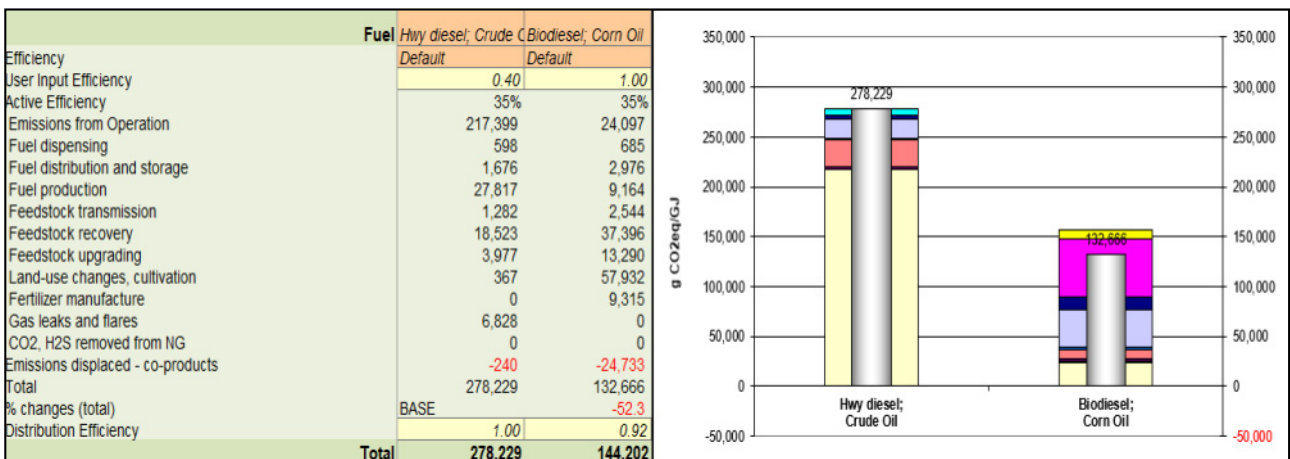
[그림 2-28] GHGenius 투입물 별 할당방법 선택 기능

Coproducts for All Fuels	Energy Density		
	Allocation by	MJ per unit	kg per unit
Acetic Acid (kg)	Mass	14.5	1.0
Acetone (kg)	Displacement	25.5	1.0
Ethanol (L)	Energy	23.6	0.8
K Fertilizer (kg)	Displacement	0.0	1.0
N Fertilizer (kg)	Displacement	0.0	1.0
P Fertilizer (kg)	Displacement	0.0	1.0
S Fertilizer (kg)	Displacement	0.0	1.0
G Fertilizer (kg)	Displacement	0.0	1.0
Furfural (kg)	Displacement	24.4	1.0
Glycerine (feed) (kg)	Displacement	18.1	1.0
Glycerine (fuel) (kg)	Displacement	18.1	1.0
Glycerine (crude) (kg)	Displacement	18.1	1.0
Glycerine (refined) (kg)	Displacement	18.1	1.0
Hydrogen (kg)	Displacement	141.2	1.0
Lignin (kg)	Displacement	25.6	1.0
Biochar (kg)	Mass	32.0	1.0
Other Gaseous (displacing same feedstock origin) (L)	Energy	25.6	0.5
Other Gaseous (displacing opposite feedstock origin) (L)	Displacement	25.6	0.5
Other Liquid (displacing same feedstock origin) (L)	Displacement	34.7	0.7
Other Liquid (displacing opposite feedstock origin) (L)	Energy	34.7	0.7
Renewable Natural Gas	Displacement	1.0	0.0
Propylene Glycol (kg)	Displacement	33.0	1.0
Xylitol (kg)	Displacement	16.9	1.0
Fuel Gas (kg)	Displacement	54.6	1.0
Placeholder coproduct (kg)	Displacement	20.0	1.0
Placeholder coproduct (kg)	Displacement	20.0	1.0
Placeholder coproduct (kg)	Displacement	20.0	1.0

1절에서 설명한 바와 같이, 할당방법에 따라 결과값이 차이가 크게 발생할 수 있다. 본 시뮬레이터에서는 할당에 대한 별도의 가이드를 제시하지 않으므로 LCA에 대한 전문성이 없는 사용자의 경우 할당방법 선택의 오류로 인하여 결과값이 정확하지 않을 수 있다고 판단된다.

데이터 입력 및 할당방법 선택이 완료되면, GREET과 동일하게 연료별 탄소발자국 결과값을 조회할 수 있다. GHGenius에서도 마찬가지로 사용자가 직접 기능단위를 정의하지 않고 에너지 및 이동 거리를 기능단위로 설정하여 두 가지 결과를 모두 제시되도록 설계되어 있다. 대신 [그림 2-29]와 같이 GREET보다 더 상세히 전과정 단계별 결과값을 제시할 수 있으며, 기존 화석연료 대비 탄소발자국의 감축효과를 시각적으로 볼 수 있도록 설계되어 있다.

[그림 2-29] GHGenius 탄소발자국 결과 예시



## 2.3 태양광 모듈 탄소배출량 검증 시스템

산업통상자원부에서 2020년 시행된 “신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법” 제27조를 근거로 탄소검증제가 도입되었으며, 그 결과 태양광 모듈 탄소배출량 산정 시트가 개발되었다. 본 시뮬레이터는 ezEPD와 동일하게 산업계 태양광 모듈에 대한 인·검증을 지원하는 시스템이며, 검증신청자는 탄소배출량 산정 시트 및 LCA에 의한 방법 중 하나를 선택하여 탄소배출량 산정 및 검증이 가능하다. 여기서는 탄소배출량 산정 시트에 대하여 아래에 작성하였다.

태양광 모듈 탄소배출량 산정 시트는 GREET 및 GHGenius와 동일하게 엑셀 기반으로 설계되어 있으며, 총 6개의 Sheet로 구성되어 있다. 데이터 입력은 “단위투입량 산출시트”에서 입력하게 되며, 입력한 값은 “표준배출계수 계산시트”와 함수로 연계되어 있다. [그림 2-30]과 같이 “단위투입량 산출시트”에서는 태양광 모듈을 구성하고 있는 부품 및 재질 리스트를 제공하고 정량적인 값을 입력하게 되어 있으며 생산하는 모듈의 면적을 입력하도록 설계되어 있다. 또한 시뮬레이터에 제시되어 있지 않은 성분 이외의 성분이 포함되는 경우에는 별도로 기재하게 되어 있다.

[그림 2-30] 태양광 모듈 탄소배출량 검증 시스템 데이터 입력

구분	투입량	단위	구성요소 사양				투입량 산정근거/산정식	제조국가	제조사	
			가로(cm)	세로(cm)	두께 or 길이(cm)	밀도(g/cm <sup>3</sup> )				
폴리실리콘	0.000	kg					웨이퍼 중 무게=잉곳무게*폴리실리콘무게 (잉곳무게=웨이퍼수량*면적*두께*실리콘밀도) 중량: 폴리실리콘 사양서	중국	KEA	
잉곳	0.000	kg						중국	KEA	
웨이퍼		EA						중국	KEA	
셀		EA						한국	KEA	
모듈	0.000	m <sup>2</sup>						한국	KEA	
유리	0.000	kg						중국	KEA	
강화유리	0.000	kg						중국	KEA	
봉합재	EVA	전면	0.000	kg					한국	KEA
		후면	0.000	kg					한국	KEA
		합산	0.000	kg						
	POE	전면	0.000	kg					한국	KEA
		후면	0.000	kg					한국	KEA
		합산	0.000	kg					한국	KEA
후면시트	PET	0.000	kg					중국	KEA	
	PVF	0.000	kg					중국	KEA	
	합산	0.000	kg							
프레임	장바	0.000	kg					중국	KEA	
	단바	0.000	kg					중국	KEA	
	코너키	0.000	kg					중국	KEA	
	합산	0.000	kg							

입력된 데이터는 “표준배출계수 계산시트”로 연계되고 시뮬레이터에 내재되어 있는 특정 국가의 재질 및 부품의 배출계수의 곱으로 [그림 2-31]과 같이 태양광 모듈의 제조 전단계 및 제조단계에 대하여 탄소발자국을 산정할 수 있다. 기능단위의 경우 본 시뮬레이터에서는 사용자가 해당 태양광 모듈의 출력값(kW)을 입력하면 탄소배출량에 출력을 고려하여 kW당 배출량으로 환산하여 결과를 도출한다.

위에서 설명한 타 시뮬레이터와 다르게 태양광 모듈 탄소발자국 산정 시뮬레이터에서는 별도의 할당방법을 선택하는 기능은 없다. 이는 실제 산업계 태양광 모듈 생산공정에 대한 데이터를 입력하기보다는 구축되어 있는 모듈에 대한 배출계수를 활용하기 때문이다.

[그림 2-31] 태양광 모듈 탄소배출량 검증 시스템 탄소발자국 결과 예시

모델명(시리즈)	출력	최종배출량(kgCO2/kW)
	475	764.68
	480	756.72
	485	748.91
	490	741.27
	495	733.79
	500	726.45

항목	투입량	단위	실제 사이즈 mm2 (기본값 156*156mm2)	제조국가	제조사	배출계수	제조국 분배계수	배출량합계
폴리실리콘	2,000	kg		프랑스	KEA	30.674	1.0	61.348
잉곳	5,000	kg		일본	KEA	50.480	1.0	252.400
웨이퍼	1	PCS	19,685.198	대만	KEA	0.841	1.0	0.680
셀	2	PCS	19,685.198	중국	KEA	0.483	1.0	0.781
모듈	1,000	m2		한국	KEA	10.485	1.0	10.485
유리	1,000	kg		중국	KEA	1.041	1.0	1.041
강화유리(열처리 공정)	1,000	kg		중국	KEA	0.204	1.0	0.204
EVA	1,000	kg		한국	KEA	2.304	1.0	2.304
POE	1,000	kg		한국	KEA	2.973	1.0	2.973
PET	1,000	kg		중국	KEA	3.145	1.0	3.145
PVF	1,000	kg		중국	KEA	20.147	1.0	20.147
알루미늄 프레임	1,000	kg		중국	KEA	7.715	1.0	7.715

본 시뮬레이터는 앞서 소개한 LCA 및 탄소발자국 시뮬레이터보다 상대적으로 사용자가 간단히 사용할 수 있게 설계되어 있다. 하지만 내재되어 있는 배출계수 및 입력할 수 있는 부품 및 재질 항목이 제한적이라고 판단된다. 또한 모듈 생산공정별 효율, 전력 소비량, 공정배출량 등이 상이할 수 있음에도 불구하고 단순 배출계수를 활용한다는 측면에서 한계가 있다고 사료된다.

2장에서는 LCA 및 탄소발자국 산정방법론, 국제표준화, 국내외 정책동향, 시뮬레이터 개발 동향에 대하여 분석하였다. LCA 및 탄소발자국 산정방법론 분석을 통하여 기능단위, 시스템경계, 할당방법 및 토지이용변화 설정에 따라 결과값이 상이할 수 있으므로 탄소중립기술에 대한 시뮬레이터 개발 시 이를 중점적으로 고려해야 함을 알 수 있었다.

국제표준화 분석 결과 Scope 1, 2 배출량 관리에서 벗어나 LCA 관점에서의 조직/제품에 대한 온실가스 배출량 산정의 중요성을 강조하고 있다. 또한 정책동향 분석 결과 EU CBAM 입법안 통과 및 미국의 「공정전환 및 경쟁법」 법안 도입 검토에 따라 기존 사업장 단위의 온실가스 배출량에서 제품 단위의 탄소발자국으로 중심이 이동하고 있으며, 향후 규제화 될 가능성이 크기 때문에 선제적으로 기술, 공정, 제품에 대한 탄소발자국 산정이 필요함을 시사하고 있다.

마지막으로 탄소발자국 시뮬레이터 개발 동향 분석을 통하여 <표 2-13>과 같이 정리할 수 있다.



&lt;표 2-13&gt; 탄소발자국 및 LCA 시뮬레이터 분석 결과

구분	시뮬레이터	용도	데이터 입력	할당 방법	기능단위
LCA	Simapro	전문가용	공정 및 전과정 단계별 입력	직접 할당계수 입력	직접 입력
	GaBi	전문가용		물리적 특성 및 경제적 가치 선택 가능	
	ezEPD	전문가/ 인증담당자용		직접 할당하여 데이터 입력	
탄소 발자 국	GREET	전문가용	Sheet별(40~50 개) 투입/산출 작성	대체, 에너지, 시장가격, 질량 중 선택	MJ, km 단위로 산정
	GHGenius	전문가용		대체, 에너지, 질량 중 선택	
	태양광 모듈 시뮬레이터	비전문가용 인증담당자 용	단일 공정 입력	해당 사항 없음	kW 단위로 산정

<표 2-13>에서 확인할 수 있듯이, LCA 및 탄소발자국 산정 시뮬레이터는 국내외에서 개발되어 있지만 검토한 6개 시뮬레이터 중 5개의 시뮬레이터는 LCA 전문가가 아닐 경우 사용하는 것이 힘들 것으로 판단된다. 즉 대부분 전문가용이기 때문에 일반 사용자들이 활용하기에는 한계가 있다.

특히 데이터 입력 시 모든 단위공정 및 전과정 단계별로 사용자가 투입/산출을 입력하고 각 투입/산출에 해당하는 LCI DB를 연결해야 하는 번거로움이 존재한다. 또한 할당방법의 경우에도 별도의 가이드 없이 사용자가 적합한 할당방법을 선택하여 적용하는 것이 대부분이다. 마지막으로 기능단위의 경우 특정 산업군에서 사용하도록 설계되어 시뮬레이터는 기능단위를 디폴트 값으로 지정하지만, 범용적인 시뮬레이터의 경우에는 직접 입력해야 한다.

따라서, 향후 비전문가용 탄소발자국 시뮬레이터를 개발할 경우 기능단위를 디폴트 값으로 정의하기 위하여 산업 및 기술군별로 따로 개발하는 것이 바람직하다고 사료된다. 특히 개발 시에는 사용자가 입력할 수 있는 부분은 최소화하고, 투입/산출 입력 시 자동으로 LCI DB 및 배출계수와 연계될 수 있도록 설계해야 한다. 마지막으로 할당 방법의 경우에도 특정 산업/기술군에서 개발된 PCR 및 가이드라인을 검토하여 일반적으로 활용되고 있는 할당방법을 미리 시뮬레이터 설계 시 반영해 두는 것이 편의성 및 접근성 측면에서 바람직하다고 판단된다.



# 제3장 탄소발자국 기반 온실가스 배출량 산정 시뮬레이터 개발



## 제 3 장 탄소발자국 기반 온실가스 배출량 산정 시뮬레이터 개발

본 장에서는 2장에서 탄소발자국 및 LCA 시뮬레이터 기능에 대하여 분석하여 모색한 개발방향을 바탕으로 비전문가가 사용할 수 있는 바이오에너지 탄소발자국 시뮬레이터를 개발하였다.

### 제 1 절 연구대상 기술분야 선정

#### 1. 대상기술 정의

탄소중립 기술혁신 추진전략(‘21.04)<sup>21)</sup>에서는 “탄소중립 기술혁신 10대 핵심기술” : ①태양광 및 풍력, ②수소, ③바이오에너지, ④철강·시멘트, ⑤석유화학, ⑥산업공정 고도화, ⑦수송 효율, ⑧건물 효율, ⑨디지털화, ⑩ 탄소 포집, 활용, 저장 기술(CCUS)을 제시하였다. 그 중 바이오에너지를 대상기술로 선정하였으며, 세부 대상기술은 국가과학기술자문회의 탄소중립 중점기술(안)<sup>22)</sup>을 활용하여 선정하였다.

바이오에너지는 화석연료를 대체하는 재생에너지로서 탄소중립에 기여할 수 있는 온실가스 감축 핵심 기술분야이며, 향후 탄소중립사회 전환을 위한 재생에너지 기술의 시장이 확대와 더불어 바이오에너지 시장도 동반 성장할 것으로 전망된다. 실제 “2050 탄소중립 추진전략”에서는 글로벌 탄소중립 속도경쟁을 선도하기 위해 석유화학 대체를 위한 바이오 R&D 기술혁신을 주도하고 세계시장을 선점하는 방향성을 제시하고 있다. 또한 “2030 온실가스 감축 로드맵”에서는 수송분야 온실가스 감축 수단으로 친환경 자동차 보급과 함께 자동차용 경유에 바이오디젤 혼합 비중을 확대할 것을 제시하고 있다.

바이오에너지는 바이오매스 생산과정에서 이산화탄소를 흡수하고, 연소과정에서 흡수한 양만큼 배출함으로써 화석연료보다 온실가스를 감축효과가 발생하는 것으로 평가되고 있다. 다만 이는 사용(연소)단계만 고려하여 효과성을 제시한 것이므로 전과정 측면에서 고려할 필요가 있다. 특히 전과정 측면에서 바이오매스 및 바이오연료 생산공정에서 발생하는 온실가스 및 흡수량에 대하여 Trade off 현상이 발생할 수 있어 LCA 수행이 필수적이므로 본 연구에서는 바이오에너지를 대상기술로 정의하였다.

#### 1.1. 국가과학기술자문회의 탄소중립 중점기술(안)

정부는 2050 탄소중립 추진전략(‘20.12), 장기저탄소발전전략(‘20.12)에 따른 탄소중립 경제·사회로 대전환을 뒷받침할 종합적이고 장기적 관점의 기술개발 청사진을 마련하였다. 이에 따라, ‘21년 6월 과기자문회의 탄소중립기술특별위원회를 통해 2050 탄소중립 중점기술 발굴 및 로드맵을 수립하였다. 위원회 산하 에너지, 산업, 수송교통, 건물도시ICT,

21) 과학기술정보통신부, 보도자료(2021.04.01.), 『탄소중립 기술혁신 추진전략 발표』

22) 과학기술정보통신부, 보도자료, 『탄소중립 기술혁신 추진전략』 발표,

<https://www.msit.go.kr/bbs/view.do?sCode=user&mId=113&mPid=112&pageIndex=&bbsSeqNo=94&nttSeqNo=3180091&searchOpt=ALL&searchTxt=>

환경 등 50명으로 구성된 기술분과위에서는 기술분류체계를 마련하고 중점기술 선정을 위한 우선순위 평가하였다. 탄소감축 기여도, 탄소감축 비용효과, 실현 가능성 등에 대한 평가 결과 및 부문별 탄소배출량을 고려하여 탄소중립 중점기술(안)을 도출하였다<sup>23)</sup>.

탄소중립 중점기술(안)에 따르면, 부문별 탄소 배출량 비율, 정책 중요성 등을 고려하여 부문별 중점기술 개수를 배분하고 중점기술을 선정한 결과, 에너지 부문 중점기술은 11개가 선정되었다. (<표 3-1> 참고)

<표 3-1> 에너지 부문 탄소중립 기술 11개 선정

중점기술	세부기술(예시)
태양광	결정질 실리콘 태양전지, 다중접합 태양전지, 페로브스카이트 태양전지
풍력	해상풍력(고정식), 해상풍력(부유식)
수소생산·저장·이송	액화 수소 저장/이송, 전기분해
발전용 연료전지	고분자전해질 연료전지, 고체산화물연료전지
전력저장	리튬계·나트륨계 배터리, 레독스 플로우 배터리
전력망	계통연계·스마트 인버터, 지능형 배전시스템
바이오에너지	바이오 에탄올/디젤, 바이오수소, 고형원료
에너지통합연계시스템	P2G(power to gas), P2H(power to heat), 전력-열-수소 하이브리드 시스템
수소암모니아 발전	수소, 암모니아 터빈
열 생산·변환 시스템	태양열, 히트펌프, 열에너지 네트워크
청정화력발전	고효율가스터빈

바이오에너지 분야의 핵심 세부 기술은 바이오 에탄올, 바이오디젤, 바이오 수소, 고형연료로 구분하고 있으며, 이 핵심 세부 기술들은 에너지 분류체계의 대분류 중 전력 생산(발전 및 열)과 바이오연료 생산 분야 해당한다. 전력 생산의 경우 신·재생에너지-바이오매스에 고형연료, 바이오가스, 바이오중유로 분류하고 있으며, 바이오연료 생산-바이오연료에는 바이오가스/바이오메탄, 바이오 에탄올, 바이오디젤 등의 소분류로 분류된다.

따라서, 바이오에너지 부문 분류체계에서 제시한 11개 소분류 중 유사 및 중복 기술을 통합하여 바이오 고형연료, 바이오가스, 바이오중유, 바이오휘발유, 바이오디젤, 바이오항공유의 6개 기술을 최종선정하였다.

바이오 수소기술의 경우, 수소생산 및 연료전지 기술과의 연관성이 높으므로 연구대상 기술에서 제외하였고, ‘바이오 기반 원료·제품생산기술’로 분류된 바이오항공유는 수송 연료생산 기술이므로 이를 포함하였다.

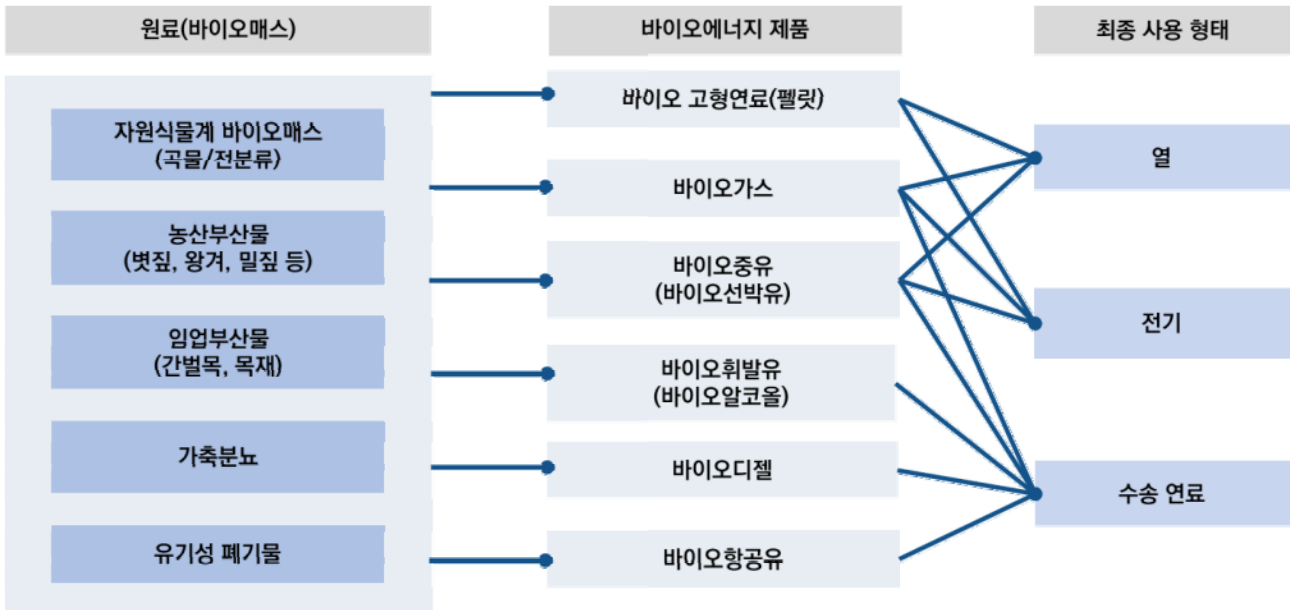
23) 대통령직속 국가과학기술자문회의, 제117회 심의회의 결과(21.08.31), (첨부3) (제17회 심의회의 2호 안건) 탄소중립 중점기술(안), [https://www.pacst.go.kr/jsp/council/councilPostView.jsp?post\\_id=2137&etc\\_cd1=COUN01&board\\_id=11#this](https://www.pacst.go.kr/jsp/council/councilPostView.jsp?post_id=2137&etc_cd1=COUN01&board_id=11#this)

[그림 3-1] 바이오에너지 분류체계 내 탄소발자국 시뮬레이터 개발 대상기술



추가적으로 [그림 3-1]에서 정의한 바이오에너지 탄소발자국 시뮬레이터 개발 대상 기술분야의 Value-chain 특성을 고려하여 기술을 정의하였다. 바이오에너지의 주요 최종 사용형태는 열(스팀), 전기, 수송연료 3개 분야로 구분 가능하나, 투입 원료(바이오매스)별 바이오에너지 제품 특성이 달라지므로 시뮬레이터 개발 시 다양한 기술 조합을 반영하고자 하였다.

[그림 3-2] 탄소발자국 산정 대상 기술 분야별 최종 Pathway



## 제 2 절 탄소발자국 산정방법론 조사

본 절에서는 바이오에너지 탄소발자국 산정방법론 검토를 통하여 기능단위, 시스템경계, 할당방법, 토지이용변화, 지구온난화지수를 결정하고 이를 시뮬레이터 개발 시 반영하였다.

### 1. 기능단위(Functional unit)

ISO 14040에 따르면, LCA 수행 시에는 반드시 기능단위를 설정하여야 하는데, 기능단위는 평가하고자 하는 제품 또는 서비스에 대해 정의한 기능을 정량적으로 나타내는 단위이다<sup>24)</sup>.

제품 사용단계에 대한 온실가스 산정 시에는 반드시 기능단위가 정의되어야 하며, 연구의 목표 및 범위의 일관성이 확보되어야 한다. 기능단위를 정의하기 위해 우선적으로 연구대상 시스템의 정량적 특성과 기술/기능적인 성능(technical/functional performance)을 규명하여 정량화하여야 한다.<sup>25)</sup>

기능단위가 정의되면 연구 대상 제품 또는 서비스에 대한 전과정 평가 결과 비교가 가능해지며 전과정 해석이 의미 있고 타당해지기 때문이다. 전과정 탄소발자국 산정 결과는 기능단위 당 CO<sub>2</sub>-eq 배출량으로 표현한다.<sup>26)</sup> 즉, 탄소발자국 선정 결과는 서비스 또는 서비스를 제공하는 제품의 기능단위 서비스 당 CO<sub>2</sub>-eq 배출량이다.

Aikaterini et al. (2020)<sup>27)</sup>은 폐기물 및 농업부산물 등을 이용한 바이오에탄올에 대한 16개 LCA 연구의 기능단위를 비교 분석하였다. 분석 결과에 따르면, 바이오에탄올 생산에 대한 LCA에서는 바이오에너지의 발열량(1TJ, 1MJ 등) 또는 중량(1kg, 1ton 등)을 기능단위로 정의하였으며 폐기물 처리에 대한 전과정 평가의 경우는 1ton wet biowaste, 1 ton 도시고형폐기물 등으로 정의하였다.

또한, 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 기능단위를 사용하고 있는 것을 확인하였다.<sup>28)</sup> 또한 GREET, GHGenius에서는 수송용 연료일 경우에는 이동 거리(km)를 기능단위로 사용하고 있다.

특히 IEA에 따르면, 바이오에너지의 기능단위를 열 생산 (kgCO<sub>2</sub>-eq/kWh heat), 전기 생산(kgCO<sub>2</sub>-eq/kWh 전기) 또는 운송(kgCO<sub>2</sub>-eq/km) 시 발생하는 이산화탄소량을 기준으로 정의하고 있다. 다른 문헌들과 다르게 에너지 단위를 기준으로 하는 것은 부가적인

24) International Standard ISO 14040 (2006) Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principle and Framework.

25) European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010

26) ISO 14067:2018 Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification (<https://www.iso.org/standard/71206.html>)

27) Konti, Aikaterini, Dimitris Kekos, and Diomi Mamma. 2020. "Life Cycle Analysis of the Bioethanol Production from Food Waste—A Review" *Energies* 13, no. 19: 5206. <https://doi.org/10.3390/en13195206>

28) Pereira, L. G., Cavalett, O., Bonomi, A., Zhang, Y., Warner, E., & Chum, H. L. (2019). 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*, 110, 1-12. doi:10.1016/j.rser.2019.04.043



요인들을 고려하지 못하기 때문에 적절한 기능단위가 아니라고 제시하고 있다. 예컨대, 자동차는 내연기관이 가솔린에 적합하게 설계되었기 때문에 동일한 에너지를 지닌 에탄올보다 가솔린이 더 많이 이동할 수 있기 때문이다.

탄소배출량 산정을 위한 LCA 관련 표준, 가이드라인 및 문헌조사 조사 결과를 바탕으로, 6개 바이오에너지 기술에 대한 전과정 탄소발자국 산정방법론 및 시뮬레이터 개발 연구의 기능단위는 열(스팀) 및 전력의 경우 1MJ 바이오에너지 사용(연소)으로, 수송연료의 경우 이동 거리(km)로 정의하였다.

## 2. 시스템경계 설정

바이오에너지 기술에 대한 LCA 방법을 적용한 탄소발자국 산정을 위하여 연구 대상 바이오에너지 기술에 적용할 수 있는 시스템경계(System Boundary)를 정의하여야 한다.

연구대상 바이오에너지 기술에 적용할 수 있는 시스템경계(System Boundary)를 정의할 위해 ISO 14044, ILCD handbook, ISO 14067, EN16760 등을 포함한 탄소배출량 산정을 위한 전과정평가 방법론 관련 표준 및 가이드라인을 조사하였다.

ISO14067에 따르면, 시스템경계를 선택할 때는 제품시스템 내 단위 공정별로 시스템경계 안에 포함할 것인지에 관한 결정이 필요하며, 포함 여부 결정 시 탄소발자국 연구의 목표와의 일관성이 있어야 한다.<sup>29)</sup> 탄소발자국 결과에 기여도가 적은 전과정 단계, 단위공정, 투입·산출물에 대하여는 제외할 수 있으며, 제외 기준(cut-off criteria) 및 이유에 대해서 명시하여야 한다.

2장 1절에서 설명한 바와 같이, 시스템경계는 크게 2가지로 구분할 수 있다. Cradle to gate(Well to tank)는 원료채취부터 제품생산 후 출하 직전까지의 공정만을 고려하는 것을 의미하며, Cradle to grave(Well to wheel)는 원료채취부터 제품의 폐기단계까지의 모든 공정을 고려하는 것을 의미한다. 하지만 Azapagic A and Stichnothe H.(2011)에 따르면 바이오에너지의 경우 사용(연소) 후 별도의 폐기단계가 없으므로 일반제품과 다르게 시스템경계를 정의할 수 있음을 아래와 <표 3-2>와 같이 명시하고 있다.

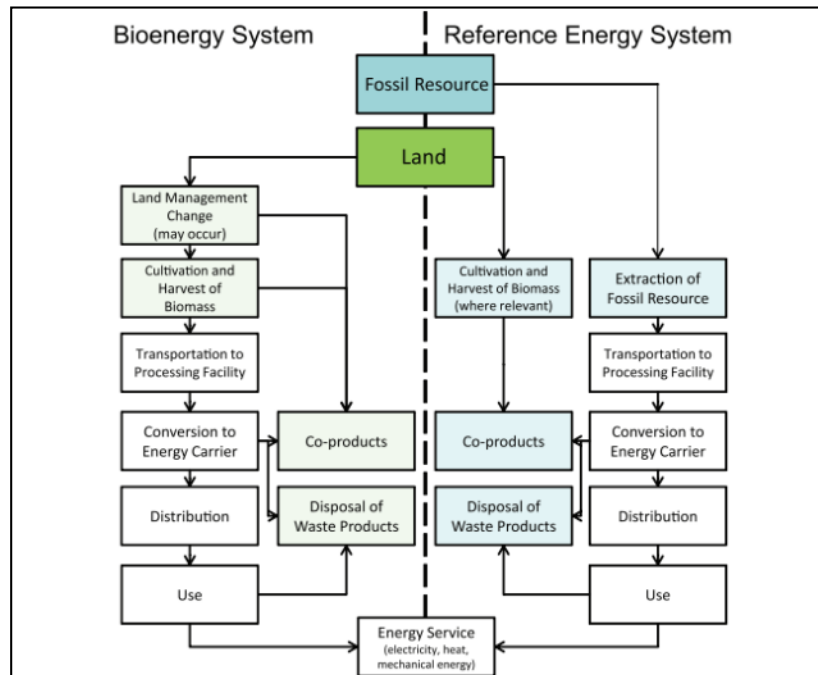
<표 3-2> 일반제품 및 바이오에너지 시스템경계 정의 차이점

시스템경계	Cradle to gate (Well to Tank)	Cradle to Grave (Well to Wheel)
일반 제품	원료채취부터 제품 출하까지로 정의	원료채취부터 제품생산, 사용, 폐기까지로 정의
바이오에너지	원료(바이오매스)채취부터 바이오에너지 제품 (바이오디젤, 고형연료 등) 생산까지로 정의	원료(바이오매스)채취부터 바이오에너지 제품으로 생산되는 전기, 열, 수송연료까지로 정의

29) ISO 14067:2018 Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification, p15 (<https://www.iso.org/standard/71206.html>)

IEA(International Energy Agency)의 바이오에너지 전과정 평가 문헌의 경우 석유 기반 에너지 및 바이오에너지 시스템경계를 Cradle to Grave로 정의하여 비교분석을 진행하였다. 또한, ARENA(Australian Renewable Energy Agency)의 바이오에너지 LCA 수행 시 시스템경계는 cradle to grave를 권고하고 있으나 기술성숙도가 낮아 에너지전환에 관한 데이터 부재 시 cradle to gate까지 수행하는 것을 허용하고 있다.

[그림 3-3] IEA의 바이오에너지 시스템경계 정의 예시



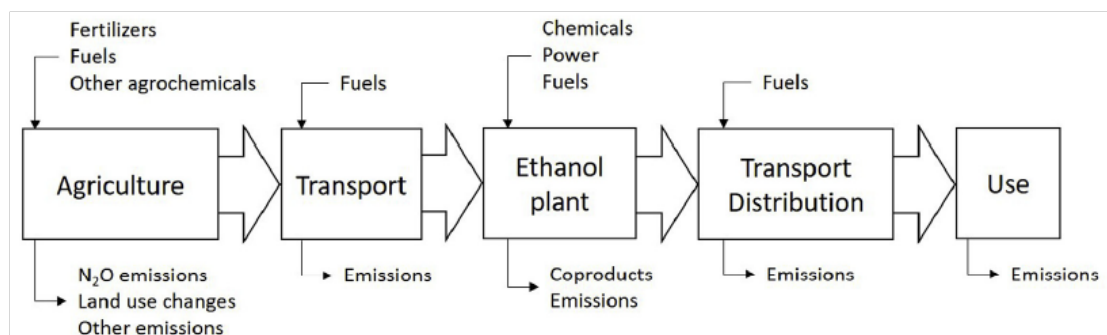
특히, 2018년에 개정된 EU 신재생에너지 지침에서는 바이오에너지 탄소발자국 산정에 대한 평가 방법론을 제시하고 있는데, 시스템경계 정의를 Grave(사용단계)까지 포함하도록 규정하고 있다.

[그림 3-4] EU 신재생에너지 지침 - 바이오에너지 전과정 탄소발자국 산정방법론

150	EN	Official Journal of the European Union	21.12
C. METHODOLOGY			
1. Greenhouse gas emissions from the production and use of transport fuels, biofuels and bioliquids shall be calculated as follows:			
(a) greenhouse gas emissions from the production and use of biofuels shall be calculated as:			
$E = e_{ec} + e_1 + e_p + e_{td} + e_u - e_{sca} - e_{ccs} - e_{ccr}$			
where			
E	=	total emissions from the use of the fuel;	
$e_{ec}$	=	emissions from the extraction or cultivation of raw materials;	
$e_1$	=	annualised emissions from carbon stock changes caused by land-use change;	
$e_p$	=	emissions from processing;	
$e_{td}$	=	emissions from transport and distribution;	
$e_u$	=	emissions from the fuel in use;	
$e_{sca}$	=	emission savings from soil carbon accumulation via improved agricultural management;	
$e_{ccs}$	=	emission savings from CO <sub>2</sub> capture and geological storage; and	
$e_{ccr}$	=	emission savings from CO <sub>2</sub> capture and replacement.	
Emissions from the manufacture of machinery and equipment shall not be taken into account.			

기존 바이오연료 전과정 온실가스 산정 시뮬레이터에서 사용된 시스템경계는 GREET, GHGenius, BioGrace, VSB 모델에서 모두 Cradle-to-grave(well-to-wheel)로 정의하고 있는 것으로 조사되었다.<sup>30)</sup> ([그림 3-5]. 정의된 Cradle-to-grave(well-to-wheel) 시스템경계에는 원료(바이오매스) 재배, 수송, 바이오에너지 생산, 수송, 사용단계(전기, 열, 수송연료)까지 포함한다.

[그림 3-5] 기존 바이오 에탄올 전과정 온실가스 시뮬레이터의 시스템경계 정의



30) Pereira, L. G., Cavalett, O., Bonomi, A., Zhang, Y., Warner, E., & Chum, H. L. (2019). 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*, 110, 1-12. doi:10.1016/j.rser.2019.04.043

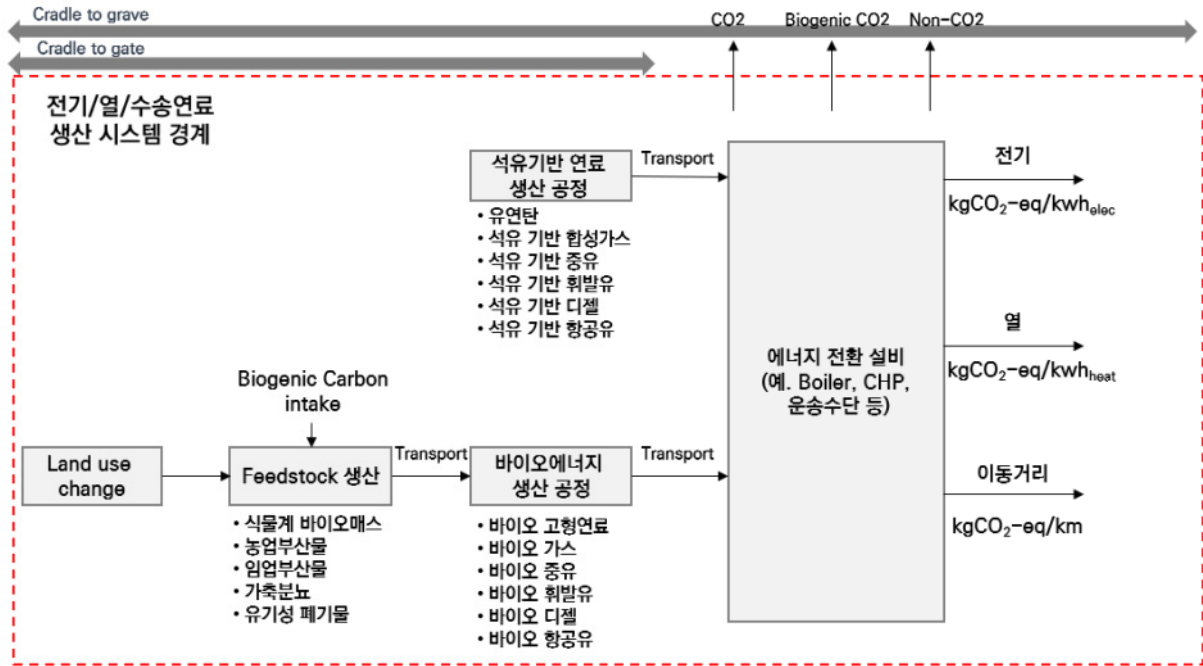
또한 Jeswani, H., Chilvers, A., and Azapagic, A. (2020)에 따르면 검토된 연구의 약 절반(48%)만 Cradle to Grave 시스템경계를 사용하였으나, 연료의 연소 성능 및 관련 배출량이 바이오연료와 화석연료에서 크게 다를 수 있기 때문에 연료 사용을 시스템경계에 포함하는 것이 중요하여 Cradle to Gate보다는 Cradle to Grave 시스템경계가 더 적절하다고 언급하고 있다.

<표 3-3> 바이오에너지 LCA 가이드라인 및 문헌에서 제시한 시스템경계

구분	주요 문헌	주요 내용
가이드라인	EU 신재생에너지 지침	바이오에너지 탄소발자국 산정 시 Grave(사용단계)까지 산정하도록 규정하고 있음
	ARENA	Cradle to Grave까지 수행하는 것을 권고
LCA 문헌	IEA	석유기반 에너지 및 바이오에너지 시스템경계를 Cradle to Grave로 정의하여 비교분석을 진행
	Jeswani, H., Chilvers, A., and Azapagic, A. (2020)	연료의 연소에 따른 배출량이 바이오 및 화석연료에서 크게 다를 수 있으므로 Cradle to Grave로 수행하는 것이 중요함을 언급

탄소배출량 산정을 위한 시스템경계 조사 결과(<표 3-3> 참고)를 바탕으로, 본 연구에서의 바이오에너지 기술에 대한 전과정 탄소발자국 산정을 위한 전과정 시스템경계를 Cradle to Grave로 정의하였다. 정의된 바이오 시스템경계에는 바이오매스(feedstock) 생산(재배) 또는 수집단계, 수송, 바이오에너지 생산공정 및 사용(연소)단계까지를 포함한다. 또한, 바이오에너지와 비교분석을 위하여 화석 기반 에너지의 전과정 탄소발자국 산정에도 동일한 시스템경계를 적용하였다.

[그림 3-6] 본 연구의 바이오에너지 시스템경계 정의



### 3. 할당방법

대부분의 공정에서는 제품뿐만 아니라 한 개 또는 여러 개의 부산물이 동시에 생산되는 경우가 많다. 또한, 각 부산물은 주제품 생산 시 함께 생산되어 다른 제품 시스템에서 사용되며 다른 기능을 가지는 경우가 많다.<sup>31)</sup>

전과정 평가에서는 평가 대상인 제품의 전과정으로부터 발생하는 환경부하를 산정해야 하는데, 대상 제품 시스템의 한 공정으로부터 생산된 부산물은 다른 시스템에서 사용되는 경우가 일반적이기 때문에 해당 시스템의 환경부하를 나누는 방법(partitioning) 또는 부산물과 관련된 환경부하를 모두 포함하는 시스템 확장(system expansion) 방법이 있다.

ISO 14044:2006에서는 할당은 “평가 대상 제품 시스템과 한 개 또는 한 개 이상의 다른 제품 시스템 간에 제품과 제품 시스템의 투입·산출물 및 그에 따른 환경부하를 분리하는 것(partitioning)” 이라고 정의하고 있다<sup>32)</sup>. 이때, 우선적으로 주제품과 부산물의 물리적인 관계(physical relationship)를 기준으로 투입·산출물을 할당한다. 제품과 부산물 간의 물리적인 관계란 “제품과 부산물 총량 대비 각 제품의 중량 비율” 또는 “제품과 부산물 총에너지 함량 대비 각각의 에너지 함량 비율” 등을 말한다. 물리적인 관계에 대한 정의가 어려운 경우, 그 외의 방법(예: 제품과 부산물의 총량 대비 각각의 경제적 가치의 비율)을 적용하여야 한다.

바이오에너지 LCA 연구에서 할당이 필요한 상황은 바이오매스 생산과정, 바이오연료

31) European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010

32) ISO 14044:2006 - Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines chapter 4.3.4.1

생산공정 및 에너지전환(열병합발전의 경우) 공정 총 3가지로 구분할 수 있으며 할당방법에 있어서는 많은 논란이 존재한다. 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 있다. S. Prasad, et al.(2020)에 따르면 탄소함유량, 생산량, 경제적 가치 순으로 합리적이라고 제시하고 있으나, EU RED의 ANNEX V-Part C-Point 18과 ANNEX VI-Part B-Point 18에서는, 임업 부산물, 농업부산물, 가축분뇨 및 유기성 폐기물은 생산 단계까지의 탄소배출량을 ‘0’으로 가정할 것을 명시하고 있다.

바이오에너지 생산공정에서 부산물(예. 바이오디젤 생산 시 글리세린 부산물) 발생 시 할당해야 하지만 국제적으로 바이오에너지 LCA 분야에서 통용되고 있는 방법론은 부재한 상황이다.

바이오에너지 전과정 온실가스 산정에 관한 연구에 사용된 할당 방법은 지역에 따라 큰 차이를 보인다. EU 정책의 경우, 에너지에 대한 전과정 평가 연구에서 일반적으로 에너지 함량(energy content) 기준 할당방법을 적용하고 있다. EU 신재생에너지 지침<sup>33)</sup>에 따르면 에너지 기준의 할당 방법이 적용이 간편하고 시간이 지나도 예측 가능하기 때문에 가장 적합한 방법이라고 명시하고 있다. 또한, 수송연료에 대한 온실가스 발자국 산정에도 가장 일반적으로 사용되는 할당 방법임을 강조하고 있다. 반면, 미국의 경우는 경제적 가치(economic value) 기준의 할당 방법을 적용하거나 시스템 확장을 통해 바이오에너지 생산이 제품과 함께 생산된 부산물(co-product)이 타 시스템에서 생산 및 사용되는 기존 제품을 대체하는 효과(substitution method)까지 반영하고 있다.<sup>34)</sup> Liu et al.(2018)에서는 바이오에너지 LCA 수행 시 할당방법의 장단점을 제시하고 있으나 3가지 할당 방법 모두 단점을 가지고 있으므로 EU RED에서 권고하고 있는 할당 방법뿐만 아니라 여러 방법을 적용하여 민감도 확인이 필요함을 강조하고 있다.

<표 3-4> 바이오에너지 LCA 수행 시 할당방법별 장단점(Liu et al.(2018))

구분	생산량 (Weight)	에너지 함량 (Energy contents)	경제적 가치 (Economic value)
장점	물리적 관계를 직관적으로 나타냄	바이오에너지 분야에서 환경부하 분배를 위한 가장 정확한 방법으로 EU RED에서도 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, 시장 상황 등 다양한 변수로 인한 변동성이 큼(일관성의 부재)

33) 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, ANNEX V

34) Konti, Aikaterini, Dimitris Kekos, and Diomi Mamma. 2020. "Life Cycle Analysis of the Bioethanol Production from Food Waste—A Review" *Energies* 13, no. 19: 5206. <https://doi.org/10.3390/en13195206>

에너지전환(열병합발전의 경우) 생산되는 전기와 열(스팀)에 대하여 할당이 필요하다. EU 신재생에너지 지침에서는 전기와 열이 동시에 생산되는 경우, exergy를 기준 할당 방법을 적용하여 온실가스 배출량을 산정할 것을 제시하고 있으며 Ecoinvent LCI DB의 경우에도 동일하게 적용하고 있다.

[그림 3-7] 스팀과 열이 동시에 생산되는 공정에 대한 온실가스 산정 방법

(iv) For the useful heat coming from energy installations delivering heat together with electricity and/or mechanical energy:

$$EC_h = \frac{E}{\eta_h} \left( \frac{C_h \cdot \eta_h}{C_{el} \cdot \eta_{el} + C_h \cdot \eta_h} \right)$$

where:

$EC_{h,el}$  = Total greenhouse gas emissions from the final energy commodity.

$E$  = Total greenhouse gas emissions of the bioliquid before end-conversion.

$\eta_{el}$  = The electrical efficiency, defined as the annual electricity produced divided by the annual fuel input based on its energy content.

$\eta_h$  = The heat efficiency, defined as the annual useful heat output divided by the annual fuel input based on its energy content.

$C_{el}$  = Fraction of exergy in the electricity, and/or mechanical energy, set to 100 % ( $C_{el} = 1$ ).

$C_h$  = Carnot efficiency (fraction of exergy in the useful heat).

The Carnot efficiency,  $C_h$ , for useful heat at different temperatures is defined as:

$$C_h = \frac{T_h - T_0}{T_h}$$

where

$T_h$  = Temperature, measured in absolute temperature (kelvin) of the useful heat at point of delivery.

$T_0$  = Temperature of surroundings, set at 273,15 kelvin (equal to 0 °C)

출처 : EU 신재생에너지 지침

위에서 조사한 3가지 경우에 대한 할당방법에 대하여 EU 신재생에너지 지침에서 제시한 방법을 일관되게 적용하고자 하였다. 2장 1절의 할당부분에서 설명한 것과 같이 ISO14067에서는 할당 기준이 명확하지 않을 경우, 제품 및 기술군별 별도의 PCR이 존재하는 경우 이를 활용 할 수 있다고 명시하고 있기 때문이다.

이에 따라 바이오매스 생산공정에서 발생하는 부산물의 경우에는 할당 대상으로 정의하지 않았으며, 바이오에너지 생산공정에서는 연료와 부산물에 대한 에너지 함량(저위발열량) 값을 조사하여 입력하면, 입력된 에너지 함량을 기준으로 할당 인자를 계산하여 산출물(제품 및 부산물)별 환경부담을 할당하도록 설계하였다. 마지막으로 에너지전환(열병합발전의 경우)의 경우 전기와 스팀 모두 투입되는 연료 대비 각각의

생산효율과 exergy 비율을 고려하도록 하고 있는데, 스팀의 경우는 온도에 따른 가용 열(useful heat)에 대한 효율이 달라지는 것으로 나타난다. 스팀의 온도 정보는 발전 분야에 대한 비전문가는 알기 어려운 정보이므로, 기존 LCI DB를 조사하여 바이오가스, 우드펠릿·우드칩, 바이오중유, 바이오디젤로부터 생산되는 스팀 및 전기 각각에 대한 exergy 값을 조사하여 평균값을 계산하여 적용하였다.

<표 3-5> 본 연구에서 정의한 바이오에너지 탄소발자국 시뮬레이터 할당방법

구분	할당방법론
바이오매스 생산	바이오매스 중 농업부산물, 임업 부산물, 가축분뇨, 유기성 폐기물 생산에 따른 탄소배출량은 0으로 정의
바이오에너지 생산	생산된 연료와 부산물에 대한 에너지 함량(저위발열량) 값을 조사하여 입력하면, 입력된 에너지 함량을 기준으로 할당 인자를 계산하여 산출물(제품 및 부산물)별 환경부담을 할당
에너지 전환(열병합발전)	생산되는 스팀과 전기의 Exergy를 기준으로 할당하되, Default 값을 지정

#### 4. 토지이용변화, 바이오 온실가스 흡수 및 배출

바이오매스(Feedstock) 생산(재배) 단계에서는 토지이용(land use)을 수반하고, 토지이용 변화에 따른 탄소배출량을 고려하여야 한다. 토지이용변화로 인한 탄소배출량 산정은 EU 신재생에너지 지침과 ILCD handbook, ISO 14067에서 권고 또는 의무사항으로 제시하고 있다.

ISO 14067<sup>35)</sup>에서는 탄소발자국 산정 시 포함해야 할 12개 범주를 의무 항목과 권고 항목으로 구분하고 있는데, 바이오매스가 성장할 때 흡수하는 바이오 온실가스 흡수, 바이오 온실가스 배출뿐만 아니라 직접적인 토지이용 변경 및 관리 변경 배출을 산정 의무 항목으로 정의하고 있다.

따라서, 6개 바이오에너지 기술별 전과정 온실가스 산정 시뮬레이터에서도 바이오매스(feedstock) 재배 및 채취 단계에서 바이오매스 재배 시 토지이용변화로 인해 발생하는 탄소배출을 고려하였다.

ISO 14067에서는 바이오에너지의 탄소발자국 산정 시 바이오매스의 바이오 CO<sub>2</sub> 흡수(Carbon uptake)량은 바이오 CO<sub>2</sub> 배출(연소과정에서 배출)되기 때문에 산정방법의 일관성을 위하여 바이오매스 생산 시 CO<sub>2</sub> 흡수를 ‘0’으로 가정하는 경우 연소과정에서 발생하는 CO<sub>2</sub>를 0으로 가정할 수 있다고 제시하고 있다.

EU 신재생에너지 지침<sup>36)</sup>의 ANNEX V에서도 에너지 사용(연료 연소) 단계에서의 CO<sub>2</sub> 배출은 0으로 계산하도록 명시하고 있다. 그러나, 에너지 사용(연료 연소)단계에서의 Non-CO<sub>2</sub>(CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) 배출의 경우에는 배출계수를 적용하여야 한다.

35) ISO 14067 (2018)- Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification

36) 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, ANNEX V



바이오매스의 온실가스 흡수 및 배출 산정에 대해서는 ISO14067에서 제시하고 있는 산정 방법에 따라, 바이오매스의 바이오 CO<sub>2</sub> 흡수(Carbon uptake)량을 '0'으로 가정하고 이에 따라 바이오 CO<sub>2</sub> 배출(연료 연소 시 배출)도 '0'으로 가정하였다. 에너지 사용(연료 연소)단계에서의 Non-CO<sub>2</sub>(CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) 배출의 경우에는 배출계수를 적용하였으며, IPCC 2006, IPCC 2013 가이드라인을 활용하여 바이오연료별 Non-CO<sub>2</sub>에 대한 배출계수를 적용하였다.

## 5. 지구온난화지수

온실가스 인벤토리(inventory)는 인간 활동으로 유발되는 온실가스의 배출량 및 흡수량(removal)을 나타낸다. UNFCCC 산하 IPCC에서는 온실가스 감축을 위한 국제적인 활동의 일환으로 온실가스 인벤토리의 측정, 보고 그리고 검증을 위한 객관적인 절차 및 방법론에 대한 지침(guideline)을 2006년에 발표하였다<sup>37)</sup>. IPCC에서는 주기적으로 온실가스 종류별 지구온난화지수를 제시하고 있으며, IPCC 1996, IPCC 2006 및 IPCC 2013으로 구분된다. IPCC 2006 지침은 1996년에 발표된 지침(IPCC, 1996)과 2000년에 발표된 GPG 2000(IPCC, 2000)을 대체하는 지침이다.

국내 환경성적표지에서는 IPCC 1996를 적용하고 있지만, 국가 2030 NDC, 저탄소녹색성장기본법 및 온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침에서는 IPCC 2006 지침을 적용 중이다.

본 연구에서 개발된 프로토타입 시뮬레이터에 적용된 지구온난화지수는 IPCC 2006과 IPCC 2013을 모두 적용하였다. IPCC 2006 지침의 지구온난화지수의 경우, 환경부에서 주도하고 있는 온실가스감축인지 예산제도와의 일관성을 위하여 적용하였고, 향후 IPCC 2013에서 제시하는 지수로 변경하여 사용할 가능성을 고려하여 IPCC 2013 지구온난화지수도 시뮬레이터에 반영하였다. 시뮬레이터 사용자는 바이오에너지 탄소발자국 선정 시 평가 결과 활용 목적에 따라 IPCC 2006 또는 2013 지구온난화지수를 선택할 수 있도록 설계하였다.

개발된 시뮬레이터에 적용된 연료별 연소 배출계수는 IPCC 2006 가이드라인의 연료별 기본배출계수에 Greenhouse gas protocol의 온실가스 인벤토리의 배출계수(<표 3-6>)를 적용하여 계산하였다 (<표 3-7>)

<표 3-6> Greenhouse gas protocol 온실가스 인벤토리 배출계수

물질명	화학식	CAS	배출계수	
			2006	2013
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	000124-38-9	1	1
Methane	CH <sub>4</sub>	000074-82-8	21	28
Nitrous oxide	N <sub>2</sub> O	010024-97-2	310	265
CFC-11	CCl <sub>3</sub> F	000075-69-4	3,800	4,660
CFC-12	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	000075-71-8	8,100	10,200
CFC-13	CClF <sub>3</sub>	000075-72-9		13,900

37) 2006 IPCC 국가 인벤토리 가이드라인 기본 배출계수

물질명	화학식	CAS	배출계수	
			2006	2013
CFC-113	$\text{CCl}_2\text{FCClF}_2$	000076-13-1	4,800	5,820
CFC-114	$\text{CClF}_2\text{CClF}_2$	000076-14-2		8,590
CFC-115	$\text{CClF}_2\text{CF}_3$	000076-15-3		7,670
Halon-1301	$\text{CBrF}_3$	000075-63-8	5,400	6,290
Halon-1211	$\text{CBrClF}_2$	000353-59-3		1,750
Halon-2402	$\text{CBrF}_2\text{CBrF}_2$	000124-73-2		1,470
Carbon tetrachloride	$\text{CCl}_4$	000056-23-5	1,400	1,730
Methyl bromide	$\text{CH}_3\text{Br}$	000074-83-9		2
Methyl chloroform	$\text{CH}_3\text{CCl}_3$	000071-55-6	100	160
HCFC-21	$\text{CHCl}_2\text{F}$	000075-43-4		148
HCFC-22	$\text{CHClF}_2$	000075-45-6	1,500	1,760
HCFC-123	$\text{CHCl}_2\text{CF}_3$	000306-83-2	90	79
HCFC-124	$\text{CHClF}_2\text{CF}_3$	002837-89-0	470	527
HCFC-141b	$\text{CH}_3\text{CCl}_2\text{F}$	001717-00-6	600	782
HCFC-142b	$\text{CH}_3\text{CClF}_2$	000075-68-3	1,800	1,980
HCFC-225ca	$\text{CHCl}_2\text{CF}_2\text{CF}_3$	000422-56-0		127
HCFC-225cb	$\text{CHClF}_2\text{CF}_2\text{CClF}_2$	000507-55-1		525
HFC-23	$\text{CHF}_3$	000075-46-7	11,700	12,400
HFC-32	$\text{CH}_2\text{F}_2$	000075-10-5	650	677
HFC-41	$\text{CH}_3\text{F}_2$	000593-53-3	150	116
HFC-125	$\text{CHF}_2\text{CF}_3$	000354-33-6	2,800	3,170
HFC-134	$\text{CHF}_2\text{CHF}_2$	000359-35-3	1,000	1,120
HFC-134a	$\text{CH}_2\text{FCF}_3$	000811-97-2	1,300	1,300
HFC-143	$\text{CH}_2\text{FCHF}_2$	000430-66-0	300	328
HFC-143a	$\text{CH}_3\text{CF}_3$	000420-46-2	3,800	4,800
HFC-152	$\text{CH}_2\text{FCH}_2\text{F}$	000624-72-6		16
HFC-152a	$\text{CH}_3\text{CHF}_2$	000075-37-6	140	138
HFC-161	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{F}$	000353-36-6		4
HFC-227ea	$\text{CF}_3\text{CHF}_2\text{CF}_3$	000431-89-0	2,900	3,350
HFC-236cb	$\text{CH}_2\text{FCF}_2\text{CF}_3$	000677-56-5		1,210
HFC-236ea	$\text{CHF}_2\text{CHF}_2\text{CF}_3$	000431-63-0		1,330
HFC-236fa	$\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CF}_3$	000690-39-1	6,300	8,060
HFC-245ca	$\text{CH}_2\text{FCF}_2\text{CHF}_2$	000679-86-7	560	716
HFC-245fa	$\text{CHF}_2\text{CH}_2\text{CF}_3$	000460-73-1		858
HFC-365mfc	$\text{CH}_3\text{CF}_2\text{CH}_2\text{CF}_3$	000406-58-6		804
HFC-43-10mee	$\text{CF}_3\text{CHFCH}_2\text{CF}_2\text{CF}_3$	138495-42-8	1,300	1,650
Sulfur hexafluoride	$\text{SF}_6$	002551-62-4	23,900	23,500
Nitrogen trifluoride	$\text{NF}_3$	007783-54-2		16,100
PFC-14	$\text{CF}_4$	000075-73-0	6,500	6,630
PFC-116	$\text{C}_2\text{F}_6$	000076-16-4	9,200	11,100

물질명	화학식	CAS	배출계수	
			2006	2013
PFC-218	C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>	000076-19-7	7,000	8,900
PFC-318	c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	000115-25-3	8,700	9,540
PFC-31-10	C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	000355-25-9	7,000	9,200
PFC-41-12	C <sub>5</sub> F <sub>12</sub>	000594-91-2	7,500	8,550
PFC-51-14	C <sub>6</sub> F <sub>14</sub>	000355-42-0	7,400	7,910
PCF-91-18	C <sub>10</sub> F <sub>18</sub>	000306-94-5		7,190
Trifluoromethyl sulfur pentafluoride	SF <sub>5</sub> CF <sub>3</sub>	000373-80-8		17,400
Perfluorocyclopropane	c-C <sub>3</sub> F <sub>6</sub>	000931-91-9		9,200
HFE-125	CHF <sub>2</sub> OCF <sub>3</sub>	003822-68-2		12,400
HFE-134	CHF <sub>2</sub> OCHF <sub>2</sub>	001691-17-4		5,560
HFE-143a	CH <sub>3</sub> OCF <sub>3</sub>	000421-14-7		523
HCFE-235da2	CHF <sub>2</sub> OCHClCF <sub>3</sub>	026675-46-7		491
HFE-245cb2	CH <sub>3</sub> OCF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	001885-48-9		654
HFE-245fa2	CHF <sub>2</sub> OCH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	001885-48-9/fa2		812
HFE-347mcc3	CH <sub>3</sub> OCF <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	000406-78-0/mcc3		530
HFE-347pcf2	CHF <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> OCH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	000406-78-0/pcf2		889
HFE-356pcc3	CH <sub>3</sub> OCF <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub>	000382-34-3/pcc3		413
HFE-449sl (HFE-7100)	C <sub>4</sub> F <sub>9</sub> OCH <sub>3</sub>	014117-17-0		421
HFE-569sf2 (HFE-7200)	C <sub>4</sub> F <sub>9</sub> OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	163702-05-4		57
HFE-43-10pccc124 (H-Galden 1040x)	CHF <sub>2</sub> OCF <sub>2</sub> OC <sub>2</sub> F <sub>4</sub> OCHF <sub>2</sub>	E1730133		2,820
HFE-236ca12 (HG-10)	CHF <sub>2</sub> OCF <sub>2</sub> OCHF <sub>2</sub>	078522-47-1		5,350
HFE-338pcc13 (HG-01)	CHF <sub>2</sub> OCF <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> OCHF <sub>2</sub>	188690-78-0		2,910
HFE-227ea	CF <sub>3</sub> CHFOCF <sub>3</sub>	002356-62-9		6,450
HFE-236ea2	CHF <sub>2</sub> OCHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	084011-06-3/ea2		1,790
HFE-236fa	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OCF <sub>3</sub>	084011-06-3/fa		979
HFE-245fa1	CHF <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OCF <sub>3</sub>	001885-48-9		828
HFE 263fb2	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OCH <sub>3</sub>	000460-43-5		1
HFE-329mcc2	CHF <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> OCF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	134769-21-4		3,070
HFE-338mcf2	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OCF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	156053-88-2		929
HFE-347mcf2	CHF <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OCF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	000406-78-0/mcf2		854
HFE-356mec3	CH <sub>3</sub> OCF <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	000382-34-3/mec3		387
HFE-356pcf2	CHF <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OCF <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub>	000382-34-3/pcf2		719
HFE-356pcf3	CHF <sub>2</sub> OCH <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub>	000382-34-3/pcf3		446
HFE 365mcf3	CF <sub>3</sub> CF <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OCH <sub>3</sub>	000378-16-5		1
HFE-374pc2	CHF <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> OCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	000512-51-6		627
PFPME	CF <sub>3</sub> COF(CF <sub>3</sub> )CF <sub>2</sub> OCF <sub>2</sub> OCF <sub>3</sub>	en 00845		9,710
Chloroform	CHCl <sub>3</sub>	000067-66-3	4	16
Methylene chloride	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	000075-09-2	9	9
Methyl chloride	CH <sub>3</sub> Cl	000074-87-3		12
Halon-1201	CHBrF <sub>2</sub>	001511-62-2		376

<표 3-7> 연료별 연소 배출계수 계산

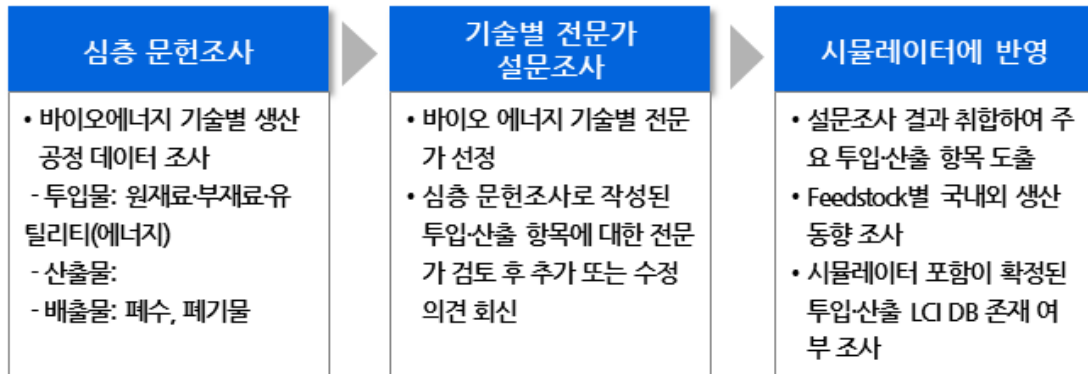
연료구분	단위	배출계수	
		2006	2013
등유	kgCO <sub>2</sub> -eq/kg	3.1601	3.1599
경유(화석연료)	kgCO <sub>2</sub> -eq/kg	3.1970	3.1967
중유(화석연료)	kgCO <sub>2</sub> -eq/kg	3.1370	3.1368
항공유(화석연료)	kgCO <sub>2</sub> -eq/kg	3.0980	3.0977
천연가스 <sup>38)</sup>	kgCO <sub>2</sub> -eq/Nm <sup>3</sup>	2.1649	2.1650
도시가스(LPG)	kgCO <sub>2</sub> -eq/kg	2.9871	2.9872
수입무연탄	kgCO <sub>2</sub> -eq/kg	2.6426	2.6427
유연탄	kgCO <sub>2</sub> -eq/kg	2.4581	2.4582
바이오 고형연료	kgCO <sub>2</sub> -eq/kg	0.0217	0.0220
바이오가스	kgCO <sub>2</sub> -eq/kg	0.0026	0.0027
바이오중유	kgCO <sub>2</sub> -eq/kg	0.0068	0.0067
바이오휘발유	kgCO <sub>2</sub> -eq/kg	0.0062	0.0058
바이오디젤	kgCO <sub>2</sub> -eq/kg	0.0067	0.0066
바이오항공유	kgCO <sub>2</sub> -eq/kg	0.0068	0.0067
천연가스	kgCO <sub>2</sub> -eq/kg	2.6953	2.6954

38) 한국가스공사, 천연가스 단위환산값: 1245Nm<sup>3</sup>/ton

## 제 3 절 온실가스 배출량 데이터 수집 및 시뮬레이터 개발

본 절에서는 시뮬레이터 구축을 위한 데이터 수집 및 데이터 연계 방안에 대하여 설명하였다. 바이오에너지 기술별 주요 투입·산출물 데이터 조사 및 시뮬레이터 반영을 위한 방법 및 추진과정은 [그림 3-8]과 같다.

[그림 3-8] 바이오에너지 기술별 주요 투입·산출물 데이터 조사 방법



먼저, 심층 문헌조사를 통해 바이오에너지 기술별 생산공정에 대한 데이터를 조사하였으며, 조사 결과를 바탕으로 투입·산출 항목 리스트를 작성하였다. 작성된 항목 리스트를 바탕으로 설문조사지를 작성하여 기술별 전문가를 대상으로 설문조사를 실시하였다. 각 조사단계별 세부 조사 방법은 아래에 상세히 기술하였다.

### 1. 바이오에너지 기술별 주요 투입/산출물 데이터 조사

#### 1.1 심층 문헌조사

바이오에너지 생산공정에 대한 주요 투입·산출물 항목 도출을 위하여 심층 문헌조사는 기존 LCI DB를 중심으로 분석하였다. 투입물은 원재료, 부재료, 유틸리티(에너지, 용수 등) 항목으로 구분하여 투입량을 조사하였으며, 산출물은 제품과 부산물, 배출물은 폐수, 폐기물 항목으로 구분하여 발생(처리)량을 조사하였다.

바이오에너지 LCI DB 및 전과정 온실가스 배출량 시뮬레이터를 활용하였으며, 특히 다양한 바이오에너지 기술의 생산공정별 투입·산출물 항목과 사용·생산량 데이터를 보유하고 있는 Ecoinvent DB를 중점적으로 활용하여 바이오에너지 기술 생산공정 투입·산출물 데이터(gate-to-gate, GtG)를 분석하였다.

바이오에너지 생산공정에 투입되는 주원료(feedstock) 생산(재배)에 대한 LCI DB는 Agribalyse, Agri-footprint, Bioenergiedat, LCA Commons 등을 중심으로 조사하였다. 바이오에너지 전과정 온실가스 배출량 시뮬레이터인 GREET과 GHGenius의 경우 바이오에너지 기술 생산공정 투입·산출물 GtG 데이터 작성 시 고려해야 할 주요 변수(parameter) 분석에 활용하였다.

[그림 3-9] 바이오에너지 생산공정 GtG 데이터 조사

GtG Inventory:		Processes for refined palm oil	
Bioenergy products:		Palm oil-based biodiesel	
Conversion technology:		Conventional alkali-catalyzed process to produce biodiesel from refined palm oil using water washing.	
<b>Materials (kg/h)</b>		<b>관산량(per kg biodiesel)</b>	<b>단위</b>
Crude palm oil			
Refined palm oil	12514	1.00.E+00	kg
Methanol	1536	1.23.E-01	kg
NaOH	129	1.03.E-02	kg
H2O	370	2.96.E-02	kg
H3PO4	12	9.59.E-04	kg
<b>Energy (electricity, kW)</b>	<b>3.01</b>	<b>2.41.E-04</b>	<b>KWh</b>
Feed pump for methanol	0.23	1.84.E-05	KWh
Feed pump for palm oil	1.55	1.24.E-04	KWh
Methanol recycle	0.26	2.08.E-05	KWh
Pump to separation processes	0.55	4.40.E-05	KWh
Product pump	0.42	3.36.E-05	KWh
<b>Energy (heat, kJ/h)</b>			
HP steam 400 °C (kJ/h)	2.54.E+07	2.03.E+00	
MP steam 250 °C	1.83E+07	1.46.E+00	MJ
LP steam (kJ/h)	7.05E+06	5.64.E-01	MJ
<b>Utilities</b>	<b>2.83.E+07</b>	<b>2.26.E+03</b>	
Cooling water	2.34E+07	1.87.E+03	kg
Very cool water	4.87E+06	3.89.E+02	kg
Washing water (kg/h)	370	2.96.E-02	kg
<b>Products</b>			
Biodiesel @ >98 wt% (kg/h)	12510	1	kg
Glycerol @ >93 wt% (kg/h)	1202	9.61.E-02	kg
Palm oil + methyl ester			
<b>Wastes (kg/h)</b>	<b>7.45.E+02</b>	<b>5.95.E-02</b>	
Waste water	725	5.80.E-02	kg
Na3PO4	19.8	1.58.E-03	kg

심층 문헌조사

Inputs/Outputs: ethanol production from maize | ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation

Inputs			
Flow	Category	Amount	Unit
Fe ammonium sulfate	201:Manufacture of basic chemicals...	0.00967	kg
Fe Carbon dioxide, in air	Resource/In air	1.49097	kg
Fe electricity, medium voltage	351:Electric power generation, trans...	0.05401	kWh
Fe electricity, medium voltage	351:Electric power generation, trans...	0.02269	kWh
Fe electricity, medium voltage	351:Electric power generation, trans...	0.07948	kWh
Fe electricity, medium voltage	351:Electric power generation, trans...	0.01659	kWh
Fe electricity, medium voltage	351:Electric power generation, trans...	0.24129	kWh
Fe electricity, medium voltage	351:Electric power generation, trans...	0.00099	kWh
Fe electricity, medium voltage	351:Electric power generation, trans...	0.00215	kWh
Fe ethanol fermentation plant	429:Construction of other civil engi...	4.98367E-10	Item(s)
Fe heat, district or industrial, natural gas	351:Electric power generation, trans...	13.32771	MJ
Fe heat, district or industrial, natural gas	351:Electric power generation, trans...	0.55574	MJ
Fe inorganic nitrogen fertilizer, as N	016:Support activities to agriculture ...	3.61627E-05	kg
Fe inorganic nitrogen fertilizer, as N	016:Support activities to agriculture ...	4.94631E-05	kg
Fe inorganic nitrogen fertilizer, as N	016:Support activities to agriculture ...	8.56238E-05	kg
Fe inorganic nitrogen fertilizer, as N	016:Support activities to agriculture ...	0.00129	kg
Fe inorganic nitrogen fertilizer, as N	016:Support activities to agriculture ...	0.00022	kg
Fe inorganic nitrogen fertilizer, as N	016:Support activities to agriculture ...	0.00072	kg

Outputs			
Flow	Category	Amount	Unit
Fe Carbon dioxide, non-fossil	Emission to air/high population den...	2.49648	kg
Fe ethanol, without water, in 95% solution stat...	201:Manufacture of basic chemi...	1.00000	kg
Fe wastewater, from residence	370:Severage/3700:Severage	0.00290	m3
Fe Water	Emission to air/unspecified	0.00288	m3
Fe Water	Emission to water/unspecified	0.00176	m3

General information | Inputs/Outputs | Administrative information | Modeling and validation | Parameters | Allocation | Social aspects | Impact analysis

기존 LCI DB 활용

## 1.2 기술별 전문가 설문조사

기술별 전문가 16명(바이오 고형연료 1명, 바이오가스 3명, 바이오중유 3명, 바이오휘발유 3명, 바이오디젤 3명, 바이오항공유 3명)을 대상으로 설문조사를 수행하였다. 전문가에게는 바이오에너지 기술별 국내외 동향과 함께 심층 문헌조사를 통해 작성된 주요 투입/산출 항목에 대한 검토 후 추가 및 수정의견 등을 포함한 작성본을 요청하였다.

[그림 3-10] 기술별 전문가 대상 설문조사지

## 1.3 바이오에너지 기술별 주요 투입·산출 데이터 수집 결과

가. 바이오 고형연료

국내 바이오 고형원료의 원료는 목재펠릿(Wood pellet)이며 목재 기반의 펠릿형태의 연료로 심층 문헌조사를 통해 작성된 톱밥(sawdust), 대패밥(shavings) 및 목재칩(wood chips)은 현재의 원료 종류로는 사용되지 않고 있는 것으로 나타났다. 목재펠릿 관련 국제표준 ISO 17225-2: graded wood pellet에서 정의하고 있는 목재펠릿은 원목(Stem wood), 뿌리를 제외한 전목(Whole tree without roots), 벌채부산물(Logging residues), 조림목(Forest plantation) 등으로 분류할 수 있다고 명시하고 있다. 국내의 경우, 산림청 고시에서는

목재펠릿 원료 범위를 ‘침엽수, 활엽수, 대나무 톱밥 등이나 분쇄한 것’으로 규정하고 제재부산물을 포함한 순수한 목재 부산물을 의미하는 것으로 나타난다. 따라서, 바이오 고형연료에 사용되는 원료의 범위는 침엽수 또는 분쇄한 것, 활엽수 또는 분쇄한 것, 대나무 또는 분쇄한 것으로 규정하는 것이 국내 기준에 적합할 것으로 판단하였다.

바이오 고형연료 전문가 설문조사를 통해 작성된 주요 투입/산출 항목에 대한 검토 결과와 추가 및 수정된 내용을 취합한 최종 결과는 아래 <표 3-8>과 같다.

<표 3-8> 바이오 고형연료 주요 투입·산출 항목표

구분	세부 구분	주요 항목 (투입/산출물)
투입물 (inputs)	주원료 (Feed)	sawdust, wet, measured as dry mass
		shavings, hardwood, measured as dry mass
		shavings, softwood, measured as dry mass
		wood chips, wet, measured as dry mass
		침엽수 (Softwood)
		침엽수 분쇄
		활엽수(Hardwood)
		활엽수 분쇄
		대나무(Bamboo)
		대나무 분쇄
		stemwood
		wood industry residues
		forest residues
		short rotation coppice (Eucalyptus)
		short rotation coppice (Poplar - Fertilised)
		short rotation coppice (Poplar - no fertilisation)
		Straw
		Bagasse
	부원료	lubricating oil
	유틸리티	electricity, medium voltage
LNG		
Steam		
산출물 (outputs)	제품	wood pellet, measured as dry mass(moisture content less than 10%)
	부산물	wood flour for fertilizer(possible)
	폐기물	waste mineral oil

#### 나. 바이오가스

심층 문헌조사를 통해 작성된 국내 바이오가스의 주원료는 톱밥(sawdust) 및 고농도의 유기물을 함유한 유기성 폐기물과 바이오매스(톱밥, silage 등)으로 나타났지만, 전문가 의견에 따르면 국내에서는 일반적으로 음식물류 폐기물, 음폐수 외에도 가축분뇨 (한우, 젖소, 돈분 등), 하수슬러지(with 폐수슬러지) 등을 주원료로 사용하는 경우가 많은 것으로 조사되었다.



&lt;표 3-9&gt; 바이오가스 주요 투입·산출 항목표

구분	세부 구분	주요 항목 (투입/산출물)
투입물 (inputs)	주원료 (Feed)	sawdust, wet, measured as dry mass
		silage
		Sewage sludge
		livestock manure
		food waste
	부원료	Impeller
	유틸리티	electricity, low voltage
		heat, district or industrial, natural gas
		hot water, heat from natural gas
		hot water, heat from flue gas of power plant or fuel cell
		steam, sourced by LNG
		steam, sourced by biogas
		steam, sourced by flue gas
		lubricating oil
		Anaerobic digestion reactor
		Gas holder
		Flare stack
Gas generator		
Sensor (pH meter, Temperature, Pressure gage)		
산출물 (outputs)	제품	biogas, from grass
		Biogas (Methane, CO2), Electronic, Steam
	부산물	protein feed, 100% crude (가축 사료) / grass fibre
		pellet
	폐기물	solid residues to landfill
		Anaerobic digestion sludge
	폐수	wastewater from grass refinery
Anaerobic digestion effluent wastewater		

#### 다. 바이오중유

문헌 조사 결과 국내 바이오중유 생산의 주원료는 수입산 팜유 부산물과 국내산 바이오디젤 공정부산물이며, 국내산 보다 수입산 주원료에 대한 사용 비율이 더 큰 것으로 나타났다. 그러나, 바이오중유의 주원료에 대한 기술 전문가 의견으로는, 바이오매스(톱밥, silver grass), 농업부산물(straws, haulm), 하수슬러지 오일 등 다양한 주원료가 사용되고 있는 것으로 조사되었다.

<표 3-10> 바이오중유 주요 투입·산출 항목표

구분	세부 구분	주요 항목 (투입/산출물)
투입물 (inputs)	주원료 (Feed)	woody residue
		woody sawdust
		Coffee waste (coffee ground)
		Agricultural wastes (straws, haulm)
		Silver glass (Geodae Oeksae)
		Brown grease
		Olechemical residue(동물성유지)
		바이오디젤 부산물 (byproducts from biodiesel plants)
		하수슬러지 유래 오일 (swage sludge oil)
	부원료	Magnesium Oxide (MgO)
		Olivine
		Tar Reformer Catalyst
		Zinc Oxide (ZnO) Catalyst
		Isomerization/Hydrocracking Catalyst
		LO-CAT Chemicals (킬레이트화 철 용액)
		Ethanol
		Methanol
		Deoxidation catalyst (ex. MgNiMo)
		Phosphoric acid
		Citric Acid
		Sodium Hydroxide
		Bleaching Earth
		Filter aid
		Hydrogen
		Metal-supported catalyts
	유틸리티	LNG
		Coal
		Diesel
		Electricity
		Water
	산출물 (outputs)	제품
부산물		Pyrolysis Oil
		Jet
		Gasoline
		C1-C4 gases
		Naphtha
		Wax
Hydrogen		
폐기물		-
폐수		Wastewater

## 라. 바이오휘발유

기술 전문가의 설문조사 결과에 따르면 주원료의 경우, 유럽이나 미국의 사례와 유사하게 국내 바이오휘발유의 주원료는 현재 식량 기반 1세대 원료를 상용하고 있으며, 비식량계 기반 2세대 원료(wood waste, agricultural waste 등)는 R&D 중인 것으로 조사되었다.

실제 상업적으로 많이 사용되고 있는 바이오매스는 한정되어 있으므로, 모든 주원료를 고려할지 상업적으로 많이 사용되는 주원료(옥수수, 카사바, 사탕수수, Molasses 등)를 선택할 지에 대한 결정이 필요하다는 의견도 있었다. 추가 의견에 따라 보리(barley), 옥수수(corn), 사탕수수(sugar cane), 사탕수수 기반 당밀(molasses, from sugar beet)을 추가하였다.

부원료의 경우, 추가 의견으로 CSL(Corn Steep Liquor), magnesium sulfate, acetic acid, sodium chloride, sodium acetate 등 액상 산 촉매에 대한 공통적인 추가 의견에 따라 이 부원료들을 추가하였다.

&lt;표 3-11&gt; 바이오휘발유 주요 투입·산출 항목표

구분	세부 구분	주요 항목 (투입/산출물)
투입물 (inputs)	주원료 (Feed)	maize grain
		potato
		rye grain
		molasses, from sugar beet
		vinasse, from fermentation of sugar beet molasses
		sugar beet
		vinasse, from fermentation of sugar beet
		sweet sorghum stem
		vinasse, from fermentation of sweet sorghum
		cassava
		barley
		pampas grass
		whey
		corn
		sugar cane
		wood
		agricultural waste
	soybean oil	
	부원료	ammonium sulfate
		sulfuric acid
		soda ash, light, crystalline, heptahydrate
		inorganic nitrogen fertiliser, as N
		sodium phosphate
		sodium sulfate, anhydrite
		ammonia, anhydrous, liquid
		sodium chloride, powder
		chlorine, liquid
		lubricating oil

구분	세부 구분	주요 항목 (투입/산출물)
		Calciumhydroxide
		Magnesium sulfate
		Sodium hydroxide
		enzyme
		alpha amylase
		gluco amylase
		cellulase
		yeast
		CSL(Corn Steep Liquor)
		potassium phosphate
		Ferrous sulfate
		acetic acid
		sodium acetate
		antifoam
	유틸리티	electricity
		heat, district or industrial, natural gas
		tap water
Water, cooling, unspecified natural origin		
water, decarbonised		
	nitrogen, gas	
산출물 (outputs)	제품	ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation
		bio-butanol
	부산물	Distiller's Dried Grains with Soluble (DDGS)
		acetone
		acetic acid
		butric acid
		hydrogen
	carbon dioxide	
	폐기물	municipal solid waste, waste mineral oil, wood ash mixture(pure)
	폐수	wastewater(from residence), wastewater(average)

마. 바이오디젤

기술 전문가의 설문 응답에 따라 향후 기술개발 진행사항에 따라 탄소저감율이 높은 신규 바이오매스 원료로 활용이 예상되는 Rubber seed oil, Micro Algal oil, R. Trisperma Oil, Kemiri Sunan Oil, Waste Fat and Oil 등이 추가되었다.

부원료의 경우, 추가된 주원료로부터 바이오디젤 생산효율을 위해 액상 산촉매(Sulfuric Acid)나 고체 산촉매(Soild Acid Catalyst)를 추가하여야 한다는 의견에 따라 추가하였다.

&lt;표 3-12&gt; 바이오디젤 주요 투입·산출 항목표

구분	세부 구분	주요 항목 (투입/산출물)
투입물 (inputs)	주원료 (Feed)	soybean oil, crude
		palm oil, crude
		rapeseed oil, crude
		cottonseed oil, crude
		tallow, unrefined
		used vegetable cooking oil, purified
		Palm Fatty Acid Distillate (PFAD)
		Microalgae derived oil
		Agricultural residues
		forest residues
		Kenaf
		Animal fat
		vegetable oil
		rice bran oil
		coconut oil
		lard
		Triglycerides
		Diglyceride
		monoglyceride
		Grease
		lipid
		Rubber seed oil
		Trisperma Oil
		Kemiri Sunan Oil
		Waste Fat and Oil
		부원료
	hydrochloric acid, without water, in 30% solution state	
	phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state	
	sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	
	potassium hydroxide	
	sodium methoxide	
	methanol	
	ethanol	
	Ferric hydroxide	
	Zinc oxide	
	filter ceramic	
	platinum based catalyst	
Palladium based catalyst		
Ruthenium based catalyst		
Iron based catalyst		
Sulfuric Acid		
고체 산촉매 (Solid Acid Catalyst)		
유틸리티	electricity, medium voltage	

구분	세부 구분	주요 항목 (투입/산출물)
		heat, district or industrial, natural gas heat, district or industrial, other than natural gas water, deionised tap water water, cooling, unspecified natural origin steam(based on natural gas) steam(based on biomass) steam(based on coal)
산출물 (outputs)	제품	fatty acid methyl ester Hydro-treated Vegetable oil(HVO) Biomass to Liquid(BTL) diesel Bioparaffin oil
	부산물	glycerine
	폐기물	municipal solid waste
	폐수	wastewater(from residence), wastewater(average)

바. 바이오항공유

심층 문헌조사 결과로는 바이오항공유 생산에 사용되는 주원료는 동물성 지방, 식물성오일, 목질계, 해조류계 등 다양한 원료를 사용할 수 있으나, 국내의 경우 OTJ(Oil to Jet) 방식을 활용해 주로 팜오일이나 폐식용유를 원료로 사용할 것으로 나타났다.

기술 전문가의 추가 의견으로는 바이오매스(corn stover, switchgrass, agricultural residues, forest residues 등), 식품계 오일(camelina oil, soybean oil, palm oil 등) 등에 따라 주원료를 추가하였다.

<표 3-13> 바이오항공유 투입·산출 항목표

구분	세부 구분	주요 항목 (투입/산출물)
투입물 (inputs)	주원료 (Feed)	poplar(bone dry)
		Jatropha(husk)
		Jatropha(fruit)
		Jatropha(seed)
		Castor(husk)
		Castor(fruit)
		Castor(seed)
		camelina oil
		algae derived oil
		corn stover
		switchgrass
		short rotation woody crops
		soybean oil
		palm oil
		rapeseed oil
		Agricultural residues,
		forest residues
		Kenaf
		waste (cooking) oil
		fine wood
		oak wood
		Canola oil
		Sunflower oil
		Beef tallow, packer
		Yellow grease tallow
		Woody biomass
		Sawdust
		Wood residue
Wood		
Lignocellulose		
Rice husks		
Sewage sludge		
Agricultural waste		

구분	세부 구분	주요 항목 (투입/산출물)
		Recycled tyres
		End-of-life plastics
		Sugarcane
		Corn
		Corn grain
		ethanol
		butanol
		Cassava
		Lignocellulose
		Triticale
		Miscanthus
		Bioethanol
	부원료	enzymes
		sulfuric acid
		lime
		carbon dioxide (CO2)
		calcium carbonate
		ammonia
		nickel based catalyst
		alumina based catalyst
		clarifier polymer
		corn steep liquor
		Hexane
		Phosphoric acid
		hydrogen
		sodium hydroxide
		platinum based catalyst
		Palladium based catalyst
		Ruthenium based catalyst
		Iron based catalyst
	methanol	
	ethanol	
	oxygen	
Nitrogen		
유틸리티	natural gas - to burner	
	natural gas - SMR(Steam Methane Reforming)	
	steam	
	electricity	
산출물 (outputs)	제품	Fischer-Tropsch hydroprocessed synthesized paraffinic kerosene(FT-SPK)
		Synthesized paraffinic kerosene produced from hydroprocessed esters and fatty acids(HEPA-SPK)
		Synthesized iso-paraffins produced from hydroprocessed fermented sugars(SIP-HFS)
		Synthesized kerosene with aromatics derived by alkylation of light



구분	세부 구분	주요 항목 (투입/산출물)
		aromatics from non-petroleum sources(SPK/A)
		Alcohol-to-jet synthetic paraffinic kerosene(ATJ-SPK)
		Catalytic hydrothermolysis jet fuel(CHJ)
		Synthesized paraffinic kerosene from hydrocarbon-hydroprocessed esters and fatty acids(HC-HEFA-SPK)
		Co-processing jet fuel
	부산물	renewable biodiesel
		naptha
		LPG
		propane mix
		wax
		coke
		low-quality carbon
		hydrogen
		Carbon monoxide
		Methane
		Fuel Gas
		Farnesane
		ethanol
		butanol
		Animal feed
	Corn oil	
	Oligomer	
	폐기물	Gypsum
		Ash
	폐수	waste water
	대기배출물	CO2

## 2. Feedstock 별 수입 및 국내 생산동향

심층 문헌조사 후 바이오에너지 기술 전문가 대상 설문조사 결과까지 취합하여 작성된 투입물 항목 중 feedstock(주원료)에 대한 국내 생산량과 해외로부터의 수입량을 조사하였다. 이는 향후 시뮬레이터에 반영할 Feedstock의 LCI DB가 국가별로 구축되어 있기 때문이다.

국내 생산량 동향에 대한 통계자료는 제한적이며, 자료가 없을 경우 유사 feedstock으로 대체하여 조사하였다. 해외 수입량에 대한 통계는 상대적으로 조사가 용이하였으며, 주요 수입국가별 수입량 통계를 기반으로 feedstock 별 주요 수입국을 조사하였으며 주요 feedstock에 대한 국내생산 및 수입량 통계만 바이오에너지 기술별로 설명하였다.

## 2.1 바이오 고형연료

국내 바이오 고형원료 생산에 사용되는 대표적인 바이오매스는 목재 펠릿이며, ‘12년 신재생에너지 공급의무화제도(RPS)를 도입 및 시행함에 따라 폐지, 농업부산물, 폐목재, 풀 등 가연성 고체 폐기물을 사용하여 품질 등급 기준에 적합하게 제조한 고체 연료인 Bio-SRF 사용량도 크게 증가하고 있다.

‘20년 기준 국내 목재 펠릿 소비량 총 326만 톤 중 수입산 290만 톤의 70% 이상은 베트남산으로 수입산 고형연료(목재 펠릿)에 대한 의존도가 매우 높은 실정이다 (<표 3-14>). 이에 따라, ‘21년 9월 민간 발전 3사는 정부의 탄소중립 정책에 맞추어 바이오 혼소 발전 원료로 수입 목재 펠릿을 유예기간을 거쳐 ‘25년 전량 국내산으로 대체하기로 합의하였다.<sup>39)</sup>

<표 3-14> 2016-2020 연도별 목재 펠릿 생산량

(단위: 톤 ton)

연도별	2016	2017	2018	2019	2020	2021
계	1,769,213	1,773,294	3,200,190	2,809,845	3,257,798	3,836,896
국산	52,572	67,446	187,745	243,287	331,202	658,336
수입산	1,716,641	1,705,848	3,012,445	2,566,558	2,926,596	3,178,560
자급률 (%)	3	3.8	5.9	8.7	10.2	17.2

<표 3-15> 바이오 고형연료(목재펠릿) 에너지 생산량/발전량

신재생에너지 현황		2016	2017	2018	2019	2020
에너지 생산량 (toe)	소계	817,172	1,099,049	1,486,488	1,543,390	1,325,675
발전량 (MWh)	소계	2,679,313	3,722,931	4,837,318	4,959,229	4,926,845
누적 보급 용량 <sup>40)</sup>	전기(kW)	986,048	1,270,523	1,383,881	1,343,074	1,512,934
	열(증기톤/시간)	1,568	1,715	1,742	1,706	2,134
신규 보급용량 <sup>41)</sup>	전기(kW)	200,000	333,451	165,290	43,325	259,551
	열(증기톤/시간)	962	187	27	34	-

39) 한국과학기술기획평가원(KISTEP), “기술동향브리프 - 바이오연료”, 2022, [https://www.kistep.re.kr/board.es?mid=a10306040000&bid=0031&act=view&list\\_no=42590](https://www.kistep.re.kr/board.es?mid=a10306040000&bid=0031&act=view&list_no=42590)

40) 누적 보급용량은 2020년 기준 가동설비 누적용량임

41) 최근 3년간 신규 보급용량은 각 연도별로 설치된 가동설비 용량임

바이오 고형연료의 주원료(feedstock)에 대한 전문가 설문조사 결과에 따르면(<표 3-16>), 심층 문헌조사를 통해 포함시켰던 톱밥(sawdust), 대패밥(shavings) 및 목재칩(wood chips)은 현재 국내에서는 주원료로 사용되지 않고 있다. 그러나, 제재부산물에 포함되기 때문에 비교군으로 활용하기 위하여 시뮬레이터에 포함하였다.

현재 국내 바이오 고형연료 생산에 사용되는 주원료로는 칩엽수 또는 분쇄한 것, 활엽수 또는 분쇄한 것, 대나무 또는 분쇄한 것이 주로 사용되고 있으며 이는 산림청 고시에 따른 목재펠릿 원료 범위에 규정되어 있다.

<표 3-16> 바이오 고형연료 주원료 - 전문가 설문조사 결과

구분	주요 항목 (투입/산출물)
주원료 (Feed)	Sawdust 톱밥
	Shavings, hardwood 목재 대패톱밥, 활엽수
	Shavings, hardwood 목재 대패톱밥, 칩엽수
	Wood chips 우드칩
	Softwood 칩엽수
	활엽수 (Hardwood)
	칩엽수 또는 분쇄한 것
	활엽수 또는 분쇄한 것
	대나무 또는 분쇄한 것
	stem wood
	wood industry residues
	forest residues
	short rotation coppice (Eucalyptus)
	short rotation coppice (Poplar - Fertilised)
	short rotation coppice (Poplar - no fertilisation)
	Straw
Bagasse	

칩엽수 또는 분쇄한 것, 활엽수 또는 분쇄한 것, 대나무 또는 분쇄한 것에 대한 국내 생산량 통계자료는 없으며, 2016년 산림청 통계자료 “산림바이오매스 고형연료 제조업 전체 원재료 조달 방법별 구입량<sup>42)</sup>”에 나타난 주요 원재료 조달 지역이 주요 생산지역임을 추론할 수 있다. 이 통계자료에 따르면 국내 고형업체 제조업체는 대부분 경상권역으로부터 원재료를 직접 벌채, 목상 또는 벌채사업자로부터 구입, 국가와 계약 후 직접 벌채를 통해 조달하고 있는 것으로 나타났다.

대나무 또는 분쇄한 것에 대한 국내 생산량 통계자료가 없으므로, 대나무 주요 국가별 수입량 통계자료<sup>43)</sup>를 조사한 결과 대나무의 경우 거의 전량을 중국으로부터 수입하고 있는

42) 산림청, 「목재이용실태조사」, “산림바이오매스 SRF(고형연료) 제조업\_전체 원재료 조달방법별 구입량”

43) K-stat 통계 “품목수출입-대나무”

것으로 나타나고 있다(<표 3-17>).

국립산림과학원의 도·광역시별 대나무 주요 죽종별 분포 면적 통계<sup>44)</sup>에 따르면 국내 전체 분포 면적 22,067ha 중 전라남도(36.8%), 경상남도(32.3%), 경상북도(9.0%), 전라북도(8.1%), 충청남도(7.5%)에 93% 이상 분포하고 있다. 그러나, 이 분포지역에서 고품원료의 주원료인 대나무 또는 분쇄된 형태로 가공·생산 여부는 확인이 어렵다.

<표 3-17> 주요 국가별 대나무 수입량

(단위: kg, %)

순번	국가명	2020년		2021년 (12월)	
		수입 중량	구성비(%)	수입 중량	구성비(%)
	총계	5,138,426	100.0%	4,129,227	100.0%
1	중국	5,115,741	99.6%	4,117,098	99.7%
2	베트남	216	0.0%	10,850	0.3%
3	일본	1,988	0.0%	678	0.0%
4	인도네시아	15	0.0%	594	0.0%
5	독일	0	0.0%	6	0.0%
6	미국	0	0.0%	2	0.0%
7	태국	280	0.0%	0	0.0%
8	이탈리아	1	0.0%	0	0.0%
9	싱가포르	0	0.0%	0	0.0%
10	북마리아나 군도	0	0.0%	0	0.0%
11	마다가스카르	180	0.0%	0	0.0%
12	러시아	0	0.0%	0	0.0%
13	라오스	20,005	0.4%	0	0.0%

바이오 고품원료 feedstock 별 국내 주요 생산지역, 해외 주요 수입국가 조사 결과는 <표 3-18>과 같다.

44) K-stat 통계 “품목수출입-대나무“

&lt;표 3-18&gt; 고품연료 feedstock 별 국내 주요 생산지역, 해외 주요 수입국가

주요 항목 (투입/산출물)	국내 주요 생산지	주요 수입국가
Sawdust 톱밥	국내 가정	-
Shavings, hardwood 목재 대패톱밥, 활엽수		-
Shavings, hardwood 목재 대패톱밥, 침엽수		-
Wood chips 우드칩	국내	-
Softwood 침엽수	국내	-
활엽수 (Hardwood)	국내	-
대나무	국내	중국
침엽수 또는 분쇄한 것	경상권	-
활엽수 또는 분쇄한 것	경상권	-
대나무 또는 분쇄한 것	국내	중국
stem wood	국내	-
wood industry residues	국내	-
forest residues	국내 가정	-
short rotation coppice (Eucalyptus)	국내	-
short rotation coppice (Poplar - Fertilised)	국내	-
short rotation coppice (Poplar - no fertilisation)	국내	-
Straw	국내	-
Bagasse	국내	브라질

## 2.2 바이오가스

바이오가스의 종류는 바이오 메탄, 바이오 수소 등이 있으며<sup>45)</sup>, 바이오가스의 feedstock(원료)은 하수슬러지, 매립지(LFG), 음식물 쓰레기, 음폐수, 가축분뇨, 유기성 산업 폐기물, 농산물 등이 있다.

국내 바이오가스 총생산량을 살펴보면, 계속해서 증가하는 추세를 보인다. ‘20년에는 8,135.032 TJ로 ’16년 대비 14.5% 증가하였다.

&lt;표 3-19&gt; 2016-2020 국내 바이오가스 생산량

항목별	2016	2017	2018	2019	2020
생산량 (TJ)	6,955.000	7,332.845	7,405.922	8,108.162	8,135.032

45) 한국과학기술기획평가원(KISTEP), “기술동향브리프 - 바이오연료”, 2022,  
[https://www.kistep.re.kr/board.es?mid=a10306040000&bid=0031&act=view&list\\_no=42590](https://www.kistep.re.kr/board.es?mid=a10306040000&bid=0031&act=view&list_no=42590)

<표 3-20> 2016-2020 바이오가스 에너지 생산량/발전량

신재생에너지 현황		2016	2017	2018	2019	2020
에너지 생산량(toe)	소계	94,999	98,123	91,740	96,281	95,385
발전량 (MWh)	소계	138,600	170,599	175,007	195,247	179,046
누적 보급용량	전기 (kW)	49,041	55,637	60,396	60,945	61,532
	열 (증기톤/시간)	862	691	640	625	625
신규 보급용량	전기 (kW)	9,003	8,115	6,049	5,569	3,925
	열 (증기톤/시간)	18	49	17	34	13

바이오가스의 주원료(feedstock)에 대한 전문가 설문조사 결과에 따르면(표 20), 심층 문헌조사를 통해 포함시켰던 톱밥(sawdust), 짚(silage), 가축분뇨(livestock manure) 외에 전문가 의견을 반영하여 국내에서 주원료로 사용되고 있는 하수슬러지(sewage sludge)를 포함하였다. 이 주원료들은 모두 부산물에 해당하며, 특히 가축분뇨의 경우 국내 가축 농가가 많이 분포되어 있는 지자체별 바이오가스 주원료로 상용화 기술을 개발 중이므로 그중 가장 발생량이 많은 소와 돼지 분뇨를 시플레이터에 포함하였다.

<표 3-21> 바이오가스 주원료 - 전문가 설문조사 결과

구분	주요 항목 (투입/산출물)
주원료 (Feed)	sawdust, wet, measured as dry mass
	silage
	Sewage sludge
	livestock manure
	food waste

바이오가스는 주로 국내 폐기물을 원료로 사용하고 있으며, 지역별 바이오가스 원료 생산량에 대한 자료는 없다.

국내에서는 음식물류 폐기물, 가축분뇨, 하수슬러지 등의 유기성 폐자원 처리를 통한 '21년 기준 총 바이오 생산량은 375,002,000 Sm<sup>3</sup>이었으며, 구성비로는 혼합(유기성 폐기물)물을 사용하여 생산된 바이오가스 56%, 음식물 사용 29%, 하수슬러지 13% 등의 순이다(<표 3-22>).

바이오가스 생산·활용 시설은 '20년 110개소로 전년 대비 9개 시설이 증가하였으며, 시설용량은 67,450톤/일로 증가하였으나 처리실적은 연간 1,952만 톤으로 감소하였다.

&lt;표 3-22&gt; 2021년 국내 바이오가스 원료별 생산/이용 현황

(단위: 천Sm<sup>3</sup>/년)

구분	생산량	바이오가스 생산/이용 현황		
		자체 이용	외부 공급, 판매	기타 단순 소각
합계	375,002	202,071	115,648	57,284
음식물	109,119	56,189	31,506	21,424
가축분뇨	1,081	1,031	0	49
하수슬러지	50,441	30,921	7,183	12,338
혼합 (유기성 폐기물)	209,740	109,440	76,959	23,340

&lt;표 3-23&gt; 2020 폐기물 재활용 실적 및 업체 현황

구분	소계	가동업체수(개)	재활용 폐기물량 (톤/년)	판매량 (톤/년)
일반폐기물	음식물폐기물 및 처리물	552	2,411,875	6,773,506
유기성오니	하수처리오니	11	13,681	2,565
	분뇨처리오니	280	1,695,815	310,707
	그 밖의 유기성오니	69	36,997	152,502

바이오가스 feedstock 별 국내 주요 생산지역, 해외 주요 수입국가 조사 결과는 <표3-24>와 같다.

&lt;표 3-24&gt; 바이오가스 feedstock 별 국내 주요 생산지역, 해외 주요 수입국가

주요 항목 (투입/산출물)	국내 주요 생산지	주요 수입국가
Sawdust 톱밥	국내	-
silage 건초(짚)	국내	미국
Sewage sludge	국내	-
livestock manure	국내	-
food waste	국내	-

### 2.3 바이오중유(선박유)

바이오중유는 수입산 팜유(부산물), 국내산 바이오디젤 공정부산물 등을 주원료로 활용하여 제조하며, 국내산 원료 비율은 약 31% ('19년 기준)이다.

연도별 바이오중유 원료 수급 현황을 살펴보면, 국내 생산량 대비 수입산 사용량이 많아 자급률이 50% 미만이다. 국내 바이오중유 시장은 '16년 대비 '19년 55% 증가하였으며, 시장 규모가 커짐에 따라 에너지 생산량과 발전량도 증가하는 추세를 보인다.

<표 3-25> 2014-2019 연도별 바이오중유 원료 사용량

(단위: 톤 ton)

연도별	2014	2015	2016	2017	2018	2019
계	185	319	351	333	329	421
국산	87	98	138	163	148	131
수입산	98	221	213	170	181	290
자급률 (%)	47%	31%	39%	49%	45%	31%

<표 3-26> 2016-2019 국내 바이오중유 시장 규모

	2016년	2017년	2018년	2019년
바이오중유 시장 규모 (kL)	440,000	500,000	600,000	800,000

<표 3-27> 2016-2020 바이오중유 에너지 생산량

신재생에너지 현황		2016	2017	2018	2019	2020
에너지 생산량 (toe)	소계	306,175	266,012	344,048	488,877	408,559
발전량 (MWh)	소계	1,454,982	1,242,311	1,609,999	2,295,198	1,918,119
누적 보급용량	전기 (kW)	359,350	359,350	979,350	1,020,350	950,350
신규 보급용량	전기 (kW)	-	-	620,000	100,000	-

바이오중유 전문가 설문조사 결과에 따르면, 바이오중유는 혐기성 소화 (바이오가스 생산) 수행 시 고농도의 유기물을 함유한 유기성 폐기물 및 바이오매스를 이용하여 최종적으로 메탄을 생산하는 공정으로 일반적으로 음식물류 폐기물, 음폐수, 가축분뇨 (한우, 젓소, 돈분 등), 하수슬러지 (with 폐수슬러지)가 투입물 대상이다.

바이오중유의 주원료(feedstock)에 대한 전문가 설문조사 결과에 따르면(<표 3-28>), 심층 문헌조사를 통해 포함시켰던 목재 부산물(woody residue) 외에도 전문가 의견을 반영하여 목재 톱밥(woody sawdust), 농업부산물(agricultural wastes), silver grass 등을 추가하였다.



&lt;표 3-28&gt; 바이오중유 주원료 - 전문가 설문조사 결과

구분	주요 항목 (투입/산출물)
주원료 (Feed)	woody residue
	woody sawdust
	Coffee waste (coffee ground)
	Agricultural wastes (straws, haulm)
	Silver grass (Geodae Oeksae)
	Brown grease
	바이오디젤 부산물 (byproducts from biodiesel plants)
	하수슬러지 유래 오일 (sewage sludge oil)

바이오중유 원료 중 하나인 팜유의 수입 현황을 살펴보면, 팜유 수입 금액의 경우 '21년 전년도 대비 63.6% 증가하였고 수입 중량은 3.2% 증가하였다.

팜유 수입량은 '20년 총 587,126,069kg이었고, 말레이시아(52.5%)와 인도네시아 (47.2%)가 대부분을 차지하였다. '21년에도 총 605,700,742kg의 수입량에 대하여 말레이시아(43.5%)와 인도네시아(56.4%)가 대부분을 차지하였다.

&lt;표 3-29&gt; 2012-2021 국내 팜유와 그 분획물 수입 금액 및 수입 중량

연도	수입			
	금액 (천불)	증감률 (%)	중량 (kg)	증감률 (%)
2021년	661,615	63.6	605,700,742	3.2
2020년	404,405	16.0	587,126,069	-8.5
2019년	348,712	-10.2	641,965,432	6.4
2018년	388,358	8.0	603,278,519	19.0
2017년	359,744	18.0	506,926,355	7.3
2016년	304,892	8.8	472,310,719	5.3
2015년	280,207	-22.9	448,639,802	2.2
2014년	363,270	33.4	438,877,913	31.6
2013년	272,274	-18.8	333,560,332	2.6
2012년	335,475	-3.5	324,956,424	11.5

팜유의 총수입량은 '20년 대비 '21년 3.2% 증가하였다. 인도네시아로부터의 수입량이 '20년 대비 23.2% 증가한 반면, 말레이시아로부터의 수입량은 14.5% 감소하였다. 총수입량의 구성은 '21년을 기준 전체 수입량 중 인도네시아와 말레이시아로부터 각각 56%, 44%를 수입하였다(<표 3-30>).

인도네시아는 팜유 수출량 1위 국가이며, 말레이시아는 2위 국가이다. 인도네시아는 식용유 파동으로 인해 '22년 4월부터 팜유 원유와 파생상품 대부분의 수출을 무기한 금지하였고 이에 따라 국제 시장 수요가 늘어 2위 생산국인 말레이시아가 수출세 인하 등을 통해 국제 시장 공급을 늘리고 있다<sup>46)</sup>.

<표 3-30> 팜유 수입국가 및 수입량

순번	국가명	2020년		2021년	
		수입중량 (kg)	수입증감률 (%)	수입중량 (kg)	수입증감률 (%)
	총계	587,126,069	-8.5	605,700,742	3.2
1	인도네시아	277,342,070	-17.1	341,802,034	23.2
2	말레이시아	308,427,397	10.0	263,638,136	-14.5
3	싱가포르	172,018	22.2	115,200	-33.0
4	콜롬비아	121,600	7.5	91,200	-25.0
5	영국	72,018	699.8	45,506	-36.8
6	일본	3,602	-40.0	7,200	99.9
7	미국	5,457	-46.9	860	-84.2
8	기니	210	2,525.0	335	59.5
9	프랑스	0	0.0	180	0.0
10	중국	142	-28.7	51	-64.2
11	베트남	3	0.0	25	900.0
12	태국	0	0.0	7	1,494.1
13	호주	0	-100.0	4	0.0
14	나이지리아	0	-100.0	2	0.0
15	방글라데시	0	0.0	1	0.0
16	네덜란드	0	-100.0	1	0.0
17	홍콩	0	0.0	0	0.0
18	필리핀	0	-100.0	0	0.0
19	파푸아 뉴기니	0	-100.0	0	0.0
20	튀르키예	0	-100.0	0	0.0

바이오중유 feedstock 별 국내 주요 생산지역, 해외 주요 수입국가 조사 결과는 <표3-31>과 같다. woody residue의 경우, woody industrial residue, forest residue와 유사어이며 고품연료의 주원료로 포함된 woodchips 등이 해당한다. Woody sawdust의 경우, 앞서 고품연료의 주원료로 포함된 톱밥(sawdust)과 같으며 silvergrass는 억새의 한 종류로서 억새과 식물인 miscanthus로 조사하였다.

46) 한국무역협회(KITA), “인니 팜유 수출 금지령에 말레이시아 공급 늘린다” (2022.05.11.), <https://www.kita.net/cmmrcInfo/cmmrcNews/cmercNews/cmercNewsDetail.do?pageIndex=1&nIndex=1822698>

&lt;표 3-31&gt; 바이오중유 feedstock 별 국내 주요 생산지역, 해외 주요 수입국가

주요 항목 (투입/산출물)	국내 주요 생산지	주요 수입국가
woody residue	국내 가정	-
woody sawdust	국내	-
Coffee waste (coffee ground)	국내 가정	-
Agricultural wastes (straws, haulm)	국내	-
Silver grass (Geodae Oeksae)	국내	해외 기타
Brown grease	국내	-
바이오디젤 부산물 (byproducts from biodiesel plants)	별도 자료 없음	
하수슬러지 유래 오일 (sewage sludge oil)	국내	-

## 2.4 바이오휘발유

바이오휘발유 생산을 위한 feedstock은 1) 바이오에탄올 및 바이오부탄올과 2)바이오 가솔린으로 구분할 수 있다. 바이오휘발유의 주원료(feedstock)에 대한 전문가 설문조사 결과에 따르면(<표 3-32>), 심층 문헌조사를 통해 포함시켰던 주원료 외에 전문가 의견을 반영하여 옥수수(corn), sugarcane(사탕수수), 목재(wood), 농업부산물(agricultural waste)을 추가하였다.

&lt;표 3-32&gt; 바이오휘발유 주원료 - 전문가 설문조사 결과

구분	주요 항목 (투입/산출물)
주원료 (Feed)	maize grain
	potato
	rye grain
	molasses, from sugar beet
	vinasse, from fermentation of sugar beet molasses
	sugar beet
	vinasse, from fermentation of sugar beet
	sweet sorghum stem
	vinasse, from fermentation of sweet sorghum
	cassava
	barley
	pampas grass
	whey
	corn
	sugarcane
	wood
	agricultural waste
soybean oil	

바이오에탄올 및 바이오부탄올에 대한 feedstock을 중심으로 국내 생산량과 해외 주요 수입국가 및 수입량 국가 통계자료를 조사하였다(<표 3-33>). '19년 기준, 감자, 보리의

생산량이 증가한 반면, 밀 생산량은 감소하였다. 호밀 생산량 통계는 '04년 이후 통계자료가 존재하지 않으며, 사탕무의 경우는 국내에서 생산되지 않는 것으로 조사되었다. 카사바는 현재 국내 카사바 재배기술 체계를 구축 중이므로 통계자료가 존재하지 않는다.

<표 3-33> 국내 바이오휘발유 feedstock 별 생산량 현황

년도	옥수수 (M/T)	감자 (M/T)	호밀 (M/T)	밀 (M/T)	사탕무 (M/T)	보리 (M/T)	카사바 (M/T)
2015	78,243	537,738	-	26,433	-	111,304	-
2016	73,681	555,670	-	38,705	-	107,812	-
2017	72,587	466,755	-	37,425	-	109,726	-
2018	78,012	548,065	-	25,788	-	151,401	-
2019	76,336	690,419	-	15,024	-	200,004	-
2020	-	-	-	-	-	143,669	-
2021	-	-	-	-	-	128,869	-

<표 3-34>에 나타난 바와 같이, '21년 기준, 옥수수 수입량의 약 80% 이상을 아르헨티나, 미국, 브라질로부터 수입하고 있으며, 러시아, 세르비아공화국, 불가리아, 남아공으로부터의 수입량도 약 14%에 달한다.

<표 3-34> 주요 국가별 옥수수 수입량

(단위: kg, %)

순번	국가명	2020년		2021년 (12월)	
		수입중량	구성비(%)	수입중량	구성비(%)
	총계	11,663,974,703	100%	11,653,546,761	100%
1	아르헨티나	2,772,655,268	24%	4,448,755,558	38%
2	미국	3,048,720,217	26%	3,256,983,630	28%
3	브라질	1,857,309,282	16%	1,694,058,733	15%
4	러시아	253,779,056	2%	519,998,760	4%
5	세르비아공화국	618,279,346	5%	484,018,124	4%
6	불가리아	163,918,965	1%	351,386,461	3%
7	남아프리카 공화국	354,625,608	3%	328,599,387	3%
8	우크라이나	1,913,396,987	16%	176,636,431	2%
9	파라과이	347,167,633	3%	162,641,461	1%
10	헝가리	47,057,338	0%	90,983,148	1%
11	호주	47,228,267	0%	83,938,532	1%
12	루마니아	229,013,169	2%	44,308,715	0%
13	부탄	0	0%	7,000,000	0%
14	앤티가바부다	0	0%	2,780,000	0%
15	파키스탄	1	0%	1,143,000	0%
16	인도(인디아)	43,009	0%	154,240	0%
17	뉴질랜드	558,460	0%	84,700	0%
18	프랑스	1	0%	35,417	0%
19	캄보디아	4,000	0%	17,000	0%
20	중국	13,209	0%	13,842	0%

감자의 국내 생산량은 '21년 기준 강원도(31%), 충청남도(12%), 경상북도(12%)가 국내 전체 생산량의 약 53%를 차지하며, 전라남도(9%), 경기도(8%), 전라북도(7%), 경상남도(7%), 제주도(7%), 충청북도(5%) 등의 순으로 나타났다. 해외 수입량의 경우 중국, 미국, 베트남으로부터 전체 수입량의 약 95%를 수입한 것으로 나타났다.

<표 3-35> 주요 국가별 감자 수입량

(단위: kg, %)

순번	국가명	2020년		2021년 (12월)	
		수입중량	구성비(%)	수입중량	구성비(%)
	총계	5,443,462	100%	6,946,028	100%
1	중국	1,956,136	36%	2,918,315	42%
2	미국	2,436,889	45%	2,311,311	33%
3	베트남	816,800	15%	1,335,980	19%
4	벨기에	161,895	3%	285,822	4%
5	스페인	69,300	1%	94,600	1%
6	홍콩	0	0%	0	0%
7	프랑스	2,432	0%	0	0%
8	포르투갈	10	0%	0	0%
9	인도(인디아)	0	0%	0	0%
10	싱가포르	0	0%	0	0%
11	북마리아나 군도	0	0%	0	0%
12	말레이시아	0	0%	0	0%
13	러시아	0	0%	0	0%
14	네덜란드	0	0%	0	0%

호밀의 국내 생산량에 대한 통계자료는 통계청 자료<sup>47)</sup>가 존재하지만, 2004년부터 작성이 중지되었다. 따라서, 국내 밀 생산량 및 해외 밀 수입량에 대한 조사로 대체하였다. 국내 호밀 주요 생산지역은 전라도이며, 전남(34%), 전북(34%), 경남(21%), 광주광역시(9%)에서 국내 전체 생산량의 약 98%를 차지하는 것으로 나타났다 (<표 3-36>).

47) 통계청, 「농작물생산조사」

<표 3-36> 국내 호밀 지역별 생산량

(단위: 톤, %)

시도별	2016	2017	2018	2019	2020	
	생산량	생산량	생산량	생산량	생산량	구성비
계	38,705	37,425	25,788	15,024	16,985	100%
전라남도	15,421	16,193	11,559	7,055	5,773	34%
전라북도	10,358	8,637	6,399	3,805	5,759	34%
경상남도	6,366	7,142	3,409	3,159	3,552	21%
광주광역시	5,438	3,947	3,315	534	1,537	9%
경상북도	713	711	466	296	215	1%
충청남도	245	584	574	102	132	1%
인천광역시	0	0	0	0	11	0%
강원도	46	16	25	13	1	0%
충청북도	59	32	26	0	0	0%
대구광역시	59	151	0	0	0	0%
울산광역시	0	0	0	58	0	0%
경기도	0	7	10	0	0	0%
부산광역시	0	5	4	2	0	0%
제주도	0	0	0	0	5	0%
서울특별시	0	0	0	0	0	0%
대전광역시	0	0	0	0	0	0%
세종특별자치시	0	0	0	0	0	0%

밀 수입은 거의 전량 캐나다에서 수입하고 있는 것으로 나타났다 (<표 3-37>).

<표 3-37> 주요 국가별 밀 수입량

(단위: kg, %)

순번	국가명	2020년		2021년 (12월)	
		수입중량	구성비(%)	수입중량	구성비(%)
	총계	339,797	100%	510,874	100%
1	캐나다	339,751	100%	510,860	100%
2	독일	20	0%	5	0%
3	에스토니아	0	0%	3	0%
4	벨기에	0	0%	3	0%
5	중국	0	0%	1	0%
6	영국	0	0%	1	0%
7	미국	7	0%	1	0%
8	프랑스	20	0%	0	0%
9	뉴질랜드	0	0%	0	0%
10	네덜란드	0	0%	0	0%

사탕무는 국내에서 생산되지 않고 있으며, 전체 수입량을 전량 중국으로부터 수입하는 것으로 나타났다.

<표 3-38> 주요 국가별 사탕무 수입량

순번	국가명	2020년		2021년 (12월)	
		수입종량	구성비(%)	수입종량	구성비(%)
	총계	2,000	100%	0	0%
1	중국	2,000	100%	0	-

국내 보리 생산량은 전라도에서 전체 생산량의 81%가 생산되고 있으며, 경상도에서도 약 11%가 생산되고 있는 것으로 나타났다. 보리 생산량에는 겉보리, 쌀보리, 맥주보리 생산량이 모두 포함된 합계이다.

보리의 주요 수입국가는 호주(79%), EU(10%), 캐나다(7%) 등의 순이며, 전체 수입량의 약 96%를 차지하고 있다 (<표 3-39>).

<표 3-39> 국내 지역별 보리 생산량

(단위: 톤, %)

시도별	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
	보리 생산량*	보리 생산량	보리 생산량	보리 생산량	보리 생산량	보리 생산량	구성비 (%)
계	107,812	109,726	151,401	200,004	143,669	128,866	100%
전라남도	43,257	42,312	59,962	89,617	63,391	53,018	41%
전라북도	32,511	37,082	59,112	71,744	48,411	51,315	40%
경상남도	16,109	15,028	18,530	18,503	14,807	11,921	9%
제주도	6,767	7,714	5,797	9,006	7,894	6,130	5%
경상북도	4,584	4,182	4,111	5,220	5,050	2,228	2%
대구광역시	2,099	1,387	1,337	1,192	1,326	1,966	2%
광주광역시	275	42	880	2,461	1,230	668	1%
강원도	366	497	410	603	671	502	0%
충청북도	416	652	297	264	344	454	0%
경기도	711	225	111	219	174	259	0%
충청남도	582	533	832	1,021	325	224	0%
인천광역시	119	49	7	107	40	159	0%
부산광역시	-	12	2	45	4	21	0%
대전광역시	-	-	-	-	-	1	0%
울산광역시	13	12	1	-	3	-	0%
세종특별자치시	3	-	11	-	-	-	0%
서울특별시	-	-	-	-	-	-	0%

옥수수, 감자, 호밀, 보리 등은 1세대 바이오 feedstock으로 분류되며 식용 작물로 사용되고 있으므로 바이오에탄올 또는 바이오부탄올 생산을 위한 주원료로 사용 시 가격 상승에 직접적인 영향을 초래할 수 있다. 따라서, 상대적으로 공급 지속성을 확보하기 용이한 2세대 바이오매스(식물 및 목재 부산물, 곡물 발효 찌꺼기, 슬러지 등) feedstock을 주원료로 한 바이오에탄올 및 바이오부탄올 기술이 개발 중이다.

카사바는 고구마처럼 생긴 덩이뿌리 작물이며 다년생 식물로써 노지에서 재배할 수 있으며, 병해충에도 강한 것으로 알려져 있다. 앞서 기술한 바와 같이 국내에서는 일부 농가에서만 재배하고 있어 생산량이 적은 것으로 조사되었으며 통계자료는 존재하지 않는 것으로 나타났다. 2019년 카사바의 국내 적응성 검토 완료 후 조직배양 및 재배기술 체계를 구축 중인 것으로 조사되었다.<sup>48)</sup>

앞서 조사된 바이오에탄올 및 바이오부탄올 생산을 위한 주요 feedstock 별 국내 주요 생산지역 및 해외 주요 수입국가와 각 feedstock 생산 단계에 대한 탄소발자국 산정 시 필요한 LCI DB를 조사하였다(〈표 3-40〉).

<표 3-40> 바이오휘발유 feedstock 별 국내 주요 생산지역, 해외 주요 수입국가

주요 항목 (투입/산출물)	국내 주요 생산지	주요 수입국가
maize grain 옥수수 낱알	강원도, 충북, 경남, 전남, 경기도	아르헨티나, 미국, 브라질
potato 감자	강원도, 충남, 경북, 전남, 경기도, 전북	중국, 미국, 베트남
rye grain 호밀	전남, 전북, 경남, 광주광역시	캐나다
molasses, from sugar beet 사탕무당밀	전남, 전북, 경남, 제주도	중국
vinasse, from fermentation of sugar beet molasses 사탕무 당밀 발효찌꺼기		
sugar beet 사탕무		
vinasse, from fermentation of sugar beet 사탕무발효찌꺼기	국내	-
sweet sorghum stem 단수수	국내	중국
vinasse, from fermentation of sweet sorghum 단수수 발효찌꺼기	국내	해외 기타
cassava 카사바	국내	태국, 베트남
barley 보리	전남, 전북, 경남, 제주도	호주, EU, 캐나다
pampas grass 벼과의 여러 해 식물	국내	해외 기타
whey 유청	국내	해외 기타
corn 옥수수	강원도, 충북, 경남, 전남, 경기도	아르헨티나, 미국, 브라질
soybean oil 대두유	국내	아르헨티나, 미국, 베트남

48) 한국농정신문(<http://www.ikpnews.net>), “충북도, 아열대작물 ‘카사바’ 최적 재배법 확립” (2022.08.16)



## 2.5 바이오디젤

정부에서는 탄소 감축을 위해 자동차용 경유의 바이오디젤 의무혼합 비율을 '22년 3.5%까지 높였으며 2030년까지 5%까지 확대할 예정이다. 국내 바이오디젤 생산을 위한 feedstock으로는 폐식용유, 동물성 기름, 식물 원료(팜 부산물, 팜 정제유, 대두유) 등이다<sup>49)</sup>. 그중 식물 원료의 비중이 약 54%로 가장 높고, 폐식용유가 약 40%를 차지하고 있다. 식물 원료 중에서는 수입산 팜 부산물 수급이 가장 많았으며, 폐식용유 수급량의 경우 국내산이 수입산보다 약 7배 많은 것으로 나타났다. (<표 3-41> 참조)

<표 3-41> '16년 기준 국내 바이오디젤 feedstock 수급 현황

(단위: 천 톤)

구분	수급현황		
	국내산	수입산	비중(%)
폐식용유	151.6	23.5	39.9
동물성 유지	26	-	5.9
식물 원료	-	238	54.2
팜 부산물	-	208.6	87.7
팜 정제유		27.6	11.6
대두유		1.8	0.8
기타	2.6	3.1	2.4
총계	177.6	261.5	100

바이오디젤의 주원료(feedstock)에 대한 전문가 설문조사 결과에 따르면(<표 3-42>), 심층 문헌조사를 통해 포함시켰던 residual softwood, wood, straw, miscantus를 삭제하였고, 전문가 의견을 반영하여 kenaf, coconut oil 등 다수의 주원료를 추가하였다. 그러나, triglycerides, diglyceride, monoglyceride, lipid 등과 같이 중성지방 또는 중성지방이 분해된 형태의 물질 또는 지질을 사용한 바이오디젤 생산기술에 대한 연구가 있으나 바이오 feedstock으로 보기는 어려우므로 주원료에서는 제외하였다.

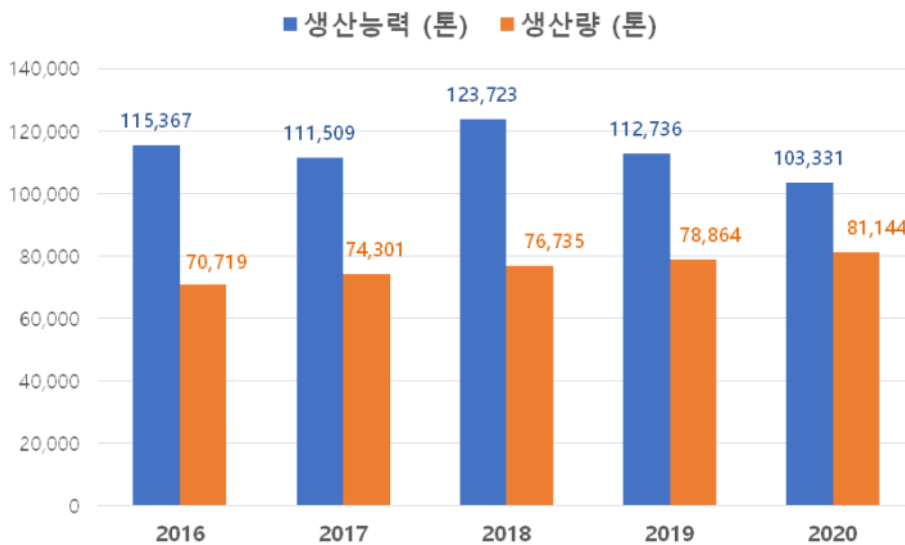
49) 국회입법조사처, "신·재생에너지 연료 혼합·의무화제도(RFS) 현황 및 개선과제 보고서"

<표 3-42> 바이오디젤 주원료 - 전문가 설문조사 결과

구분	주요 항목 (투입/산출물)
주원료 (Feed)	soybean oil, crude
	palm oil, crude
	rapeseed oil, crude
	cottonseed oil, crude
	tallow, unrefined
	used vegetable cooking oil, purified
	Palm Fatty Acid Distillate (PFAD)
	Microalgae derived oil
	Agricultural residues
	forest residues
	Kenaf
	rice bran oil
	coconut oil
	Rubber seed oil
	Trisperma Oil(Kemiri Sunan Oil)
Waste Fat and Oil	

바이오디젤의 주원료 중 팜유의 국내 생산량은 ‘20년까지 지속 증가 추세이며, 생산능력은 감소하고 있는 것으로 나타났다.<sup>50)</sup> 팜유의 전체 수입량도 ‘20년 대비 ‘21년 3.2% 증가하였으며, ‘21년을 기준으로 전체 수입량 중 인도네시아와 말레이시아로부터 각각 56%, 44%를 수입하였다.

[그림 3-11] 국내 팜유 생산 동향 (2016년~2020년)



50) 식품의약품안전처, 「식품및식품첨가물생산실적」 시군구 허가품목(식용유지류)

&lt;표 3-43&gt; 주요 국가별 팜유 수입량

(단위: kg, %)

순번	국가명	2020년		2021년	
		수입중량	구성비(%)	수입중량	구성비(%)
	총계	587,126,069	100%	605,700,742	100%
1	인도네시아	277,342,070	47%	341,802,034	56%
2	말레이시아	308,427,397	53%	263,638,136	44%
3	싱가포르	172,018	0%	115,200	0%
4	콜롬비아	121,600	0%	91,200	0%
5	영국	72,018	0%	45,506	0%
6	일본	3,602	0%	7,200	0%
7	미국	5,457	0%	860	0%
8	기니	210	0%	335	0%
9	프랑스	0	0%	180	0%
10	중국	142	0%	51	0%
11	베트남	3	0%	25	0%
12	태국	0	0%	7	0%
13	호주	0	0%	4	0%
14	나이지리아	0	0%	2	0%
15	방글라데시	0	0%	1	0%
16	네덜란드	0	0%	1	0%
17	홍콩	0	0%	0	0%
18	필리핀	0	0%	0	0%
19	파푸아 뉴기니	0	0%	0	0%
20	튀르키예	0	0%	0	0%

‘20년 이후 국제적으로 바이오디젤의 주원료인 팜유 가격이 급등하면서, 팜유 등 가격 변동성이 큰 feedstock 외의 유채 등과 같이 국내 재배가 가능한 feedstock에 관한 연구가 ‘07년부터 진행되었다<sup>51)</sup>.

연료용 유채(rape) 및 유채유(rape oil)의 국내 생산량에 대한 통계자료는 없으며, 재배 면적이나 재배량에 대하여는 국내 유채 재배 면적이 약 5,000ha에 이르지만 대부분 경관용인 것으로 나타났다. 최근 들어, 수입 식용유를 대체할 수 있는 친환경 국내 유채 기름에 관한 관심이 높아지면서 식용유 생산용 유채 재배 면적이 ‘21년 600ha에서 ‘22년 800ha로 확대되었다<sup>52)</sup>

농촌진흥청은 ‘22년 기준 국내산 유채의 안정적인 공급망을 확보하기 위해 전라남도 영암(150ha), 해남(300ha), 나주(50ha)에 식용유 생산용 유채 거점 재배단지를 조성해 우수

51) 에너지경제연구원(2007), “바이오연료의 보급전망과 사회적 비용편익 분석”

52) 한국농업신문(<http://www.newsfarm.co.kr>)

종자 공급 및 재배·수확·저장·가공 기술을 지원하고 있다. 이 재배단지에서는 연간 500톤<sup>53)</sup> 이상의 유채 씨앗이 생산되고 있다. ‘21에는 전남 해남에 하루 최대 20톤의 유채 씨앗을 착유할 수 있는 공장을 설립하여 유채 기름의 대량 생산 인프라가 구축되었다.

유채씨의 경우, 전체 수입량의 거의 전량(3,212톤, 98%)을 호주로부터 수입하고 있는 것으로 조사되었다(〈표 3-44〉). 유채유의 전체 수입량(164,750톤) 중 약 90% 이상이 캐나다로부터 수입되고 있으며, 호주로부터 약 7%가 수입되고 있다<sup>54)</sup>.

<표 3-44> 주요 국가별 유채씨 수입량

(단위: kg, %)

순번	국가명	2020년		2021년	
		수입중량	구성비(%)	수입중량	구성비(%)
	총계	2,246,028	100%	3,212,151	100%
1	호주	2,186,421	97%	3,154,110	98%
2	중국	40,810	2%	20,040	1%
3	프랑스	12,775	1%	20,000	1%
4	불가리아	5,000	0%	12,000	0%
5	이탈리아	1,000	0%	5,000	0%
6	독일	0	0%	1,001	0%
7	일본	0	0%	0	0%
8	스위스	0	0%	0	0%
9	벨기에	4	0%	0	0%
10	미국	8	0%	0	0%
11	몽골	0	0%	0	0%
12	덴마크	10	0%	0	0%
13	대만	0	0%	0	0%
14	네덜란드	0	0%	0	0%

국내 대두 생산량은 ‘21년 기준 총 11만 톤이며, 지역별 생산량 비중은 전북(21%), 경북(21%), 충남(13%), 전남(10%), 충북(9%) 등의 순이다<sup>55)</sup> (〈표 3-45〉).

53) 약 150톤의 유채 기름을 생산할 수 있는 분량

54) K-stat 통계 “품목수출입-유채유(rape oil, colza oil)”

55) 통계청, 「농작물생산조사」

&lt;표 3-45&gt; 국내 지역별 보리 생산량

(단위: 톤, %)

시도별	2017	2018	2019	2020	2021	
	생산량	생산량	생산량	생산량	생산량	구성비(%)
계	85,644	89,410	105,340	80,926	110,781	100%
전라북도	11,016	16,615	22,625	14,026	22,954	21%
경상북도	15,575	16,984	18,855	14,988	22,927	21%
충청남도	7,019	7,815	9,483	8,182	14,397	13%
전라남도	12,112	11,394	11,743	8,282	11,570	10%
충청북도	11,883	11,630	15,941	12,049	9,980	9%
강원도	6,217	7,366	8,891	7,602	8,947	8%
경기도	7,114	6,561	7,911	6,426	8,464	8%
제주도	6,759	5,217	3,933	3,830	5,592	5%
경상남도	6,700	4,677	4,633	4,473	4,541	4%
인천광역시	244	266	243	305	413	0%
세종특별자치시	208	150	355	233	241	0%
광주광역시	214	196	225	157	214	0%
울산광역시	190	196	181	164	190	0%
대전광역시	100	81	84	53	168	0%
대구광역시	237	190	174	100	126	0%
부산광역시	52	69	60	55	50	0%
서울특별시	4	2	2	2	6	0%

대두 총수입량은 '21년 기준 1,739톤이며, 주요 수입국은 중국(81%) 및 스페인(14%)이다.<sup>56)</sup> 대두유 및 그 분획물의 총수입량은 450,512톤이며, 그중 주요 수입국으로는 미국(45%), 아르헨티나(33%), 베트남(13%)이다. 그 외 벨기에(3%), 브라질(2%), 독일(2%)의 순으로 나타났다 (<표 3-46>).

56) K-stat 통계“품목수출입-기타 콩“

<표 3-46> 주요 국가별 대두 및 분획물 수입량

(단위: kg, %)

순번	국가명	2020년		2021년 (12월)	
		수입총량	구성비(%)	수입총량	구성비(%)
	총계	391,190,899	100%	450,512,364	100%
1	미국	352,158,143	90%	204,760,064	45%
2	아르헨티나	8,415,172	2%	149,678,747	33%
3	베트남	7,038,208	2%	56,966,645	13%
4	벨기에	19,660,854	5%	13,031,403	3%
5	브라질	0	0%	8,003,027	2%
6	독일	593,371	0%	7,419,218	2%
7	중국	584,014	0%	5,662,091	1%
8	러시아	536,872	0%	2,302,411	1%
9	태국	627,330	0%	1,118,018	0%
10	네덜란드	844,960	0%	609,591	0%
11	말레이시아	21,870	0%	504,546	0%
12	프랑스	146,155	0%	244,494	0%
13	대만	0	0%	103,029	0%
14	이집트	0	0%	82,262	0%
15	이탈리아	13,906	0%	18,985	0%
16	스페인	51,607	0%	6,024	0%
17	영국	61	0%	1,286	0%
18	일본	414	0%	451	0%
19	호주	23	0%	50	0%
20	인도(인디아)	0	0%	9	0%

현미유(미강유, rice bran oil)의 국내 총생산량은 ‘20년 기준 약 11만 톤이며, ‘16년부터 생산량에 큰 변동이 없는 것으로 나타났다. 현미유 국내 생산능력은 ‘16년 약 9만 톤에서 ‘20년 2.5만 톤으로 크게 감소하였다. 현미유 수입량 및 주요 수입국에 대한 통계자료는 없으며, 현미 수입량으로 대체 조사한 결과 ‘21년 기준 총수입량은 약 43만 톤이었다. 총수입량 구성비 기준으로 주요 수입국가는 중국(45%), 미국(29%), 베트남(12%)의 순이며, 그 외에도 태국(7%), 인도(5%), 호주(2%)의 순으로 조사되었다.

&lt;표 3-47&gt; 주요 국가별 현미 수입량

(단위: kg, %)

순번	국가명	2020년		2021년 (12월)	
		수입총량	구성비(%)	수입총량	구성비(%)
	총계	484,192,013	100%	433,805,971	100%
1	중국	205,556,000	42%	196,322,195	45%
2	미국	129,128,802	27%	126,530,460	29%
3	베트남	119,514,097	25%	51,360,118	12%
4	태국	29,993,051	6%	29,993,099	7%
5	인도(인디아)	1	0%	22,222,035	5%
6	호주	10	0%	7,378,016	2%
7	싱가포르	36	0%	24	0%
8	일본	0	0%	19	0%
9	말레이시아	2	0%	2	0%
10	이탈리아	0	0%	1	0%
11	불가리아	0	0%	1	0%
12	홍콩	0	0%	0	0%
13	필리핀	0	0%	0	0%
14	프랑스	0	0%	0	0%
15	폴란드	0	0%	0	0%
16	파키스탄	1	0%	0	0%
17	파라과이	0	0%	0	0%
18	쿠웨이트	0	0%	0	0%
19	코스타리카	1	0%	0	0%
20	캐나다	0	0%	0	0%

목화씨유(cotton seed oil)는 식용유지류에 대한 국내 생산량 통계자료가 존재하며, 연료용 목화씨유에 대한 자료는 없다. 목화씨유의 '21년 기준 총수입량은 250kg이었으며, 미국으로부터 전량을 수입하는 것으로 나타났다.<sup>57)</sup>

앞서 조사된 바이오디젤 생산을 위한 주요 feedstock 별 국내 주요 생산지역 및 해외 주요 수입국가를 <표 3-48>과 같이 요약 정리하였다.

57) K-stat 통계“품목수출입-목화씨유와 그 분획물“

<표 3-48> 바이오디젤 feedstock 별 국내 주요 생산지역 및 해외 주요 수입국가

주요 항목 (투입/산출물)	국내 주요 생산지	주요 수입국가
soybean oil	국내	아르헨티나, 미국, 베트남
palm oil, crude	국내	인도네시아, 말레이시아
rapeseed oil, crude	-	호주, 중국
cottonseed oil, crude	국내	미국
tallow, unrefined	국내	해외 기타
used vegetable cooking oil, purified	국내	-
Palm Fatty Acid Distillate (PFAD)	국내	-
Microalgae derived oil	별도 자료 없음	
Agricultural residues	국내	미국
forest residues	국내	-
Kenaf	국내	인도네시아
rice bran oil	국내	-
coconut oil	국내	필리핀
Rubber seed oil	별도 자료 없음	
Trisperma Oil(Kemiri Sunan Oil)		
Waste Fat and Oil		

## 2.6 바이오항공유

바이오항공유의 feedstock은 동물성지방, 식물성오일, 목질계, 해조류계 등 다양한 원료를 사용할 수 있으나, 우리나라의 경우 OTJ(Oil to Jet) 방식을 활용해 주로 팜오일이나 폐식용유를 원료로 사용할 것으로 예상된다.

바이오항공유의 주원료(feedstock)에 대한 전문가 설문조사 결과에 따르면(<표 3-49>), 심층 문헌조사를 통해 포함된 주원료보다 더 다양한 주원료가 현재 국내외에서 사용되고 있는 것으로 나타났다.

<표 3-49> 바이오휘발유 주원료 - 전문가 설문조사 결과

세부 구분	주요 항목 (투입/산출물)
주원료 (Feed)	poplar(bone dry)
	Jatropha(husk)
	Jatropha(fruit)
	Jatropha(seed)
	Castor(husk)
	Castor(fruit)
	Castor(seed)



세부 구분	주요 항목 (투입/산출물)
	camelina oil
	algae derived oil
	corn stover
	switchgrass
	soybean oil
	palm oil
	rapeseed oil
	Agricultural residues,
	forest residues
	Kenaf
	waste (cooking) oil
	oak wood
	Canola oil
	Sunflower oil
	Sawdust
	Sewage sludge
	Agricultural waste
	Recycled tyres
	End-of-life plastics
	Sugarcane
	Corn
	Corn grain
	Cassava
	Lignocellulose
	Triticale
	Miscanthus

카사바(cassava)는 바이오휘발유의 feedstock으로도 사용되고 있으며, 앞 장의 바이오휘발유 feedstock에서 기술한 것과 같이 국내 생산량에 대한 통계자료는 없는 실정이다. 카사바 수입량에 대한 통계를 살펴보면, 카사바 신선·건조와 카사바 전분, 타피오카 및 대용품으로 만든 조제 식료품으로 구분되어 수입량이 집계된다.

카사바 신선·건조는 카사바 칩, 카사바 펠릿 등의 형태로 교역되는데, 카사바 칩이 에탄올 제조용으로 사용된다. 따라서, 카사바 신선/건조와 함께 카사바 칩의 수입량 및 주요 수입국도 조사에 포함하였다.

카사바 신선·건조의 수입량은 식료품 수요 증가에 따라 '21년 기준 215톤이며 '20년 수입량 198톤 대비 8.4% 증가하였다. 태국과 베트남으로부터 전량 수입되고 있으며, 각 국가별 수입량 구성비는 태국 56%, 베트남 44%이다 (<표 3-50>).

카사바 신선·건조를 사용한 카사바 전분, 타피오카 및 대용품 등의 조제 식료품에 대한 국내 수요 증가를 고려할 때, 수입된 카사바 신선·건조로부터의 카사바칩 국내 생산 가능성을 고려하여 카사바 신선·건조 수입국인 태국과 베트남 모두 주요 수입으로 포함하였다.

<표 3-50> 주요 국가별 카사바 신선·건조 수입량

(단위: kg, %)

순번	국가명	2020년		2021년 (12월)	
		수입중량	구성비(%)	수입중량	구성비(%)
	총계	198,414,541	100%	215,019,267	100%
1	태국	101,013,400	51%	120,453,947	56%
2	베트남	97,400,278	49%	94,561,990	44%
3	필리핀	826	0%	3,273	0%
4	인도네시아	15	0%	25	0%
5	영국	0	0%	18	0%
6	콜롬비아	0	0%	11	0%
7	미국	2	0%	3	0%
8	중국	0	0%	1	0%
9	탄자니아	1	0%	0	0%
10	캐나다	0	0%	0	0%
11	카메룬	18	0%	0	0%
12	인도(인디아)	0	0%	0	0%
13	브라질	1	0%	0	0%
14	니카라과	0	0%	0	0%
15	뉴질랜드	0	0%	0	0%
16	괌	0	0%	0	0%

'21년 기준 카사바칩의 총수입량은 약 9만 4천 톤이며, 전량 베트남으로부터 수입되고 있다 (<표 3-51>).

<표 3-51> 주요 국가별 카사바칩 수입량

(단위: kg, %)

순번	국가명	2020년		2021년 (12월)	
		수입중량	구성비(%)	수입중량	구성비(%)
	총계	97,340,395	100%	94,453,867	100%
1	베트남	97,340,394	100%	94,453,849	100%
2	영국	0	0%	18	0%
3	미국	0	0%	1	0%
4	캐나다	0	0%	0	0%
5	뉴질랜드	0	0%	0	0%

해바라기씨유(sunflower seed oil)는 식용유에 대한 국내 생산량 통계가 있으며, 연료용 국내 생산량 자료는 존재하지 않는다. “해바라기씨유와 그 분획물”의 주요 수입국가별 수입량 데이터 조사 결과, '21년 기준 총수입량 76톤 중 97%가 스페인으로부터 수입되고 있는 것으로 나타났다.

&lt;표 3-52&gt; 주요 국가별 해바라기씨유 수입량

(단위: kg, %)

순번	국가명	2020년		2021년 (12월)	
		수입총량	구성비(%)	수입총량	구성비(%)
	총계	33,017	100%	75,987	100%
1	스페인	32,259	98%	73,735	97%
2	이탈리아	734	2%	1,550	2%
3	인도(인디아)	3	0%	650	1%
4	베트남	0	0%	34	0%
5	미국	0	0%	12	0%
6	중국	0	0%	3	0%
7	태국	0	0%	2	0%
8	포르투갈	12	0%	0	0%
9	튀르키예	0	0%	0	0%
10	캐나다	0	0%	0	0%
11	일본	0	0%	0	0%
12	우크라이나	9	0%	0	0%
13	싱가포르	0	0%	0	0%
14	대만	0	0%	0	0%

옥수수껍질(corn stover)의 경우, 국내 생산량과 해외 주요 수입국가별 수입량 자료는 존재하지 않는다. 국내 옥수수 생산량 통계자료가 존재하므로 추후 국내 옥수수 생산량 대비 옥수수 껍질(부산물) 생산량을 추정하여 바이오에너지 탄소발자국 시뮬레이터 내의 feedstock으로 포함시키는 것을 고려할 수 있다.

바이오항공유의 feedstock 사용되는 대두유(soybean oil)와 팜오일(palm oil)은 바이오디젤의 feedstock으로도 사용되고 있으며, 사탕무(sugarbeet)는 바이오휘발유의 feedstock으로도 사용되므로 국내 생산량과 주요 수입국가별 수입량은 앞절의 조사내용을 참조하도록 한다.

하수슬러지는 국내 생산량과 해외 주요 수입국가별 수입량 자료는 존재하지 않지만, 국내 생산 슬러지를 feedstock으로 사용하는 경우를 가정하여, 바이오에너지 탄소발자국 시뮬레이터 내의 feedstock으로 포함하였다.

앞서 조사된 바이오항공유 생산을 위한 주요 feedstock 별 국내 주요 생산지역 및 해외 주요 수입국가를 <표 3-53>과 같이 요약 정리하였다.

<표 3-53> 바이오항공유 feedstock 별 국내 주요 생산지역 및 해외 주요 수입국가

주요 항목 (투입/산출물)	국내 주요 생산지역	주요 수입국가
Poplar(bone dry)	국내	해외 기타
Jatropha(husk)	-	해외 기타
Jatropha(fruit)		
Jatropha(seed)		
Castor(husk)	-	해외 기타
Castor(fruit)		
Castor(seed)		
Camelina oil	별도 자료 없음	
Algae derived oil		
Corn stover	강원도, 충북, 경남, 전남, 경기도	-
Switchgrass	별도 자료 없음	
Soybean oil	국내	아르헨티나, 미국, 베트남
Palm oil	국내	인도네시아, 말레이시아
Rapeseed oil	-	호주, 중국
Agricultural residues	국내 가정	해외 기타 가정
Forest residues	국내 가정	해외 기타 가정
Kenaf	국내	인도네시아
Waste (cooking) oil	국내 가정	-
Oak wood	국내 가정	-
Canola oil	-	호주, 중국
Sunflower oil	국내	스페인
Sawdust	국내	-
Sewage sludge	국내	-
Agricultural waste	국내 가정	해외 기타 가정
Recycled tyres	별도 자료 없음	
End-of-life plastics		
Sugarcane	국내	인도네시아
corn	국내	미국, 해외 기타
Corn grain	강원도, 충북, 경남, 전남, 경기도	아르헨티나, 미국, 브라질
Cassava	국내	태국, 베트남
Triticale	별도 자료 없음	
Miscanthus	국내	해외 기타 가정

### 3. 바이오에너지 생산공정 투입/산출물별 LCI DB 수집 및 연계

바이오에너지 생산공정에 대한 LCI DB 수집 시 LCI DB가 존재하는 투입물/산출물을 중심으로 선별하여 프로토타입 시뮬레이터에 우선 적용 및 구축하는 것을 목표로 하였다.

#### 3.1 주원료 및 운송

바이오 기술 전문가 설문조사 결과 도출된 Feedstock의 종류는 총 76개이며, 각 feedstock에 대해 적용 가능한 LCI DB 존재 여부 조사 결과와 국내 생산 및 해외 수입 동향을 분석하였다. 분석 결과에 따른 시뮬레이터에 주원료로 포함 가능 여부 및 판단 기준을 <표 3-54>에 명시하였다.

‘제외’의 경우, 매칭되거나 유사한 LCI DB 존재하지 않으므로, “feedstock 생산 LCI DB”를 구축하기 위해 심층 문헌조사가 필요한 feedstock에 해당한다. 또한, 이 feedstock은 국내 생산량 및 해외 수입량 조사 결과를 고려하였을 때 추후 국내 생산 가능성이 낮을 것으로 판단된다. 본 시뮬레이터에서 제외된 feedstock(7개 종류)의 경우 2차년도 연구 수행으로 시뮬레이터 고도화 시 반영하고자 한다.

<표 3-54> 바이오 기술 전문가 설문조사 결과 Feedstock 리스트 및 시뮬레이터 포함 여부

Feedstock 명	포함 여부 (포함/제외)	비고
Agricultural residues	포함	■ 국내 생산 적용, 단 경작과정에서의 탄소배출량은 “0”
Agricultural waste	포함	■ 국내 생산 적용, 단 경작과정에서의 탄소배출량은 “0”
Algae derived oil	제외	■ LCI DB 존재하지 않음 / feedstock 생산 GtG 데이터 심층 문헌조사 필요
Bagasse	포함	■ 국내 생산 적용/ 해외 수입(브라질) 적용
barley	포함	■ 국내 생산 적용/ 해외 수입(호주, EU, 캐나다) 적용
Brown grease	포함	■ 음식물 폐기물에서 발생하며, 폐식용유와 함께 바이오 디젤 feedstock으로 사용되며, 국내 생산 적용 ■ 해당 LCI DB가 존재하지 않으므로, 폐식용유(used cooking oil)로 대체
Camelina oil	제외	■ LCI DB 존재하지 않음 ■ 국내 생산 또는 해외 수입 가능성 불확실 ■ feedstock 생산 GtG 데이터 심층 문헌조사 필요
Canola oil	포함	■ Rapeseed oil과 동의어므로 동일한 DB 적용
Cassava	포함	■ 국내 생산, 해외 수입(태국, 베트남) 모두 적용 ■ Cassava에 대한 LCI DB는 Agribalyse DB에 있으나, 재배공정에 대한 GtG데이터이며 LCI DB는 없음 ■ Cassava는 감자 전분과 같이 글루텐 프리이며, 대체

Feedstock 명	포함 여부 (포함/제외)	비고
		가능하므로 potato starch LCI DB로 대체
Castor	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 해외 수입(GLO) 적용</li> <li>■ castor bean으로 대체 적용</li> </ul>
coconut oil	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산, 해외 수입(필리핀) 모두 적용</li> </ul>
Coffee waste (coffee ground)	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산 적용, 단 경작과정에서의 탄소배출량은 “0”</li> </ul>
corn	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산, 해외 수입(아르헨티나, 미국, 브라질) 모두 적용</li> </ul>
Corn grain	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산, 해외 수입(아르헨티나, 미국, 브라질) 모두 적용</li> </ul>
Corn stover	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산 적용</li> </ul>
cottonseed oil, crude	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산, 해외 수입(미국) 모두 적용</li> </ul>
End-of-life plastics	제외	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 석유기반 화학공정으로 제조된 폐플라스틱을 재활용하는 것에 해당하므로 feedstock이라고 보기 어려움</li> </ul>
food waste	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산 적용, 단 생산과정에서의 탄소배출량은 “0”</li> </ul>
Forest residues	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산, 해외 수입(기타) 모두 적용</li> <li>■ 단, 생산과정에서의 탄소배출량은 “0”</li> </ul>
Jatropha	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 해외 수입(GLO) 적용</li> <li>■ Jatropha seed로 대체 적용</li> </ul>
Kenaf	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산, 해외 수입(인도네시아) 모두 적용</li> </ul>
livestock manure	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산 적용, 단 생산과정에서의 탄소배출량은 “0”</li> </ul>
maize grain	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산, 해외 수입(아르헨티나, 미국, 브라질) 모두 적용</li> </ul>
Microalgae derived oil	제외	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ LCI DB 존재하지 않음 / feedstock 생산 GtG 데이터 심층 문헌조사 필요</li> </ul>
Miscanthus	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산, 해외 수입(RoW) 모두 적용</li> </ul>
molasses, from sugar beet	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산, 해외 수입(기타) 모두 적용</li> </ul>
Oak wood	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산 적용</li> <li>■ 활엽수에 해당하므로, 활엽수(Hardwood)로 대체</li> </ul>
Palm Fatty Acid Distillate (PFAD)	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산 적용</li> </ul>
Palm oil	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산, 해외 수입(인도네시아, 말레이시아) 모두 적용</li> </ul>
pampas grass	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 남미 지역에서 재배되는 서양억새과 식물이며, 해당 LCI DB가 존재하지 않음</li> <li>■ miscanthus(억새)와 같은 종이므로 대체</li> </ul>
Poplar(bone dry)	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Poplar가 잡목, 잡풀에 해당하므로 willow로 대체하여 포함</li> <li>■ 잡목, 잡풀과에 해당하므로 수입되지 않고 국내 생산 되는 것으로 가정함</li> </ul>
potato	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산, 해외 수입(중국, 미국, 베트남) 모두 적용</li> </ul>
Rapeseed oil	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산, 해외 수입(호주, 중국) 적용</li> </ul>
Recycled tyres	제외	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 석유기반 화학공정으로 제조된 타이어제품을 재활용하는 것에 해당하므로 feedstock이라고 보기 어려움</li> </ul>

Feedstock 명	포함 여부 (포함/제외)	비고
rice bran oil	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산, 해외 수입(기타) 모두 적용</li> <li>■ rice bran에 대한 LCI DB가 존재하지 않아 Wheat bran으로 대체하여 포함</li> </ul>
Rubber seed oil	제외	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ LCI DB 존재하지 않음 / feedstock 생산 GtG 데이터 심층 문헌조사 필요</li> </ul>
rye grain	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산, 해외 수입(기타) 모두 적용</li> </ul>
Sawdust	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산 적용, 단 생산과정에서의 탄소배출량은 “0”</li> </ul>
Sewage sludge	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산 적용, 단 생산과정에서의 탄소배출량은 “0”</li> </ul>
Shavings, hardwood 목재 대패톱밥, 침엽수	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산 적용, 단 생산과정에서의 탄소배출량은 “0”</li> </ul>
Shavings, hardwood 목재 대패톱밥, 활엽수	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산 적용, 단 생산과정에서의 탄소배출량은 “0”</li> </ul>
short rotation coppice (Eucalyptus)	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산 적용</li> </ul>
short rotation coppice (Poplar - Fertilised)	포함	
short rotation coppice (Poplar - no fertilisation)	포함	
silage 건초(짚)	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ silage의 종류가 매우 다양함.</li> <li>■ corn(maize) silage와 alfalfa/grass silage 모두 적용</li> <li>■ 국내 생산, 해외 수입(기타) 모두 적용</li> <li>■ 한국은 미국으로부터 건초수입량이 알팔파 제외 시 2위, 알팔파만은 3위 수입국</li> </ul>
Silver grass (Geodae Oeksae)	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산, 해외 수입(기타) 모두 적용</li> <li>■ Silvergrass(억새)와 같은 종이므로 Miscanthus로 대체 적용</li> </ul>
Softwood 침엽수	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산 적용</li> </ul>
soybean oil	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산, 해외 수입(아르헨티나, 미국, 베트남) 적용</li> </ul>
stem wood	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산 적용</li> <li>■ Hard wood에 birch, stem wood 등이 포함되므로 hard wood로 대체</li> </ul>
Straw	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산 적용, 단 생산과정에서의 탄소배출량은 “0”</li> </ul>
sugar beet	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산, 해외 수입(중국) 모두 적용</li> </ul>
Sugarcane	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산, 해외 수입(인도네시아) 모두 적용</li> </ul>
Sunflower oil	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산, 해외 수입(스페인) 모두 적용</li> <li>■ Sunflower seed를 대체 적용</li> </ul>
sweet sorghum stem	포함	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 국내 생산, 해외 수입(중국) 모두 적용</li> </ul>

Feedstock 명	포함 여부 (포함/제외)	비고
Switchgrass	제외	■ LCI DB 존재하지 않음 / feedstock 생산 GtG 데이터 심층 문헌조사 필요
tallow, unrefined	포함	■ 국내 생산, 해외 수입(기타) 모두 적용
Trisperma Oil(Kemiri Sunan Oil)	제외	■ LCI DB 존재하지 않음 / feedstock 생산 GtG 데이터 심층 문헌조사 필요
Triticale	제외	■ LCI DB 존재하지 않음 / feedstock 생산 GtG 데이터 심층 문헌조사 필요
used vegetable cooking oil, purified	포함	■ 국내 생산 적용
vinasse, from fermentation of sugar beet	포함	■ 국내 생산, 해외 수입(기타) 모두 적용
vinasse, from fermentation of sugar beet molasses	포함	■ 국내 생산, 해외 수입(기타) 모두 적용
vinasse, from fermentation of sweet sorghum	포함	■ 국내 생산, 해외 수입(기타) 모두 적용
Waste (cooking) oil	포함	■ 국내 생산 적용 ■ used vegetable cooking oil 적용 시 생산과정의 탄소배출량은 “0”, 추가 공정 필요시 purified 대체 적용
Waste Fat and Oil	포함	■ 국내 생산 적용, 단 생산과정에서의 탄소배출량은 “0”
whey	포함	■ 국내 생산, 해외 수입(기타) 모두 적용
Wood chips	포함	■ 국내 생산 적용
wood industry residues	포함	■ 국내 생산 적용, 단 생산과정에서의 탄소배출량은 “0”
woody residue	포함	■ 국내 생산 적용, 단 생산과정에서의 탄소배출량은 “0”
woody sawdust	포함	■ 국내 생산 적용, 단 생산과정에서의 탄소배출량은 “0”
대나무	포함	■ 국내 생산, 해외 수입(중국) 모두 적용
대나무 또는 분쇄한 것	포함	■ 국내 생산, 해외 수입(중국) 모두 적용 ■ 단, 생산과정에서의 탄소배출량은 “0”
바이오디젤 부산물 (byproducts from biodiesel plants)	포함	■ 부산물 종류가 특정되지 않아 feedstock 명칭으로 볼 수 없으며, 검색 어려움으로 PFAD로 대체
침엽수 또는 분쇄한 것	포함	■ 국내 생산 적용, 단 생산과정에서의 탄소배출량은 “0”
하수슬러지 유래 오일 (sewage sludge oil)	포함	■ 국내 생산 적용 ■ 해당 LCI DB가 존재하지 않으므로, 폐식용유(used cooking oil)로 대체
활엽수 (Hardwood)	포함	■ 국내 생산 적용
활엽수 또는 분쇄한 것	포함	■ 국내 생산 적용, 단 생산과정에서의 탄소배출량은 “0”



국가별 feedstock 생산에 대하여 존재하는 LCI DB 조사를 바탕으로 “production of feedstock 명” 이 있는 LCI DB를 우선적으로 사용하되, 없는 경우 “market for feedstock 명” 으로 대체 적용하였다.

사용이 확정된 feedstock 별 LCI DB 리스트는 <표 3-55>과 같다. feedstock 국내 생산 및 해외 수입량 조사 분석 결과를 반영하여 국내 생산량이 있으나 LCI DB가 존재하지 않는 feedstock의 경우, 조사된 RoW(Rest of the World) 또는 GLO(Global) LCI DB를 활용하여 국내화 하였다. LCI DB 국내화 시 타 국가의 주원료 생산에 대한 투입/산출량(기술데이터)은 그대로 쓰고 유틸리티(예: 전기 생산 등)의 경우 국내화하였다. 각 주원료 생산에 대한 국내(KR) LCI DB가 대부분 존재하지 않으므로 “세계(GLO 또는 RoW)” 에 해당하는 DB를 사용하여 국내화하였다. 국내화된 feedstock LCI DB는 “DB명, - LCI, kr (modified)” 로 명시하였다.

<표 3-55> feedstock 별 적용된 LCI DB명

feedstock	DB 명
(중국) bamboo(대나무)	market for bamboo culm   bamboo culm   Cutoff, S, CN
(아르헨티나) maize grain(옥수수 낱알)	maize grain production   maize grain   Cutoff, S, AR
(미국) maize grain(옥수수 낱알)	maize grain production   maize grain   Cutoff, S, US
(브라질) maize grain(옥수수 낱알)	market for maize grain   maize grain   Cutoff, S, BR
(중국) potato(감자)	potato production   potato   Cutoff, S, CN
(미국) potato(감자)	potato production   potato   Cutoff, S, US
(해외 기타) potato(감자)	potato production   potato   Cutoff, S, RoW
(해외 기타) rye grain(호밀)	market for rye grain   rye grain   Cutoff, S, GLO
(해외 기타) molasses, from sugar beet(사탕무 당밀)	market for molasses, from sugar beet   molasses, from sugar beet   Cutoff, S, GLO
(해외 기타) vinasse, from fermentation of sugar beet molasses(사탕무 발효 찌꺼기)	market for vinasse, from fermentation of sugar beet molasses   vinasse, from fermentation of sugar beet molasses   Cutoff, S, GLO
(해외 기타) sugar beet(사탕무)	sugar beet production   sugar beet   Cutoff, S, RoW
(해외 기타) barley(보리)	barley production   barley grain   Cutoff, S, RoW
(캐나다) barley(보리)	barley production   barley grain   Cutoff, S, CA-QC
(해외 기타) corn(옥수수)	sweet corn production   sweet corn   Cutoff, S, RoW
(미국) corn(옥수수)	sweet corn production   sweet corn   Cutoff, S, US
(해외 기타) soybean oil(대두유)	soybean meal and crude oil production   soybean oil, crude   Cutoff, S, RoW
(해외 기타) soybean oil(콩기름)	soybean meal and crude oil production   soybean oil, crude   Cutoff, S, RoW
(해외 기타) palm oil(팜유)	market for palm oil, crude   palm oil, crude   Cutoff, S, GLO
(해외 기타) rape oil(유채유)	market for rape oil, crude   rape oil, crude   Cutoff, S, RoW

feedstock	DB 명
(해외 기타) cottonseed oil(면실유)	market for cottonseed oil, crude   cottonseed oil, crude   Cutoff, S, GLO
(아르헨티나) Corn grain(옥수수 낱알)	maize grain production   maize grain   Cutoff, S, AR
(미국) Corn grain(옥수수 낱알)	maize grain production   maize grain   Cutoff, S, US
(브라질) Corn grain(옥수수 낱알)	market for maize grain   maize grain   Cutoff, S, BR
(국내) barley(보리)	barley production   barley grain   Cutoff, U (copy) - LCI, kr (modified)
(국내) Palm Fatty Acid Distillate (PFAD, 팜지방산 디스틸레이트)	fatty acid production, from palm oil   fatty acid   Cutoff, U (copy) - LCI, kr (modified)
(국내) maize grain(옥수수 낱알)	maize grain production   maize grain   Cutoff, U (copy) - LCI, kr (modified)
(국내) molasses, from sugar beet(사탕무 당밀)	beet sugar production   molasses, from sugar beet   Cutoff, U (copy) - LCI, kr (modified)
(국내) palm oil(팜유)	palm oil mill operation   palm oil, crude   Cutoff, U (copy) - LCI, kr (modified)
(국내) rye grain(호밀)	rye production   rye grain   Cutoff, U (copy) - LCI, kr (modified)
(국내) Corn stover(옥수수대)	maize grain processing, dry milling   energy feed, gross   Cutoff, U (copy) - LCI, kr (modified)
(국내) vinasse, from fermentation of sugar beet molasses(사탕무 발효 찌꺼기)	vinasse, from fermentation of sugar beet molasses, Recycled Content cut-off   vinasse, from fermentation of sugar beet molasses   Cutoff, S (copy), kr (modified)
(국내) potato(감자)	potato production   potato   Cutoff, U (copy) - LCI, kr (modified)
(국내) hardwood(활엽수 또는 분쇄한 것)	sawing, hardwood   sawdust, loose, wet, measured as dry mass   Cutoff, U (copy) - LCI, kr (modified)
(국내) softwood(침엽수 또는 분쇄한 것)	sawing, softwood   sawdust, loose, wet, measured as dry mass   Cutoff, U (copy) - LCI, kr (modified)
(국내) corn(옥수수)	sweet corn production   sweet corn   Cutoff, U (copy) - LCI, kr (modified)
(국내) cottonseed oil(면실유)	cottonseed oil mill operation   cottonseed oil, crude   Cutoff, U (copy) - LCI, kr (modified)
(국내) used vegetable cooking oil(폐식용유)	used vegetable cooking oil, purified, Recycled Content cut-off   used vegetable cooking oil, purified   Cutoff, S, kr (modified)
(국내) Sugarbeet(사탕무)	sugar beet production   sugar beet   Cutoff, U (copy) - LCI, kr (modified)

Feedstock 생산에 따른 탄소발자국 계산을 위해 feedstock 생산 LCI DB로부터 GWP 관련 인벤토리만 시뮬레이터에 연계하여 Feedstock 생산과정에서 발생하는 탄소발자국 산정에 연계되도록 개발하였다. Feedstock 생산에 따른 탄소발자국 산정 시 앞 장에서 서술한 바와 같이, EU 신재생에너지 지침에 따라 임업 부산물, 농업부산물, 음식물폐유, 가축분뇨 등의 경우 생산과정 및 Land use change에 따른 온실가스는 발생하지 않는 것(‘0’)으로 정의하여 탄소발자국 산정에 적용되도록 하였다.

본 연구의 시스템경계에 따라 해외로부터 수입되는 feedstock의 생산국과 도착 국가(국내) 간의 수송(국가 간 해상운송)에 따른 탄소발자국이 포함되어야 하므로, 수송 거리에 대한 정보를 조사하였다. 환경성적표지 작성지침<sup>58)</sup>에서 제시하고 있는 “표준항해거리표”를 활용하였으며(<표 3-56>), 거리정보가 없는 국가들에 대해서는 해상거리측정사이트<sup>59)</sup>를 활용하여 시뮬레이터에 반영하였다.

<표 3-56> 환경성적지침 부속서 3-표준항해거리표

항해			
구간	거리(km)	구간	거리(km)
한국(부산)-미국(LA)	9,866	한국(인천)-미국(LA)	10,411
한국(부산)-미국(뉴욕)	18,904	한국(인천)-미국(뉴욕)	19,477
한국(부산)-캐나다(벤쿠버)	8,805	한국(인천)-캐나다(벤쿠버)	9,490
한국(부산)-브라질(리우데자네이루)	22,171	한국(인천)-브라질(리우데자네이루)	53,292
한국(부산)-러시아(블라디보스토크)	946	한국(인천)-러시아(블라디보스토크)	1,679
한국(부산)-네덜란드(로테르담)	20,023	한국(인천)-네덜란드(로테르담)	20,118
한국(부산)-벨기에(안트워프)	20,031	한국(인천)-벨기에(안트워프)	20,292
한국(부산)-독일(함부르크)	20,496	한국(인천)-독일(함부르크)	20,590
한국(부산)-일본(요코하마)	1,242	한국(인천)-일본(요코하마)	1,902
한국(부산)-중국(상하이)	913	한국(인천)-중국(상하이)	937
한국(부산)-타이완(가오슝)	1,704	한국(인천)-타이완(가오슝)	1,814
한국(부산)-홍콩	2,120	한국(인천)-홍콩	2,216
한국(부산)-싱가폴	4,656	한국(인천)-싱가폴	4,755
한국(부산)-인도(뭄바이)	9,193	한국(인천)-인도(뭄바이)	9,287
한국(부산)-호주(시드니)	8,574	한국(인천)-호주(시드니)	9,226
한국(부산)-뉴질랜드(웰링턴)	9,789	한국(인천)-뉴질랜드(웰링턴)	10,430
한국(부산)-남아프리카공화국(케이프타운)	15,045	한국(인천)-남아프리카공화국(케이프타운)	15,177
한국(부산)-터키(이스탄불)	15,425	한국(인천)-터키(이스탄불)	15,519
한국(부산)-베트남(하이퐁)	2,987	한국(인천)-베트남(하이퐁)	3,083
한국(부산)-인도네시아(수라바야)	5,372	한국(인천)-인도네시아(수라바야)	5,483
한국(부산)-한국(제주)	314	한국(포항)-한국(제주)	451
한국(인천)-한국(제주)	488	한국(삼척)-한국(제주)	588
한국(진해)-한국(제주)	301	한국(속초)-한국(제주)	688
한국(마산)-한국(제주)	309	한국(울산)-한국(제주)	362
한국(목포)-한국(제주)	177	한국(여수)-한국(제주)	200

출처 : 환경부, 환경성적표지 작성지침(부속서 3)

58) 환경부, 환경성적표지 작성지침(부속서 3), “표준항해거리표”

59) <https://sea-distances.org/>

국내 생산되는 Feedstock의 경우 최대한 보수적으로 산정하기 위하여 모든 국내에서 생산되는 모든 Feedstock은 환경성적표지 작성지침의 최대 수송 거리로 정의하였다.

<표 3-57> 환경성적지침 부속서 3-권역별 수송 거리

도착 출발	수도권 (서울)	강원도 (원주)	충청북도 (청주)	충청남도 (대전)	전라북도 (전주)	전라남도 (광주)	경상북도 (대구)	경상남도 (부산)
수도권 (서울)	30	125	138	161	212	296	288	395
강원도 (원주)	125	30	133	167	246	330	218	326
충청북도 (청주)	138	133	30	46	125	209	167	274
충청남도 (대전)	161	167	46	30	84	168	153	260
전라북도 (전주)	212	246	125	84	30	99	190	254
전라남도 (광주)	296	330	209	168	99	30	217	263
경상북도 (대구)	288	218	167	153	190	217	30	107
경상남도 (부산)	395	326	274	260	254	263	107	30

출처 : 환경부, 환경성적표지 작성지침(부속서 3)

### 3.2 부원료

전문가 설문조사 결과로 도출된 부원료의 종류는 총 62개로 취합되었으며, 각 부원료별 생산 관련 LCI DB 존재 여부를 조사 결과 시뮬레이터에 적용된 부원료는 총 39개이다. 각 부원료에 대해 적용 가능한 LCI DB 존재 여부를 기준으로 시뮬레이터 내의 부원료 리스트에 포함 여부를 분석하였다. 분석 결과에 따른 부원료로 포함 가능 여부 및 판단 기준은 <표3-58>과 같다. 본 시뮬레이터에서 제외된 부원료(23개)의 경우 2차년도 연구 수행으로 시뮬레이터 고도화 시 반영하고자 한다.

부원료의 경우, 제조국가와 판매업체가 위치한 국가의 위치가 다른 경우가 많으며, 판매업체의 위치 조사는 실제로 많은 시간이 소요되고 조사 결과의 정확성도 떨어질 수 있다. 따라서, 부원료에 대한 LCI DB는 생산된 부원료의 유통단계에 따른 탄소발자국까지 포함되어 있는 ‘market for 부원료명’ LCI DB를 사용하였다. LCI DB의 지역명은 “세계(GLO 또는 RoW)”에 해당하는 DB를 사용하였다.

&lt;표 3-58&gt; 바이오 기술 전문가 설문조사 결과 부원료 리스트 및 시뮬레이터 포함 여부

물질명	포함여부 (포함/제외)	비고
HFO(heavy fuel oil)	포함	-
Magnesium Oxide (MgO)	포함	-
Olivine	제외	LCI DB 존재하지 않음 (유사 또는 대체가능 LCI 없음)
Tar Reformer Catalyst	제외	LCI DB 존재하지 않음
Zinc Oxide (ZnO) Catalyst	포함	-
FT Synthesis Catalyst (Co based)	제외	LCI DB 존재하지 않음 (유사 또는 대체가능 LCI 없음)
Hydrotreating Catalyst (sulfided CoMo or NiMo)	제외	LCI DB 존재하지 않음 (유사 또는 대체가능 LCI 없음)
LO-CAT Chemicals (킬레이트화 철 용액)	제외	LCI DB 존재하지 않음 (유사 또는 대체가능 LCI 없음)
Amine Make-Up	제외	LCI DB 존재하지 않음 (CAS number 특정 필요)
Ethanol	포함	ethanol, without water, in 99.7% solution state
Methanol	포함	-
Deoxidation catalyst (ex. MgNiMo)	제외	LCI DB 존재하지 않음
Phosphoric acid	포함	phosphoric acid, without water, in 70% solution state
Phosphoric acid	포함	phosphoric_acid, without_water,in_85% solution_state
Citric Acid	포함	-
Sodium Hydroxide	포함	-
Bleaching Earth	제외	LCI DB 존재하지 않음 (CAS number 특정 필요)
Filter aid	제외	LCI DB 존재하지 않음 (CAS number 특정 필요)
Hydrogen	포함	Hydrogen 액상
Hydrogen	포함	Hydrogen 기체
Lubricating oil	포함	-
Hydrochloric acid	포함	-
Potassium hydroxide	포함	-
Sodium methoxide	포함	-
Ferric hydroxide	제외	LCI DB 존재하지 않음
Filter ceramic	제외	LCI DB 존재하지 않음
Platinum based catalyst	포함	축매에 포함된 금속명의 LCI DB 적용
Palladium based catalyst	포함	축매에 포함된 금속명의 LCI DB 적용
Ruthenium based catalyst	제외	LCI DB 존재하지 않음

물질명	포함여부 (포함/제외)	비고
Iron based catalyst	제외	LCI DB 존재하지 않음
Sulfuric Acid	포함	-
고체 산촉매 (Solid Acid Catalyst)	제외	LCI DB 존재하지 않음 (CAS number 특정 필요)
Ammonium sulfate	포함	-
Soda ash, light, crystalline, heptahydrate	포함	-
Inorganic nitrogen fertiliser, as N	포함	-
Sodium phosphate	포함	-
Sodium sulfate, anhydrite	포함	-
Ammonia, anhydrous, liquid	포함	-
Sodium chloride, powder	포함	-
Chlorine, liquid	포함	-
Calcium hydroxide	제외	LCI DB 존재하지 않음
Magnesium sulfate	포함	-
Enzyme	포함	-
Alpha amylase	제외	LCI DB 존재하지 않음
Glucosyl amylase	제외	LCI DB 존재하지 않음
Cellulase	제외	LCI DB 존재하지 않음
Yeast	포함	-
CSL(Corn Steep Liquor)	제외	LCI DB 존재하지 않음
Potassium phosphate	제외	LCI DB 존재하지 않음
Ferrous sulfate	포함	-
Acetic acid	포함	-
Sodium acetate	제외	LCI DB 존재하지 않음
Antifoam	제외	LCI DB 존재하지 않음
Oxygen	포함	-
Calcium carbonate	포함	-
Nickel based catalyst	포함	-
Nickel based catalyst	포함	-
Alumina based catalyst	포함	-
Clarifier polymer	제외	LCI DB 존재하지 않음
Hexane	포함	-
Nitrogen	포함	Nitrogen 액상으로 적용
Carbon dioxide	포함	-

전문가 설문조사 결과로 도출된 총 62개의 부원료 중 37개에 대하여 “market for~” LCI DB가 존재하는 것으로 나타났다(<표 3-59>). Phosphoric acid의 LCI DB의 경우, biomass와 같은 feedstock에 대해 발효 전처리 공정에서 가장 많이 사용되는 부원료이며 70%와 85% 농도의 제품이 존재하여 모두 포함하였다. 수소의 경우도 액상 수소와 기체 수소를 모두 포함하였다.

<표 3-59> 부원료별 적용된 LCI DB명

물질명	LCI DB 명칭
HFO(heavy fuel oil)	heavy fuel oil production, petroleum refinery operation   heavy fuel oil   Cutoff, S, RoW
Magnesium Oxide (MgO)	market for magnesium oxide   magnesium oxide   Cutoff, S, GLO
Zinc Oxide (ZnO) Catalyst	market for zinc oxide   zinc oxide   Cutoff, S, GLO
Ethanol	market for ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene   Cutoff, S
Methanol	market for methanol   methanol   Cutoff, S
Phosphoric acid	market for phosphoric acid, fertiliser grade, without water, in 70% solution state   Cutoff, S, RoW
Phosphoric acid	market for phosphoric acid industrial grade without water in 85 solution state Cutoff, S, GLO
Citric Acid	market for citric acid, citric_acid   Cutoff, S, GLO
Sodium Hydroxide	market for sodium hydroxide without water in 50 solution state   Cutoff, S, GLO
Hydrogen	market for hydrogen liquid,   Cutoff, S, RoW
Hydrogen	market for hydrogen gaseous   Cutoff, S, GLO
lubricating oil	market for lubricating oil   Cutoff, S, RoW
hydrochloric acid	market for hydrochloric acid without water in 30 solution state   Cutoff, S, RoW
potassium hydroxide	market for potassium hydroxide   Cutoff, S, GLO
sodium methoxide	market for sodium methoxide   Cutoff, S, GLO
platinum based catalyst	market for platinum   Cutoff, S, GLO
Palladium based catalyst	market for palladium   Cutoff, S, GLO
Sulfuric Acid	market for sulfuric acid   Cutoff, S, RoW
ammonium sulfate	market for ammonium sulfate   Cutoff, S, RoW
soda ash, light, crystalline, heptahydrate	market for soda ash light crystalline heptahydrate   Cutoff, S, GLO
inorganic nitrogen fertiliser, as N	market for inorganic nitrogen fertiliser as N   Cutoff, S, RoW
sodium phosphate	market for sodium phosphate   Cutoff, S, RoW
sodium sulfate, anhydrite	market for sodium sulfate anhydrite   Cutoff, S, RoW

물질명	LCI DB 명칭
ammonia, anhydrous, liquid	market for ammonia anhydrous liquid   Cutoff, S, RoW
sodium chloride, powder	market for sodium chloride powder   Cutoff, S, GLO
chlorine, liquid	market for chlorine liquid   Cutoff, S, RoW
Magnesium sulfate	market for magnesium sulfate   Cutoff, S, GLO
enzyme	market for enzymes   Cutoff, S, GLO
yeast	market for fodder yeast   Cutoff, S, GLO
Ferrous sulfate	market for iron sulfate   Cutoff, S, RoW
acetic acid	market for acetic acid without water in 98 solution state   Cutoff, S, GLO
Oxygen	market for oxygen liquid   Cutoff, S, RoW
calcium carbonate	market for calcium carbonate precipitated   Cutoff, S, RoW
nickel based catalyst	market for nickel concentrate 16 Ni   Cutoff, S, GLO
nickel based catalyst	market for nickel concentrate 7 Ni   Cutoff, S, RoW
alumina based catalyst	market for aluminium oxide non metallurgical   Cutoff, S, RoW
Hexane	market for hexane   Cutoff, S, GLO
Nitrogen	market for nitrogen liquid   Cutoff, S, RoW
Carbon dioxide	market for carbon dioxide in chemical industry   Cutoff, S, GLO

전문가 설문조사 결과 추가된 Nickel based catalyst, Palladium based catalyst 등과 같은 촉매 부원료의 경우, 해당 부원료명을 가진 LCI DB가 존재하지 않는다. 이 촉매들은 금속 이외의 다른 구성 성분을 확인하기 어려우므로, 금속 성분에 대한 LCI DB를 적용하였으며 “market for 금속명” LCI DB로 대체하여 사용하였다.

Ruthenium based catalyst와 Iron based catalyst의 경우는 금속명에 해당하는 LCI DB도 존재하지 않으므로 제외하였다. 일반적으로 LCI DB가 없는 촉매의 경우, 촉매 생산공정 GtG 데이터를 문헌조사를 통해 수집하여야 하며, 수집할 수 없는 경우 유사 공정에 대한 LCI DB 사용을 고려할 수 있다. 따라서, Nickel based catalyst 또는 Palladium based catalyst의 LCI DB로 대체 사용하는 것을 고려하였으나, 금속이 포함된 촉매의 경우 일반적으로 사용량이 매우 소량이거나 재활용되는 경우가 많으므로 cut-off 대상인 경우가 많으므로 제외하였다.

주원료 생산에 대한 탄소발자국 산정 방법을 동일하게 적용하여, 부원료의 LCI DB 내에서 GWP 관련 인벤토리만 추출하여 시뮬레이터에 연계함으로써 부원료 생산과정에서 발생하는 탄소발자국 산정에 연계되도록 개발하였다.



### 3.3 유틸리티

전문가 설문조사 각 유틸리티별 적용할 수 있는 LCI DB 존재 여부를 분석 결과, 결과로 도출된 유틸리티(에너지, 용수 등)의 종류는 총 19개이다(〈표 3-60〉). 그중 각 유틸리티별 생산 관련 LCI DB 존재가 확인되어 시뮬레이터에 적용된 유틸리티는 총 11개이다. 시뮬레이터 내의 유틸리티로 포함 여부에 관한 결정 기준은 〈표 3-60〉과 같다.

〈표 3-60〉 바이오 기술 전문가 설문조사 결과 유틸리티 리스트 및 시뮬레이터 포함 여부

유틸리티명	포함여부 (포함/제외)	비고
electricity, medium voltage	포함	-
water, deionised	포함	-
water, decarbonised	포함	-
tap water	포함	-
Steam	포함	화학산업에서 사용되는 스팀으로 적용
steam(based on coal)	포함	유연탄 기반 열병합 발전 시 생산되는 스팀으로 적용
steam(based on natural gas)	포함	-
steam, sourced by LNG		
heat, district or industrial, natural gas		
steam(based on biomass)	포함	우드칩 기반 열병합 발전 시 생산되는 스팀으로 적용
steam, sourced by biogas	포함	바이오가스 기반 열병합 발전 시 생산되는 스팀으로 적용
steam, sourced by flue gas	포함	"market for~" LCI DB 없음. (production of steam LCI DB는 연료별 구분되어 있음) 화학산업에서 사용되는 스팀으로 대체 적용
LNG	포함	-
Coal	포함	-
Diesel	포함	-
heat, central or small-scale, other than natural gas	포함	기타 화석연료 스팀으로 대체 적용 "market for~" LCI DB 있음 / 적용 가능함
heat, district or industrial, other than natural gas		
hot water, heat from natural gas	제외	Steam(heat)이 아닌 hot water에 대한 LCI DB는 없음)
hot water, heat from flue gas of power plant or fuel cell	제외	Steam(heat)이 아닌 hot water에 대한 LCI DB는 없음)

부원료와 동일한 기준으로 유틸리티에 대한 LCI DB도 유통(송전, 송수 등)단계에 따른 탄소발자국까지 포함되어 있는 ‘market for 유틸리티명’ LCI DB를 연계하였다. LCI DB의 지역명은 “세계(GLO 또는 RoW)”에 해당하는 DB를 사용하였다.

전기 LCI DB의 경우 Ecoinvent에 KR(한국)이 존재하며, 생산설비의 사용 전력에 따라 high voltage와 medium voltage로 구분되는데 high voltage는 24kV이상, medium voltage는 1 kV~24 kV이다. ‘22년 한국전력공사의 한국전력통계<sup>60)</sup>에 따르면 국내 바이오에너지의 발전량이 평균 85MWh인 점을 감안하여 medium voltage를 사용하였다.

<표 3-61> 유틸리티별 적용된 LCI DB명

유틸리티명	시뮬레이터 적용명	DB 명
electricity, medium voltage	전기	market for electricity medium voltage electricity medium voltage   Cutoff, S, KR
water, deionised	용수(deionised)	market for water deionised water deionised   Cutoff, S, RoW
water, decarbonised	용수(decarbonised)	market for water decarbonised water decarbonised   Cutoff, S, RoW
tap water	상수/공업용수	market for tap water tap water   Cutoff, S, RoW
Steam	Steam(화학산업)	market for steam in chemical industry steam in chemical industry   Cutoff, S, RoW
steam(based on coal)	Steam(유연탄)	heat and power co-generation, lignite   heat, district or industrial, other than natural gas   Cutoff, S, RoW
steam(based on natural gas)	Steam(천연가스)	market for heat, district or industrial, natural gas   heat, district or industrial, natural gas   Cutoff, S, RoW
steam(based on biomass)	Steam(바이오매스)	heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014   heat, district or industrial, other than natural gas   Cutoff, S, Kr
steam, sourced by biogas	Steam(바이오가스)	heat and power co-generation, biogas, gas engine   heat, central or small-scale, other than natural gas   Cutoff, S, Kr
steam, sourced by flue gas	Steam(화학산업)	market for steam in chemical industry steam in chemical industry   Cutoff, S, RoW
heat, central or small-scale, other than natural gas	Steam(기타 화석연료)	market for heat district or industrial other than natural gas heat district or industrial other than natural gas   Cutoff, S, RoW
heat, district or industrial, other than natural gas		
LNG	천연가스	market for natural gas liquids natural gas liquids   Cutoff, S, GLO
Coal	유연탄	market for hard coal hard coal   Cutoff, S, RoW
Diesel	경유(화석연료)	market for diesel diesel   Cutoff, S, RoW

60) 한국전력공사, 2021년 한국전력통계, “8-3. 행정구역별 신재생에너지 발전설비 및 발전량(2021)”

스팀/열 생산에 대한 LCI DB의 경우 전문가 의견에 따르면 3~4개 대표적인 스팀/열 생산 연료를 선정하여 시뮬레이터 사용자가 직접 source를 선택할 수 있도록 반영하는 방안을 제시하였다. 이에 따라 조사된 LCI DB를 바탕으로 화학산업, 유연탄, 천연가스, 바이오매스, 바이오가스, 기타 화석연료 총 5개의 종류의 스팀을 사용자가 선택할 수 있도록 설계하였다.

### 3.4 폐기물, 폐수

전문가 설문조사 후 취합된 폐기물, 폐수 리스트는 총 16개였다. 다만, LCA 전문가 분과위원회 및 실무자간 추가 논의 결과, 바이오에너지 생산공정으로부터 발생하는 폐기물 정보(폐기물 종류별 발생량)를 시뮬레이터 사용자가 구분하여 입력하기 어려울 것으로 판단하였다. 따라서, 시뮬레이터 사용자가 직접 재활용되는 폐기물양과 소각/매립용 폐기물로만 구분하여 입력하도록 설계하였다.

<표 3-62> 바이오 기술 전문가 설문조사 결과 폐기물, 폐수명 및 시뮬레이터 포함 여부

폐기물/폐수명	포함여부 (포함/제외)	비고
wastewater(from residence)	포함	-
wastewater(average)	포함	-
municipal solid waste, incineration	포함	사업장 일반폐기물 소각 처리 “treatment of ~” LCI DB 적용
municipal solid waste, sanitary landfill	포함	사업장 일반폐기물 매립 처리 “treatment of ~” LCI DB 적용
hazardous waste incineration	포함	사업장 지정폐기물 소각 처리 “treatment of ~” LCI DB 적용
refinery sludge, sanitary landfill	포함	사업장 지정폐기물 매립 처리 “treatment of ~” LCI DB 적용

사용자가 입력한 소각/매립용 폐기물량은 국가 폐기물 발생량 통계<sup>61)</sup> 중 “사업장 배출시설계 지정폐기물” 과 “사업장 지정폐기물” 통계 데이터의 ‘18년부터 ‘20년까지 3년 평균 발생량에서 소각량과 매립량 간의 구성비를 산정 및 적용하여 소각폐기물과 매립폐기물로 구분하여 계산되도록 하였다. 구분되어 계산된 사업장 배출시설계(소각 및 매립) 폐기물량과 사업장 지정폐기물량(소각 및 매립)은 소각 및 매립에 대한 LCI DB와 연계되어 폐기물 처리에 대한 탄소발자국이 계산되도록 하였다. 재활용되는 폐기물의 경우는 재활용으로부터 발생하는 탄소발자국을 ‘0’ 으로 정의하여 적용하였다.

61) 국가통계포털(KOSIS), “전국폐기물발생 및 처리현황” (2018년~2020년)

<표 3-63> 국내 사업장 폐기물 3년 평균 발생량 및 소각/매립 구성비('18~'20년)

구분	소각/매립	3년 평균 발생량(톤/년)	구성비(%)
사업장 배출시설계 폐기물 (일반폐기물)	소각	10,013,523.9	28.54%
	매립	20,124,628.6	57.37%
사업장 지정폐기물	소각	1,785,265.7	5.09%
	매립	3,157,049.0	9.00%

## 제4장 탄소발자국 산정 시뮬레이터 구성현황

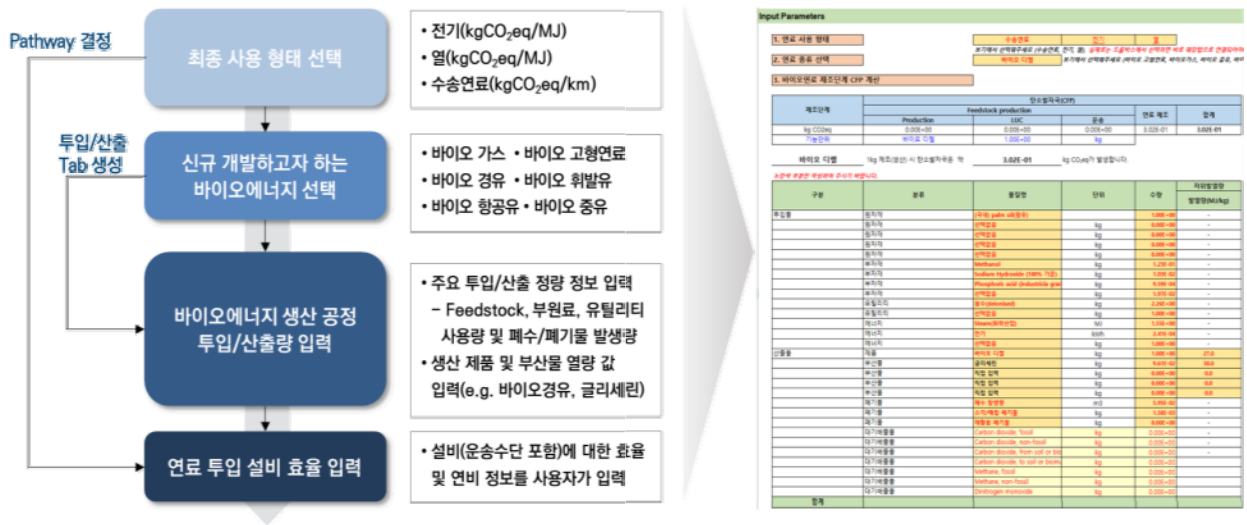


## 제 4 장 탄소발자국 산정 시뮬레이터 구성현황

본 장에서는 2장에서 탄소발자국 및 LCA 시뮬레이터 기능에 대하여 분석하여 모색한 개발 방향과 3장에서 조사한 바이오에너지 기술별 주요 투입/산출 항목에 대한 LCI DB 연계를 통하여 비전문가가 사용할 수 있는 탄소발자국 시뮬레이터를 개발하였다. 본 시뮬레이터는 기존기술과 신기술의 전과정 탄소발자국 산정값이 동일한 기준으로 비교할 수 있도록 설계하였다. 또한, 향후 국내 바이오에너지 생산 증가로 인하여 국내에서 생산되는 feedstock이 다양해질 경우 feedstock 생산에 대한 LCI DB 확장 구축 및 관리가 용이하도록 backdata를 구성하고 LCI DB 연결 구조를 설계하였다.

시뮬레이터의 구성 및 기능 정의는 [그림 4-1]에 나타난 바와 같이, 사용자가 시뮬레이터 실행 후 첫 화면에서 바이오에너지의 3가지 최종 사용 형태를 선택한다. 사용 형태를 선택한 후 바이오연료의 종류를 선택하면, 바이오연료 생산공정에 대한 투입·산출량을 입력할 수 있으며, 사용자는 바이오매스(feedstock)의 종류 및 주요 원재료·부재료·유틸리티(에너지), 산출물(제품), 배출물(폐수, 폐기물) 항목을 선택하여 사용·산출(배출)량을 직접 입력하게 된다.

[그림 4-1] 바이오에너지 6개 기술 전과정 탄소발자국 시뮬레이터 사용자 입력화면



마지막으로, 연료 투입 후 에너지 생산공정의 설비 효율 정보를 입력하게 되면, 사용자가 평가하고자 하는 바이오에너지에 대한 전과정 탄소발자국 산정 결과값이 산출된다 ([그림 4-2]).

[그림 4-2] 바이오에너지 전과정 탄소발자국 시뮬레이션 결과 화면

**Results**

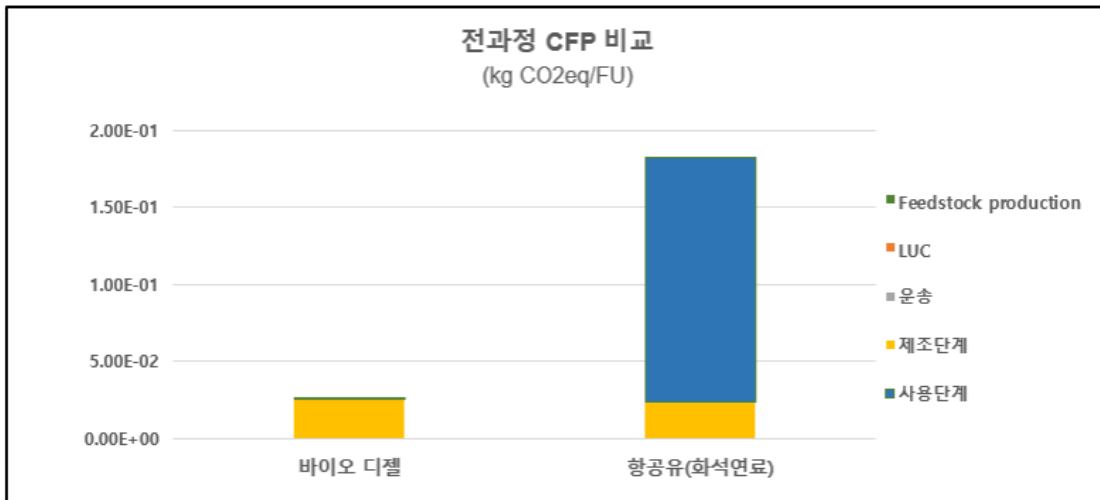
**바이오 디젤 전과정 CFP**

구분		단위	CFP
제조전 단계	Feedstock production	kg CO2eq/FU	0.00E+00
	LUC	kg CO2eq/FU	0.00E+00
	운송	kg CO2eq/FU	0.00E+00
	연료 제조 단계	kg CO2eq/FU	2.53E-02
	사용단계	kg CO2eq/FU	5.51E-04
	합계	kg CO2eq/FU	2.59E-02

**전과정 CFP 비교 (바이오 vs. 화석 기반)**

구분	단위	바이오 디젤	항공유(화석연료)
Feedstock production	kg CO2eq/FU	0.00E+00	
LUC	kg CO2eq/FU	0.00E+00	
운송	kg CO2eq/FU	0.00E+00	
제조단계	kg CO2eq/FU	2.53E-02	2.31E-02
사용단계	kg CO2eq/FU	5.51E-04	1.59E-01
합계	kg CO2eq/FU	2.59E-02	1.82E-01

**바이오 디젤** 수송용 연료로 1 km 운행 시 탄소발자국은 약 **2.59E-02** kg CO<sub>2</sub>eq로, 화석 연료 대비 약 **86%**의 감축 효과가 있습니다.



바이오에너지 전과정 탄소발자국 산정을 위한 시뮬레이터는 추후 비전문가가 사용할 수 있는 “사용자 입력 부분” 과 전문가가 바이오에너지 연구 초기 단계에서부터 활용할 수 있는 “개발자 활용 부분” 으로 개발될 수 있도록 사용자와 개발자가 활용할 수 부분을 구분하여 개발하였다.



## 제 1 절 시뮬레이터 사용자 활용 부분

전과정 탄소발자국 시뮬레이터는 프로토타입 설계 시 바이오에너지 기술에 대한 비전문가인 사용자도 시뮬레이션을 활용할 수 있도록 하였다. 본 절에서는 바이오 사용 형태별(수송연료, 스팀(열), 전기)로 구분되어 있는 시뮬레이터를 활용하여 전과정 탄소발자국을 산정하는 과정을 기술하였다.

[그림 4-3] 바이오에너지 사용 형태 및 방법론 선택 예시

바이오에너지 기술 탄소발자국 시뮬레이터			
1		수송연료(2013)	
2		전기(2013)	
3		열(2013)	
4		수송연료(2006)	
5		전기(2006)	
6		열(2006)	

먼저 공통적으로 시뮬레이터 실행 시 첫 화면에서 사용자는 [그림 4-3]과 같이 바이오에너지 사용 형태와 IPCC 방법론을 선택하게 되면, 관련 Sheet로 자동으로 넘어가게 된다. 앞서 기술한 바와 같이 IPCC 2006 및 2013 선택에 따라 GWP 값이 다르므로 이를 시뮬레이터에 반영하여 설계하였다.

### 1. 바이오에너지 종류 선택 및 제조공정 투입/산출 입력

바이오에너지의 최종 사용 형태를 선택했다면, “2. 연료 종류 선택” 오른쪽 옆 드롭박스를 열어 바이오연료의 종류를 선택한다([그림 4-4]).

[그림 4-4] 연료 종류 선택 예시

바이오연료의 종류를 선택하게 되면 “3. 바이오연료 제조단계 CFP(Carbon Footprint) 계산” 표의 “기능단위”가 사용자가 선택한 연료로 나타난다. 예를 들면, 사용자가 “2. 연료 종류 선택”에서 바이오디젤을 선택할 경우 기능단위가 “바이오디젤”로 입력되게 된다([그림 4-5]). 연료 모두 제조단계의 기능단위는 “1kg”이 기본값으로 설정되어 있으며, 투입·산출물 데이터 입력 표의 산출물에서 제품에 1kg 이외의 단위로 작성하더라도 바이오연료 제조단계 CFP 계산표에는 1kg 기능단위 기준으로 결과값이 환산된다.

[그림 4-5] 바이오연료 제조단계 CFP 계산 결과표

3. 바이오연료 제조단계 CFP 계산					
제조단계	탄소발자국(CFP)				
	Feedstock production			연료 제조	합계
	Production	LUC	운송		
kg CO2 eq	3.74E-01	1.91E+00	1.07E-01	1.91E-01	2.58E+00
기능단위	바이오 디젤	1.00E+00	kg		

[그림 4-5]의 “3. 바이오연료 제조단계 CFP 계산” 표는 [그림 4-6]에 나타난 투입·산출물 데이터 입력 표에 사용자가 직접 데이터 작성을 완료하게 되면 바이오연료의 “제조단계”에서의 탄소발자국 값이 자동으로 계산되어 나타나는 결과표이므로, 사용자가 데이터를 입력하지 않도록 한다.

사용자는 투입·산출물 데이터 입력 표([그림 4-6])에서 다음의 항목을 직접 입력해야 한다. 가능하다면 데이터를 입력 시 모든 투입·산출물을 1kg의 제품(바이오연료) 제조 시 필요한 수량을 기준으로 작성하는 것을 권한다.

- 투입물 - 원자재, 부자재, 유틸리티, 에너지
- 산출물 - 제품, 부산물, 배출물(폐기물, 대기배출물)

먼저, 사용자는 “분류”에서 각 행에 투입물 또는 산출물 종류를 선택한 후 “물질명”과 “수량”(노란색 음영 부분)에 데이터를 입력한다. “단위”는 “물질명”을 입력하게 되면 자동으로 입력된다. “산출물”에서 “제품”과 “부산물”의 경우는 물질명, 수량 입력과 함께 각각의 저위발열량(MJ/kg) 값을 입력한다. 입력된 저위발열량은 주제품과 부산물 간 에너지 기준 할당인자를 계산하여 투입·산출물 및 그에 따른 환경부하를 할당하는 기준으로 사용된다.

예를 들면, 주제품인 바이오디젤 제조 시 글리세린이 부산물로 함께 생산되므로 주제품과 부산물의 저위발열량의 합 대비 각각의 구성비는 할당인자로 계산되며 주제품에 해당하는 할당인자 만큼의 투입·산출물 및 그에 따른 환경부하를 산정하게 된다.

[그림 4-6] 바이오연료 제조단계의 탄소발자국 계산 - 투입·산출물 데이터 입력 표

### 3. 바이오연료 제조단계 CFP 계산

제조단계	탄소발자국(CFP)				
	Feedstock production			연료 제조	합계
	Production	LUC	운송		
kg CO2 eq	3.74E-01	1.91E+00	1.07E-01	1.91E-01	2.58E+00
기능단위	바이오 디젤	1.00E+00	kg		

노란색 부분만 작성하여 주시기 바랍니다.

구분	분류	물질명	단위	수량	저위발열량
					발열량(MJ/kg)
투입물	원자재	외 기타) palm oil(팜유)	kg	1.00E+00	-
	원자재	선택없음	kg	0.00E+00	-
	부자재	선택없음	kg	0.00E+00	-
	유틸리티	선택없음	kg	0.00E+00	-
	에너지	선택없음	kg	0.00E+00	-
	부자재	Methanol	kg	1.23E-01	-
	부자재	Phosphoric acid (industria gr	kg	5.95E-04	-
	부자재	water (deionized)	kg	2.96E-02	-
	부자재	선택없음	kg	0.00E+00	-
	유틸리티	용수(deionised)	kg	2.26E+00	-
산출물	유틸리티	선택없음	kg	1.00E+00	-
	에너지	전기	kg	2.41E-04	-
	에너지	천연가스	Nm3	1.00E-03	-
	에너지	선택없음	kg	1.00E+00	-
	제품	바이오 디젤	kg	1.00E+00	38.0
	부산물	글리세린	kg	9.61E-02	19.0
	부산물	직접 입력	kg	0.00E+00	0.0
	부산물	직접 입력	kg	0.00E+00	0.0
	부산물	직접 입력	kg	0.00E+00	0.0
	폐기물	폐수 발생량	m3	5.95E-05	-
폐기물	폐기물	소각/매립 폐기물	kg	1.58E-03	-
	폐기물	재활용 폐기물	kg	2.00E+00	-
	대기배출물	Carbon dioxide, fossil	kg	0.00E+00	-
	대기배출물	Carbon dioxide, non-fossil	kg	0.00E+00	-
	대기배출물	Carbon dioxide, from soil or	kg	0.00E+00	-
	대기배출물	Carbon dioxide, to soil or bi	kg	0.00E+00	-
	대기배출물	Methane, fossil	kg	0.00E+00	-
	대기배출물	Methane, non-fossil	kg	0.00E+00	-
대기배출물	Dinitrogen monoxide	kg	0.00E+00	-	
합계					

#### 가. 원자재

원자재(feedstock)는 바이오연료 제조를 위해 투입되는 원자재를 말하며, 바이오연료 제조를 위해 필요한 원자재 종류를 “물질명”(노란 음영부분)의 드롭박스에서 선택한다. 원자재 종류는 국내와 해외로 구분되어 있으며, 사용자는 전과정 탄소발자국을 산정하고자 하는 바이오연료의 원자재가 국내 생산 또는 수입산 중 사용 가능 여부를 확인하여 선택한다.

나. 부자재

부자재는 바이오연료 제조를 위해 투입되는 주재료를 물리·화학적으로 처리하기 위해 투입되는 화학물질, 촉매 등의 모든 부자재를 말하여, 바이오연료 제조를 위해 필요한 부자재 종류를 “물질명” (노란 음영 부분)의 드롭박스에서 선택한다. 부자재는 국내산과 해외 수입산의 구분이 없으며, 사용자는 전과정 탄소발자국을 산정하고자 하는 바이오연료 제조에 투입되는 부자재 종류와 명칭, 투입량을 확인하여 데이터 입력 표에 나타난 기준 단위로 환산 후 수량을 직접 입력한다.

다. 에너지

에너지는 바이오연료 제조를 위해 투입되는 에너지를 말하여, 전기, 천연가스, 스팀 등이 있다. 바이오연료 제조공정에서 원·부자재를 사용하여 바이오연료를 생산하는 직접적으로 사용되는 제조설비(보일러, 가스터빈 등)와 제조설비 가동을 위해 투입되는 장비(지게차, 컨베이어 벨트 등)에 사용되는 에너지 종류를 선택입력하고 입력된 에너지별로 사용량을 모두 입력한다.

에너지 사용량 입력 시 선택한 에너지 종류의 기준 단위를 확인하여 필요한 경우 단위 환산에 주의하여 환산값을 입력한다.

라. 제품 및 부산물

제품은 바이오연료 제조공정에서 생산되는 산출물로서 주제품과 부산물로 구분된다. 먼저 제품의 경우, 바이오연료 제조공정을 통해 생산되는 바이오연료 종류를 “물질명” 드롭박스에서 선택한다. 이때, 선택한 바이오연료 종류의 기준 단위는 kg, 수량은 1로 입력한다.

일반적으로 바이오연료 제조 시 주제품 외에 부산물이 생산되는 경우가 많고 종류도 매우 다양하기 때문에 부산물의 물질명은 직접 입력한다. 부산물의 물질명과 생산량을 입력 후 반드시 부산물의 저위발열량(MJ/kg) 값을 조사하여 입력한다. 앞서 기술한 바와 같이 입력된 저위발열량은 바이오연료 제조공정과 관련된 주제품과 부산물을 제외한 모든 투입·산출물을 주제품과 부산물에 나누어 할당하는 기준으로 사용되며, 주제품에 할당된 투입·산출물 수량을 이용하여 바이오연료 제조공정 탄소발자국 산정해야 하기 때문이다.

마. 폐기물 및 폐수

폐기물은 바이오연료 제조공정에서 연료 제조 시 배출되는 모든 폐기물을 의미하며, 재활용 폐기물, 소각/매립 폐기물, 폐수로 구분된다.

사용자는 산출물-폐기물 입력란에서 “물질명” 열의 드롭박스를 열어 폐기물 종류를 선택한다. 이때, 폐기물 발생량 입력 시 재활용되는 폐기물이 있다면 소각/매립되는 폐기물 입력 후 별도로 재활용 폐기물을 입력한다.

바이오연료 제조공정으로부터 발생하는 폐수 수량을 기준 단위(m<sup>3</sup>)에 주의하여 입력하고, 공정으로부터 직접 배출되는 대기배출물 양을 입력한다.

## 1.1 사용단계 입력

사용단계 입력의 경우 바이오에너지 최종 사용 형태별로 상이하다. 수송연료의 경우 생산된 바이오연료를 사용하게 되는 운송 수단의 연비를 입력하게 되며, 전기 및 스팀(열)의 경우 설비의 효율을 입력하게 설계하였다. 최종 사용 형태 별 자세한 사항은 아래에 설명하였다.

### 가. 수송연료

수송연료 사용단계의 CFP를 계산하기 위하여 사용자는 바이오연료를 사용(연소)하는 수송 수단의 연소효율(연비) 정보만 입력하면 된다. 연료 사용단계의 기능단위는 1km로 고정값이며, 사용자가 연소효율(연비)을 입력 시 “연료사용량”은 “사용자 입력 연비”, “기능단위” 및 “연료비중” 정보를 사용하여 자동으로 계산된다. “연료비중”은 앞서 기술한 투입·산출물 데이터 입력 표에서 산출물-제품-“물질명” 드롭박스에서 사용자가 선택한 바이오연료의 종류에 따라 자동으로 계산되어 결과값이 나타난다([그림 4-7]).

[그림 4-7] 바이오연료 사용단계 탄소발자국(CFP) 계산 - 사용단계 연소효율(연비) 입력

#### 4. 바이오 연료 사용단계 CFP 계산

연료 명칭	바이오 디젤	
기능단위	1.00	km
연비 (사용자 입력)	15.0	km/L
연료사용량	0.056	kg/FU
	2.1	MJ/FU
* 연료비중	0.840	kg/L

사용 단계	탄소발자국(CFP)
kg CO2 eq	3.67E-04

구분	분류	물질명	단위	수량	저위발열량
					발열량(MJ/kg)
투입물	제품	바이오 디젤	kg	5.60E-02	38.0
합계					

### 나. 전기 및 스팀(열)

바이오연료를 전기 및 스팀(열)로 사용할 경우 사용단계의 CFP를 계산하기 위하여 사용자는 연료를 사용(연소)하는 열병합발전 등과 같은 발전설비의 연소효율과 부산물(열 또는 전기)의 열량 값을 입력하면 된다.

전기의 경우, 연료 사용단계에서의 전기의 기능단위는 kWh로 고정값이며 사용자가 연소효율과 스팀(열) 부산물의 열량 값을 입력 시 “연료-투입량”은 “사용자 입력 연소효율”, “기능단위” 및 “연료의 저위발열량(MJ/kg)” 정보를 사용하여 자동으로 계산된다. 전기 kWh 생산을 위해 투입되는 연료의 투입량은 사용자가 투입·산출물 데이터 입력 표([그림 4-8])에 입력한 열량을 사용하여 자동으로 계산된다.

또한, 연료를 투입하여 스팀(열) 1MJ 생산 시 부산물로 발생하는 전기량과 전환효율은

ecoinvent DB에서 바이오연료 별로 제시하고 있는 효율 및 부산물 생산량을 참고하여 기본값으로 설정되어 있다. 사용자가 필요한 경우에는 직접 전력 생산량과 전환효율 값을 입력하면 된다.

[그림 4-8] 탄소발자국(CFP) 계산 - 바이오가스 사용단계 연소효율 입력 예시

**4. 바이오 연료 사용단계 CFP 계산**

기능단위	전기	1.00	kWh
부산물	열 (사용자 입력)	5.0	MJ
	효율 (사용자 입력)	90.0	%
연료	바이오 가스	22.7	MJ/kg
	투입량	0.3	kg.FU
		7.7	MJ/FU

사용 단계	탄소발자국(CFP)
kg CO2 eq	9.36E-04

구분	분류	물질명	단위	수량	저위발열량
					발열량(MJ/kg)
투입물	제품	바이오 가스	kg	3.41E-01	22.7
합계					

## 1.2 전과정 탄소발자국 계산 결과

바이오연료 전과정 탄소발자국 계산 결과표는 “바이오연료 전과정 CFP” 와 “전과정 CFP비교 (바이오 vs. 화석기반)” 로 구성된다.

“바이오연료 전과정 CFP” 표에서는 전과정 각 단계별로 탄소발자국 계산 결과를 확인할 수 있으며, 합산된 전과정 탄소발자국 값도 표시된다. 전과정 단계는 제조 전 단계-운송-연료 제조단계-연료 사용단계로 구분되며, 제조 전 단계는 “feedstock 생산” 및 “LUC(feedstock 생산 시 토지이용변화(land use change))” 로 구분되어 표시된다([그림 4-8]).

“전과정 CFP비교 (바이오 vs. 화석 기반)” 표에서는 “바이오연료 전과정 CFP” 에서 계산된 바이오연료 전과정 CFP와 비교 대상에 해당하는 화석기반 연료의 CFP값을 feedstock 생산단계, 토지이용변화(land use change), 운송, 제조단계와 사용단계로 구분하여 비교하거나 합산된 값을 비교할 수 있다. 또한, 각 연료별 또는 연료 간 제조단계와 사용단계 각각의 기여도를 확인할 수 있으며, 바이오연료가 화석 기반 연료 대비 전과정 탄소발자국 감축 효과를 확인할 수 있다.

[그림 4-9] 바이오연료 전과정 탄소발자국(CFP) 계산 결과 및 화석연료 비교

Results

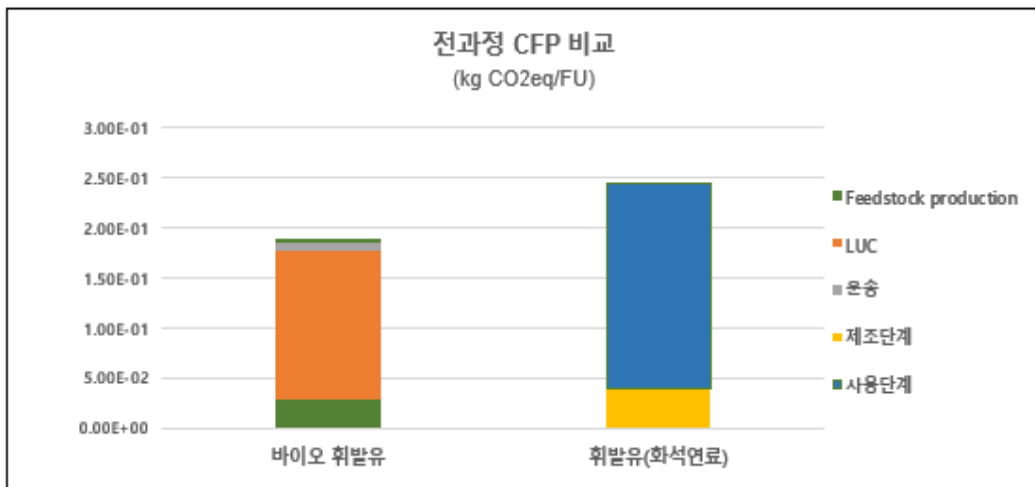
바이오 휘발유 전과정 CFP

구분	단위	CFP
제조전 단계	Feedstock production	2.90E-02
	LUC	1.48E-01
운송	kg CO2eq/FU	8.27E-03
연료 제조 단계	kg CO2eq/FU	5.40E-04
사용단계	kg CO2eq/FU	4.30E-04
합계	kg CO2eq/FU	1.86E-01

전과정 CFP 비교 (바이오 vs. 화석 기반)

구분	단위	바이오 휘발유	휘발유(화석연료)
Feedstock production	kg CO2eq/FU	2.90E-02	
LUC	kg CO2eq/FU	1.48E-01	
운송	kg CO2eq/FU	8.27E-03	
제조단계	kg CO2eq/FU	5.40E-04	3.88E-02
사용단계	kg CO2eq/FU	4.30E-04	2.06E-01
합계	kg CO2eq/FU	1.86E-01	2.45E-01

바이오 휘발유 수송용 연료로 1 km 운행 시 탄소발자국은 약 1.86E-01 kg CO<sub>2</sub>eq로 화석 연료 대비 약 24%의 감축 효과가 있습니다.



## 제 2 절 시뮬레이터 개발자 활용 부분

본 절에서는 전문가가 바이오에너지 연구 초기 단계에서부터 전과정 탄소발자국 시뮬레이터를 활용할 수 있는 “개발자 활용 부분”에 대하여 기술하였다. 개발자 활용 부분 중 앞서 1절에서 기술한 전과정 탄소발자국 시뮬레이터를 활용하는 방법과 중복되는 내용을 제외하고 개발자 활용 부분을 중심으로 사용과정을 설명하였다.

### 1. 사용자 투입/산출 입력 부분 내 개발자 활용 기능

#### 1.1 탄소발자국 기여도 분석 기능

시뮬레이터를 실행하여 수송연료, 전기, 스팀(열) 및 온실가스 인벤토리 배출계수(IPCC 2006 또는 IPCC 2013)가 적용되어 있는 총 6개의 탭 화면에는 Input Parameters 우측 상단에 “+”가 표시되어 있다. ([그림 4-10])

[그림 4-10] 개발자용 입력화면 펼치기 화면

The screenshot shows a spreadsheet interface for 'Input Parameters'. A red circle highlights a '+' button in the top right corner. The spreadsheet content is as follows:

**1. 연료 사용 형태**      수송연료      전기      열

**2. 연료 종류 선택**      바이오 디젤      포기에서 선택해주세요 (수송연료, 전기, 열: 값에는 드롭박스에서 선택하면 바로 해당값으로 연결되어야 하지만, 여기서는 파이피플스크로 포기에서 선택해주세요 (바이오 고형연료, 바이오가스, 바이오 중유, 바이오 휘발유, 바이오 디젤, 바이오 팜))

**3. 바이오연료 제조단계 CFP 계산**

제조단계	탄소발자국(CFP)			연료 제조	합계
	Production	LUC	운송		
kg CO2 eq	3.74E-01	1.91E+00	1.07E-01	1.91E-01	2.58E+00
기준단위	바이오 디젤	1.00E+00	kg		

노란색 부분만 작성하여 주시기 바랍니다.

구분	분류	물질명	단위	수량	지위발열량
					발열량(MJ/kg)
투입물	원자재	(핵외 기타) palm oil(합동)	kg	1.00E+00	-

“+” 버튼을 누르면 숨겨져 있는 셀들이 가로로 확장되며, 바이오에너지의 생산공정까지의 각 단계별 구분된 CFP 값을 조사할 수 있으며, 특히 각 투입 및 배출물질별 CFP 값도 확인할 수 있다.([그림 4-11]) 확인된 CFP 값을 이용하여 생산공정까지의 CFP 중 각 단계별 기여도를 분석할 수 있으며, 각 단계에 투입 및 배출 물질별 기여도 분석이 가능하다.



[그림 4-11] 바이오에너지 생산공정까지의 단계별/투입·배출물질별 CFP 분석표

3. 바이오연료 제조단계 CFP 계산

제조단계	탄소발자국(CFP)			연료 제조	합계
	Production	LUC	온송		
kg CO2 eq	3.74E-01	1.91E+00	1.07E-01	1.91E-01	2.58E+00
기물단위	바이오 디젤	1.00E+00	kg		

노란색 부분만 작성하여 주시게 바랍니다.

구분	분류	물질명	단위	수량	저위발열량	
					발열량(MJ/kg)	
투입물	원자재	(해외 기타) palm oil(일유)	kg	1.00E+00	-	
	원자재	선택업윤	kg	0.00E+00	-	
	원자재	선택업윤	kg	0.00E+00	-	
	원자재	선택업윤	kg	0.00E+00	-	
	부자재	Methanol	kg	1.23E-01	-	
	부자재	Phosphoric acid (industria grade)	kg	5.95E-04	-	
	부자재	water (deionized)	kg	2.96E-02	-	
	부자재	선택업윤	kg	0.00E+00	-	
	유틸리티	용수(deionised)	kg	2.26E+00	-	
	유틸리티	선택업윤	kg	1.00E+00	-	
	에너지	전기	kg	2.41E-04	-	
	에너지	천연가스	Nm3	1.00E-03	-	
산출물	제품	바이오 디젤	kg	1.00E+00	38.0	
	부산물	글리세린	kg	9.61E-02	19.0	
	부산물	직접 입력	kg	0.00E+00	0.0	
	부산물	직접 입력	kg	0.00E+00	0.0	
	부산물	직접 입력	kg	0.00E+00	0.0	
	폐기물	폐수 발생량	m3	5.95E-05	-	
	폐기물	소각/매립 폐기물	kg	1.58E-03	-	
	폐기물	재활용 폐기물	kg	2.00E+00	-	
	대기배출물	Carbon dioxide, fossil	kg	0.00E+00	-	
	대기배출물	Carbon dioxide, non-fossil	kg	0.00E+00	-	
	대기배출물	Carbon dioxide, from soil or bi	kg	0.00E+00	-	
	대기배출물	Carbon dioxide, to soil or biom	kg	0.00E+00	-	
	대기배출물	Methane, fossil	kg	0.00E+00	-	
	대기배출물	Methane, non-fossil	kg	0.00E+00	-	
	대기배출물	Dinitrogen monoxide	kg	0.00E+00	-	
	합계					

CFP			
Feedstock production	LUC	온송	연료연소
3.92E-01	2.00E+00	1.12E-01	0.00E+00
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
7.97E-02	3.51E-05	0.00E+00	0.00E+00
8.12E-04	4.32E-06	0.00E+00	0.00E+00
1.37E-05	1.94E-08	0.00E+00	0.00E+00
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.05E-03	1.48E-06	0.00E+00	0.00E+00
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
1.67E-04	9.51E-08	0.00E+00	0.00E+00
4.67E-04	1.86E-07	0.00E+00	2.16E-03
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
3.26E-05	4.56E-08	0.00E+00	
1.10E-03	7.83E-08	0.00E+00	
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
4.75E-01	2.00E+00	1.12E-01	2.16E-03

1.2 바이오에너지 생산공정 산출물별 할당계수 산정 가능

단계별 또는 투입·배출물질별 CFP 분석표 우측의 “할당 인자 (산출물별 환경부하 할당)” 표는 투입·산출물 입력 표에서 입력된 제품과 부산물의 열량 값을 기준으로 각각에 대한 할당 인자를 자동으로 계산한다. 제품과 부산물 각각에 대한 할당 인자 중 “제품”에 대한 할당 인자를 기준으로 단계별/투입·배출물질별 CFP 분석표의 각 단계별 합산된 CFP값에서 “제품”에 해당하는 환경부하(CFP) 값을 계산해준다.



[그림 4-13] Feedstock LCI DB 추가 기능 Sheet

palm oil refinery operation   palm oil, refined   Cutoff, S, MY(말레이시아)						
		기능단위		1.0 kg		
		출처		Ecoinvent 3.8		
		국가		말레이시아		
		구분		온실가스 배출계수		
				IPCC 2006	IPCC 2013	
palm oil refinery operation   palm oil, refined   Cutoff, S, MY(말레이시아)		Total		3.43E+00	3.50E+00	
palm oil refinery operation   palm oil, refined   Cutoff, S, MY(말레이시아)		fossil		8.94E-01	9.08E-01	
palm oil refinery operation   palm oil, refined   Cutoff, S, MY(말레이시아)		biogenic removal		0.00E+00	0.00E+00	
palm oil refinery operation   palm oil, refined   Cutoff, S, MY(말레이시아)		biogenic emission		2.61E-01	3.48E-01	
palm oil refinery operation   palm oil, refined   Cutoff, S, MY(말레이시아)		LUC removal		-2.57E-02	-2.57E-02	
palm oil refinery operation   palm oil, refined   Cutoff, S, MY(말레이시아)		LUC emission		2.04E+00	2.04E+00	
palm oil refinery operation   palm oil, refined   Cutoff, S, MY(말레이시아)		other		2.60E-01	2.23E-01	
palm oil refinery operation   palm oil, refined   Cutoff, S, MY(말레이시아)		검증		3.43E+00	3.50E+00	
				0.00E+00	0.00E+00	

Flow	Category	Property	Unit	Classification	Amount	GWP value	
						IPCC 2006	IPCC 2013
Carbon dioxide	Elementary flows/Resource/in air	Mass	kg	biogenic removal	4.72E+00	0.00E+00	0.00E+00
Carbon dioxide	Elementary flows/Emission to air/low population density	Mass	kg	fossil	5.56E-01	5.56E-01	5.56E-01
Carbon dioxide	Elementary flows/Emission to air/lower stratosphere + upper troposphere	Mass	kg	fossil	4.10E-06	4.10E-06	4.10E-06
Carbon dioxide	Elementary flows/Emission to air/high population density	Mass	kg	fossil	1.18E-01	1.18E-01	1.18E-01
Carbon dioxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	Mass	kg	fossil	1.74E-01	1.74E-01	1.74E-01
Carbon dioxide	Elementary flows/Emission to air/low population density, long-term	Mass	kg	fossil	1.02E-03	1.02E-03	1.02E-03
Carbon dioxide	Elementary flows/Emission to air/low population density	Mass	kg	LUC emission	1.09E+00	1.09E+00	1.09E+00
Carbon dioxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	Mass	kg	LUC emission	9.35E-01	9.35E-01	9.35E-01
Carbon dioxide	Elementary flows/Emission to air/low population density	Mass	kg	biogenic emission	3.65E-03	0.00E+00	0.00E+00
Carbon dioxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	Mass	kg	biogenic emission	1.43E-03	0.00E+00	0.00E+00
Carbon dioxide	Elementary flows/Emission to air/high population density	Mass	kg	biogenic emission	7.03E+00	0.00E+00	0.00E+00
Carbon dioxide	Elementary flows/Emission to soil/agricultural	Mass	kg	LUC removal	1.28E-04	-1.28E-04	-1.28E-04

## 2.2 투입/산출물별 온실가스 배출계수 추가 기능

“배출계수” sheet에서는 바이오에너지 주원료(원자재), 부자재, 운송, 유틸리티, 에너지, 폐기물별 사용된 LCI DB명이 작성되어 있다. “DB.GHG배출계수” sheet에서 IPCC 2006과 IPCC 2013의 온실가스 배출계수를 각 LCI DB의 GHG 물질에 적용하여 계산된 feedstock production과 토지이용변화로 구분된 온실가스 배출계수 결과값이 투입·산출물별로 정리되어 있다([그림 4-14]).

[그림 4-14] 투입/산출물별 온실가스 배출계수 계산 시트

DB name	CF	FU	unit	온실가스 배출계수						
				IPCC 2006			IPCC 2013			
				Total	Feedstock production	LUC	Total	Feedstock production	LUC	
bamboo, 대나무 또는 분쇄한 것 (중국)	(중국) bamboo(대나무 또는 분쇄한 것)	1	1 kg	kg	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
maize grain, 옥수수 낱알 (아르헨티나)	maize grain production   maize grain   Cutoff, S, AR	1	1 kg	kg	1.18E+00	3.07E-01	8.69E-01	1.16E+00	2.87E-01	8.74E-01
maize grain, 옥수수 낱알 (미국)	maize grain production   maize grain   Cutoff, S, US	1	1 kg	kg	4.41E-01	4.41E-01	2.75E-04	4.25E-01	4.25E-01	2.75E-04
maize grain, 옥수수 낱알 (브라질)	market for maize grain   maize grain   Cutoff, S, BR	1	1 kg	kg	2.77E-01	2.77E-01	2.24E-04	2.62E-01	2.61E-01	2.28E-04
potato, 감자 (중국)	potato production   potato   Cutoff, S, CN	1	1 kg	kg	2.63E-01	2.63E-01	1.88E-04	2.52E-01	2.52E-01	1.88E-04
potato, 감자 (미국)	potato production   potato   Cutoff, S, US	1	1 kg	kg	1.52E-01	1.52E-01	1.97E-04	1.46E-01	1.46E-01	1.98E-04
potato, 감자 (해외 기타)	potato production   potato   Cutoff, S, RoW	1	1 kg	kg	1.47E-01	1.47E-01	2.23E-04	1.41E-01	1.41E-01	2.24E-04
rye grain, 호밀 (해외 기타)	market for rye grain   rye grain   Cutoff, S, GLO	1	1 kg	kg	7.20E-01	7.19E-01	1.13E-03	6.90E-01	6.89E-01	1.13E-03
molasses, from sugar beet, 사탕무 당밀 (해외 기타)	(해외 기타) molasses, from sugar beet(사탕무 당밀)	1	1 kg	kg	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
vinasse, from fermentation of sugar beet	(해외 기타) vinasse, from fermentation of sugar beet	1	1 kg	kg	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
sugar beet, 사탕무 (해외 기타)	sugar beet production   sugar beet   Cutoff, S, RoW	1	1 kg	kg	4.60E-02	4.60E-02	1.51E-05	4.23E-02	4.23E-02	1.51E-05
barley, 보리 (해외 기타)	barley production   barley grain   Cutoff, S, RoW	1	1 kg	kg	5.06E-01	5.06E-01	4.00E-04	4.79E-01	4.78E-01	4.01E-04
barley, 보리 (캐나다)	barley production   barley grain   Cutoff, S, CA-QC	1	1 kg	kg	6.43E-01	6.42E-01	7.35E-04	5.94E-01	5.93E-01	7.36E-04
corn, 옥수수 (해외 기타)	sweet corn production   sweet corn   Cutoff, S, RoW	1	1 kg	kg	3.08E-01	2.04E-01	1.04E-01	3.00E-01	1.95E-01	1.04E-01
corn, 옥수수 (미국)	sweet corn production   sweet corn   Cutoff, S, US	1	1 kg	kg	1.97E-01	1.95E-01	1.63E-03	1.89E-01	1.87E-01	1.63E-03
soybean oil(crude), 대두유 (해외 기타)	soybean meal and crude oil production   soybean oil, crude	1	1 kg	kg	8.16E+00	9.98E-01	7.16E+00	8.12E+00	9.46E-01	7.18E+00
soybean oil(crude), 콩기름 (해외 기타)	soybean meal and crude oil production   soybean oil, crude	1	1 kg	kg	8.16E+00	9.98E-01	7.16E+00	8.12E+00	9.46E-01	7.18E+00
palm oil(crude), 미정제 Palm Oil (해외 기타)	palm oil mill operation   palm oil, crude   Cutoff, S, RoW	1	1 kg	kg	1.43E+00	4.08E-01	1.02E+00	1.40E+00	3.77E-01	1.02E+00
rape oil, 유채유 (해외 기타)	market for rape oil, crude   rape oil, crude   Cutoff, S, RoW	1	1 kg	kg	1.71E+00	1.70E+00	2.26E-03	1.60E+00	1.59E+00	2.27E-03
cottonseed oil, 면실유 (해외 기타)	market for cottonseed oil, crude   cottonseed oil, crude   Cuto	1	1 kg	kg	2.20E+00	1.92E+00	2.78E-01	2.14E+00	1.87E+00	2.78E-01
Corn grain, 옥수수 낱알 (아르헨티나)	maize grain production   maize grain   Cutoff, S, AR	1	1 kg	kg	1.18E+00	3.07E-01	8.69E-01	1.16E+00	2.87E-01	8.74E-01
Corn grain, 옥수수 낱알 (미국)	maize grain production   maize grain   Cutoff, S, US	1	1 kg	kg	4.41E-01	4.41E-01	2.75E-04	4.25E-01	4.25E-01	2.75E-04
Corn grain, 옥수수 낱알 (브라질)	market for maize grain   maize grain   Cutoff, S, BR	1	1 kg	kg	2.77E-01	2.77E-01	2.24E-04	2.62E-01	2.61E-01	2.28E-04
barley, 보리 (캐나다)	barley production   barley grain   Cutoff, U (copy) - LCI, kr (m)	1	1 kg	kg	5.06E-01	5.06E-01	4.00E-04	4.79E-01	4.78E-01	4.01E-04
Palm Fatty Acid Distillate(PFAD), 팜지방산 디스틸레이트	fatty acid production, from palm oil   fatty acid   Cutoff, U (co)	1	1 kg	kg	2.77E+00	7.13E-01	2.06E+00	2.75E+00	6.85E-01	2.07E+00

바이오에너지 탄소발자국 시뮬레이터 개발자는 향후 본 Sheet와 “DB.GHG배출계수” sheet를 활용하여 추가하고자 하는 원자재, 부자재, 운송, 유틸리티, 에너지, 폐기물에 대한 온실가스 배출계수를 산정하여 이를 사용자 sheet에 연계할 수 있을 것이다.

## 2.3 온실가스 기초자료 추가 기능

“온실가스 기초자료” sheet는 IPCC 가이드라인 기준 기본배출계수는 연료별 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 배출계수와 연료별 순 발열량 정보가 입력되어 있다. 이 배출계수 정보와 Greenhouse gas protocol의 특성화계수를 사용하여, 연료별 연소 배출계수를 산정할 수 있다. 향후 IPCC 가이드라인에서 제시하고 있는 연료원별 배출계수가 변경되거나, 온실가스 중 특성화계수가 변경/추가될 경우 본 Sheet를 활용할 수 있다.

## 제 3 절 탄소발자국 시뮬레이터 검증

본 절에서는 개발된 시뮬레이터로부터 도출된 바이오에너지 탄소발자국 시뮬레이터에 대한 타당성을 검증하기 위하여 기존 연구의 CFP 결과값을 조사하여 비교평가를 수행하였다. 비교군으로써 PFAD(Palm fatty Acid Distillate) 기반의 바이오디젤에 대한 탄소발자국을 산정한 H. Xu et al.(2020)<sup>62)</sup>의 결과를 활용하였다. 또한, 시뮬레이터 사용자가 바이오에너지 생산공정의 투입·산출물에 대한 문헌조사 또는 현장 데이터 수집을 통하여 GtG 데이터 작성하고, 시뮬레이터에서 산출된 CFP 값을 해석하는 과정을 중심으로 기술하였다.

### 1. 시뮬레이터 검증을 위한 PFAD 기반 바이오디젤 생산 기술

#### 1.1 연구범위 및 시스템경계

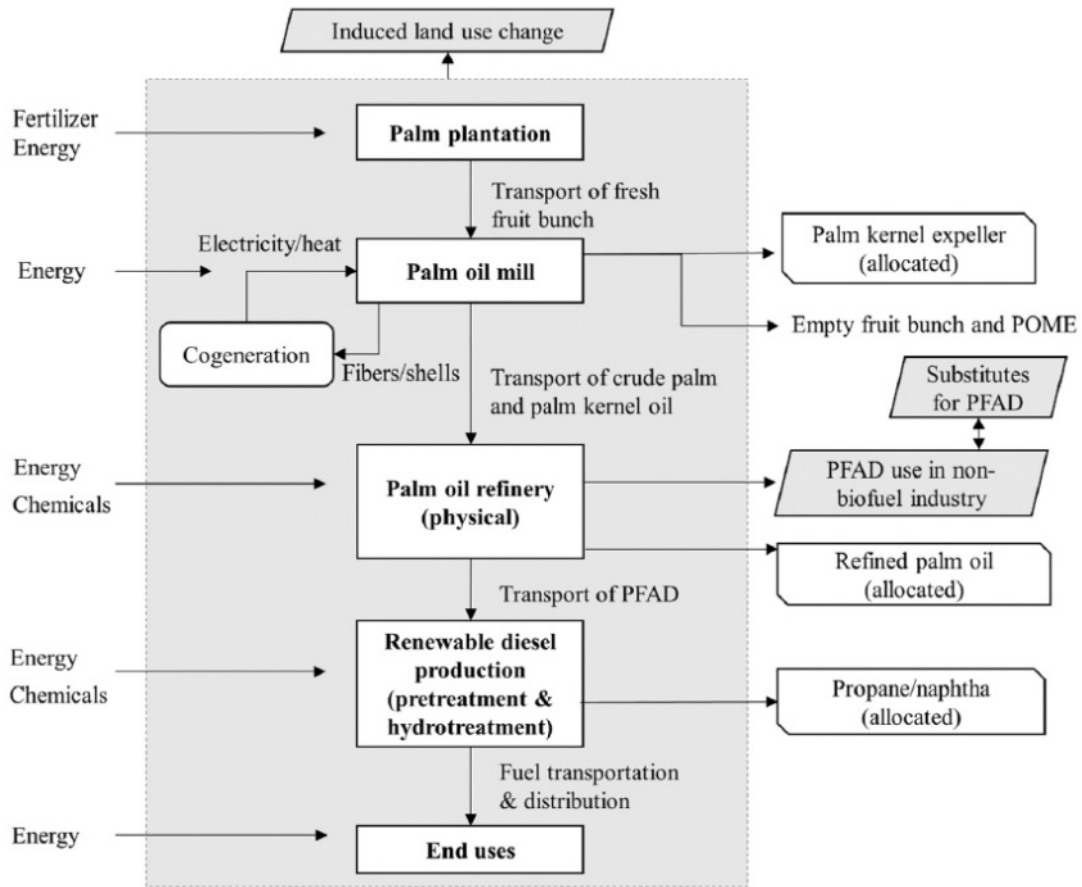
시뮬레이터로부터 도출된 전과정 탄소발자국 결과값에 대한 평가를 위하여 시뮬레이터에 적용된 바와 같이 기능단위는 1km 주행 시 사용되는 바이오에너지 사용(연소)으로 정의하였다.

바이오에너지 시스템경계는 시뮬레이터에 적용된 Cradle to Grave와 동일한 시스템경계를 적용한 문헌을 조사하였다. 문헌조사를 통하여 시뮬레이터와 동일한 시스템경계를 적용한 화석 기반 에너지 및 바이오에너지 탄소발자국 결과값에 대한 비교평가 문헌을 선정하였다.

H. Xu et al.(2020) 은 PFAD를 사용한 바이오디젤의 전과정 탄소발자국을 산정하였다. 정의된 시스템경계는 바이오매스(feedstock) 생산(재배) 또는 수집 단계, 수송, 바이오에너지 생산공정 및 사용(연소)단계까지를 포함한다 ([그림 4-15]).

62) H. Xu, U. Lee, M. Wang(2020), "Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions of palm fatty acid distillate derived renewable diesel", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 134

[그림 4-15] PFAD를 사용한 바이오디젤 시스템경계



출처 : H. Xu et al.(2020)

PFAD는 crude palm oil 정제과정에서 발생하는 부산물(co-product)이며, 중량 기준으로 FFA(Free Fatty Acid) 80% 이상, triglyceride 약 5~15% 등으로 구성되어 있다. PFAD는 crude palm oil 정제과정 내의 물리적 공정에 의해서 발생하기 때문에 화학적 정제공정에 비해 상대적으로 낮은 생산비용 및 높은 oil 수율(yield)을 얻을 수 있기 때문에 전 세계 팜 오일 공장의 90% 이상이 물리적 공정을 사용하여 PFAD를 생산하고 있다.

## 1.2 투입/산출 데이터 입력

PFAD를 사용한 바이오디젤 생산공정은 전처리(pretreatment) 후 수첨처리(hydrotreating) 공정을 통해 생산된다. 조사된 문헌에 나타난 바이오디젤 생산공정 GtG 데이터를 사용하여 1kg PFAD 기반 바이오디젤 생산 시 투입·산출물별 수량으로 환산하였다. 이때, 본 기술은 2개의 공정이 연결되어 있으므로 공정을 합하여 전체공정에서 투입 및 산출되는 데이터로 변환하는 작업을 수행하였다.

&lt;표 4-1&gt; PFAD를 사용한 바이오디젤 생산공정 GtG 데이터

물질명	단위	수량
<b>Pretreatment</b>		
<i>Inputs</i>		
Raw PFAD	kg/kg RD	1.21
Bleaching earth	kg/kg RD	0.003
Electricity	kWh/kg RD	0.0139
Natural gas	MJ/kg RD	0.657
<i>Outputs</i>		
Treated PFAD	kg/kg RD	1.18
Solid waste	kg/kg RD	0.03
<b>Hydrotreating process</b>		
<i>Inputs</i>		
Treated PFAD	kg/kg RD	1.18
Hydrogen	kg/kg RD	0.038
Electricity	kWh/kg RD	0.106
Natural gas	MJ/kg RD	0.025
Process water	kg/kg RD	0.208
<i>Outputs</i>		
Renewable diesel	kg	1
Bio-propane	kg/kg RD	0.061
Bio-naphtha	kg/kg RD	0.005
<b>Process aggregation</b>		
<i>Inputs</i>		
Raw PFAD	kg/kg RD	1.21
Bleaching earth	kg/kg RD	0.003
Electricity	kWh/kg RD	0.1199
Natural gas	MJ/kg RD	0.682
Hydrogen	kg/kg RD	0.038
Process water	kg/kg RD	0.208
<i>Outputs</i>		
Renewable diesel	kg	1
Bio-propane	kg/kg RD	0.061
Bio-naphtha	kg/kg RD	0.005
Solid waste	kg/kg RD	0.03

<표 4-1>의 PFAD 사용 바이오디젤 생산공정 투입·산출물 항목 및 환산된 수량을 시뮬레이터의 투입·산출물 입력 표에 입력하였다 ([그림 4-16]). 산출물로는 바이오디젤 외에 부산물(co-product)로 바이오프로판과 바이오납사가 생산되며 에너지 함량 기준 할당을 적용하기 위하여 저위발열량 값을 조사<sup>63)</sup>하여 입력하였다. 발생하는 고형폐기물의 경우 소각/매립폐기물로 가정하여 작성하였다.

[그림 4-16] 바이오디젤 생산공정 투입·산출물 데이터

구분	분류	물질명	단위	수량	저위발열량
					발열량(MJ/kg)
투입물	원자재	Palm Fatty Acid Distillate(PFAD)	kg	1.210000	-
	원자재	선택없음	kg	0.000000	-
	원자재	선택없음	kg	0.000000	-
	원자재	선택없음	kg	0.000000	-
	원자재	선택없음	kg	0.000000	-
	부자재	Hydrogen(liquid)	kg	0.038000	-
	부자재	Sodium Hydroxide (100% 기준)	kg	0.000000	-
	부자재	Phosphoric acid (industria gra	kg	0.000000	-
	부자재	선택없음	kg	0.000000	-
	유틸리티	용수(deionised)	kg	0.208000	-
	유틸리티	선택없음	kg	0.000000	-
	에너지	천연가스	Nm3	0.014956	-
	에너지	전기	kWh	0.117780	-
	에너지	선택없음	kg	0.000000	-
산출물	제품	바이오 디젤	kg	1.000000	37.5
	부산물	바이오 프로판	kg	0.060100	46.4
	부산물	바이오 납사	kg	0.005200	44.9
	부산물	직접 입력	kg	0.000000	0.0
	부산물	직접 입력	kg	0.000000	0.0
	폐기물	폐수 발생량	m3	0.000000	-
	폐기물	소각/매립 폐기물	kg	0.030000	-
	폐기물	재활용 폐기물	kg	0.000000	-
	대기배출물	Carbon dioxide, fossil	kg	0.00E+00	-
	대기배출물	Carbon dioxide, non-fossil	kg	0.00E+00	-
	대기배출물	Carbon dioxide, from soil or bio	kg	0.00E+00	-
대기배출물	Carbon dioxide, to soil or bioma	kg	0.00E+00	-	
대기배출물	Methane, fossil	kg	0.00E+00	-	
대기배출물	Methane, non-fossil	kg	0.00E+00	-	
대기배출물	Dinitrogen monoxide	kg	0.00E+00	-	
합계					

저위발열량 기준 바이오디젤, 바이오프로판, 바이오납사별 환경부하 할당 인자는 92.5%, 6.9%, 0.6%로 각각 나타났다(<표 4-2>).

<표 4-2> 산출물별 환경부하 할당 인자

산출물	물질명	단위	수량	구성비(%)
제품	바이오디젤	MJ	3.75E+01	92.5%
부산물	바이오프로판	MJ	2.79E+00	6.9%
부산물	바이오납사	MJ	2.33E-01	0.6%

63) Engineering ToolBox, (2003). Fuels - Higher and Lower Calorific Values. [online] Available at: [https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d\\_169.html](https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html) 2022. 11. 01 접속



## 2. 결과 비교를 통한 검증

### 2.1 시뮬레이터를 활용한 탄소발자국 산정 결과

시뮬레이터의 투입·산출물 입력 표를 기반으로 산정된 바이오디젤의 주원료인 PFAD 생산 단계에서의 전과정 탄소발자국은 1kg 바이오디젤 생산 기준 약 3.29kgCO<sub>2</sub>-eq가 발생하는 것으로 나타났다. 그 중 PFAD생산의 원료인 Palm 재배과정에서 발생하는 토지이용변화(Land Use Change, LUC)로 인해 발생하는 온실가스 배출이 차지하는 비율은 약 70%로 매우 높게 나타났다. 많은 Palm 오일 기반 바이오디젤에 대한 전과정 평가 문헌에서 palm tree 주요 생산국인 말레이시아와 인도네시아에서 palm 재배로 인하여 유발되는 토지이용변화 관련 온실가스 배출이 매우 크다는 결과를 고려하였을 때 시뮬레이터의 토지이용변화로 인한 높은 탄소발자국 결과값도 유사한 결과를 보임을 알 수 있다.

[그림 4-17] PFAD 제조단계 CFP

제조단계	탄소발자국(CFP)				
	Feedstock production			연료 제조	합계
	Production	LUC	운송		
kg CO <sub>2</sub> eq	7.48E-01	2.26E+00	0.00E+00	2.13E-01	3.22E+00
가능단위	바이오 디젤	1.00E+00	kg		

바이오 디젤 1kg 제조(생산) 시 탄소발자국은 약 3.22E+00 kg CO<sub>2</sub>eq가 발생합니다.

[그림 4-18]의 “기타 CFP” 표에 나타난 바이오디젤 생산공정에 대한 투입물질별로 기여도를 보면 수첨공정에 투입되는 수소생산에 대한 CFP가 가장 높은 것으로 나타났으며(0.088kgCO<sub>2</sub>-eq./kg 바이오디젤), 다음으로 전처리와 수첨공정에 사용되는 전기 생산에 대한 CFP(0.082kgCO<sub>2</sub>-eq./kg 바이오디젤), 고품폐기물 처리공정(0.02kgCO<sub>2</sub>-eq./kg 바이오디젤) 등의 순으로 나타났다.

[그림 4-18] 투입·산출물질별 탄소발자국 결과

물질명	단위	수량	저위발열량		원자재 CFP			기타 CFP		
			발열량(MJ/kg)		Feedstock production	LUC	운송	Total	운송	연료연소
Palm Fatty Acid Distillate(PFAD, 100% 기준)	kg	1.180000	-	-	8.08E-01	2.44E+00	0.00E+00			
선택없음	kg	0.000000	-	-	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00			
선택없음	kg	0.000000	-	-	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00			
선택없음	kg	0.000000	-	-	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00			
선택없음	kg	0.000000	-	-	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00			
Hydrogen(liquid)	kg	0.038000	-	-				8.84E-02	0.00E+00	0.00E+00
Sodium Hydroxide (100% 기준)	kg	0.000000	-	-				0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Phosphoric acid (industria grade)	kg	0.000000	-	-				0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
선택없음	kg	0.000000	-	-				0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
물수(deionised)	kg	0.208000	-	-				9.65E-05	0.00E+00	0.00E+00
선택없음	kg	0.000000	-	-				0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
천연가스	Nm3	0.014956	-	-				6.99E-03	0.00E+00	3.24E-02
전기	kWh	0.117780	-	-				8.18E-02	0.00E+00	0.00E+00
선택없음	kg	0.000000	-	-				0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
바이오 디젤	kg	1.000000	37.5	-						
바이오 프로판	kg	0.060100	46.4	-						
바이오 납사	kg	0.005200	44.9	-						
직접 입력	kg	0.000000	0.0	-						
직접 입력	kg	0.000000	0.0	-						
폐수 발생량	m3	0.000000	-	-				0.00E+00	0.00E+00	
소각/매립 폐기물	kg	0.030000	-	-				2.08E-02	0.00E+00	
재활용 폐기물	kg	0.000000	-	-				0.00E+00	0.00E+00	
Carbon dioxide, fossil	kg	0.00E+00	-	-				0.00E+00	0.00E+00	
Carbon dioxide, non-fossil	kg	0.00E+00	-	-				0.00E+00	0.00E+00	
Carbon dioxide, from soil or bi	kg	0.00E+00	-	-				0.00E+00	0.00E+00	
Carbon dioxide, to soil or biom	kg	0.00E+00	-	-				0.00E+00	0.00E+00	
Methane, fossil	kg	0.00E+00	-	-				0.00E+00	0.00E+00	
Methane, non-fossil	kg	0.00E+00	-	-				0.00E+00	0.00E+00	
Dinitrogen monoxide	kg	0.00E+00	-	-				0.00E+00	0.00E+00	
					8.08E-01	2.44E+00	0.00E+00	1.98E-01	0.00E+00	3.24E-02

연료 사용단계의 CFP 값은 바이오디젤을 연소하여 1km 주행 시 약 0.0006kgCO<sub>2</sub>-eq.가 발생하는 것으로 나타났다. 연료 사용단계를 포함한 PFAD 기반 바이오디젤 전과정 CFP 값은 0.277kgCO<sub>2</sub>-eq./km로 나타났으며, 토지이용변화로 인한 CFP 값이 약 70%, feedstock 생산공정이 23%, 바이오디젤 제조공정이 6%를 차지하는 것으로 나타났다([그림 4-19]).

[그림 4-19] PFAD 사용 바이오디젤 전과정 CFP

전과정 CFP 비교 (바이오 vs. 화석 기반)

구분	단위	바이오 디젤	경유(화석연료)
Feedstock production	kg CO2eq/FU	6.44E-02	
LUC	kg CO2eq/FU	1.94E-01	
운송	kg CO2eq/FU	0.00E+00	
제조단계	kg CO2eq/FU	1.79E-02	3.54E-02
사용단계	kg CO2eq/FU	5.51E-04	2.34E-01
합계	kg CO2eq/FU	2.77E-01	2.70E-01

## 2.2 탄소발자국 비교 결과

시뮬레이터에서 산출된 바이오디젤의 CFP 값은 H. Xu et al.(2020)의 연구에서의 바이오디젤 CFP 값과 비교를 위하여 “1MJ 바이오디젤 당 CFP(gCO<sub>2</sub>-eq.)” 로 환산하였다.

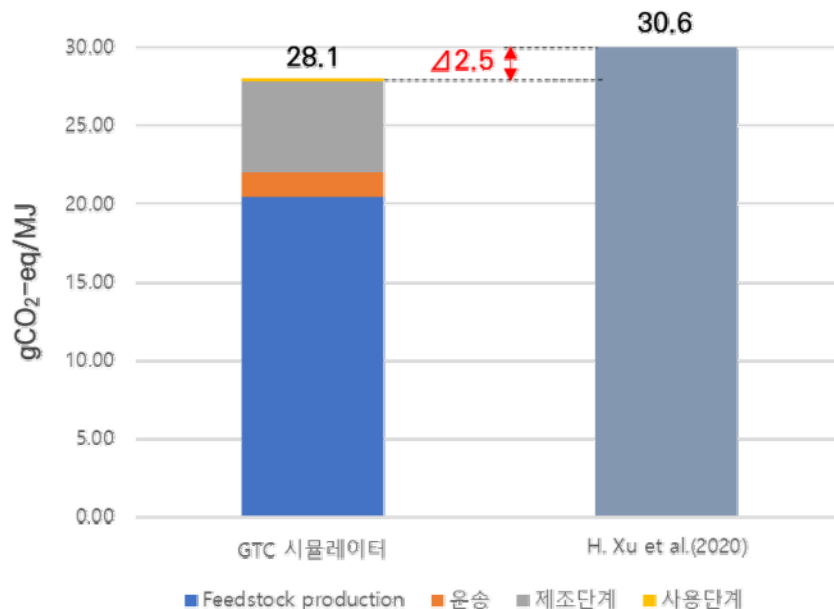
[그림 4-20]에 나타난 것과 같이 H. Xu et al.(2020)의 PFAD 기반 바이오디젤 CFP 산정 결과값은 30.6gCO<sub>2</sub>-eq/MJ로 제시되었다. 본 결과값에는 토지이용변화와 관련된 온실가스 배출량 산정값이 포함되지 않았는데, 토지이용변화 관련 온실가스 배출량을 산정하는

모델별 사용된 변수와 모델링 방법 차이로 인해 1MJ 바이오디젤 당 29~231gCO<sub>2</sub>-eq.의 큰 차이를 보이기 때문이다. 따라서, 시뮬레이터의 PFAD 바이오디젤 CFP와의 결과값 비교를 위해서 토지이용변화 관련 온실가스 배출량을 제외하고 환산하였다.

그 결과 H. Xu et al.(2020)의 연구에서의 CFP 값은 30.6gCO<sub>2</sub>-eq/MJ로 나타났으며, 시뮬레이터 산출 CFP 값은 28.1gCO<sub>2</sub>-eq/MJ로 유사한 결과를 보이므로 본 연구에서 개발한 시뮬레이터가 타당하다고 판단된다.

다만, 2.5gCO<sub>2</sub>-eq.의 CFP 값 차이가 발생하는 가장 근본적인 원인은 시뮬레이터와 H. Xu et al.(2020)의 연구에서 사용한 PFAD 생산에 대한 LCI DB가 다른 데에 있다. 시뮬레이터에 사용된 PFAD 생산에 대한 LCI DB에서는 할당이 적용되지 않았지만, H. Xu et al.(2020)의 연구에서는 PFAD가 생산되어 바이오디젤 생산공정에 투입되기 이전 공정에서 발생한 by-product 및 co-product에 대한 할당이 적용되었기 때문이다.

[그림 4-20] PFAD 바이오디젤 CFP 비교



## 2.3 비전문가용 탄소발자국 시뮬레이터 효과성

기존 LCA 시뮬레이터 대비 본 연구에서 개발한 시뮬레이터의 효과성을 제시하기 위하여 <표 4-1>에서 제시한 바이오디젤 생산기술의 투입/산출량을 본 시뮬레이터 및 SimaPro에 입력하여 소요시간을 기준으로 효과성을 입증하고자 하였다. 본 시뮬레이터를 활용하여 결과값을 도출하는 데에는 약 5분이 소요되었으며, SimaPro를 활용할 경우 약 15분이 소요됨으로써 3배 정도의 시간을 단축할 수 있었다. SimaPro의 경우 실제 데이터 입력 후 LCI DB 연결을 위해 DB를 검색하고 이를 확정하는데 상대적으로 많은 부분 시간이 소요되기 때문이다. 따라서 본 연구에서 개발한 시뮬레이터가 현재 개발되어 있는 범용 시뮬레이터 보다 바이오에너지 기술에 대하여 탄소발자국 산정 시 효과적이라고 판단된다.



## 제5장 결론 및 향후 계획



## 제 5 장 결론 및 향후 계획

### 제 1 절 결론

본 연구는 탄소중립에 기여 가능할 것으로 예상되는 유망 기술분야를 대상으로 LCA 기법을 적용한 온실가스 배출량 산정 시뮬레이터의 신규 개발과 정책적 활용방안 제시를 목적으로 하고 있다. 해당 연구는 온실가스 감축 분야 내 에너지 생산 부문 기술 중 대표 1개 분야(바이오에너지)를 대상으로 탄소발자국 산정을 위한 신규 시뮬레이터 프로토타입을 제시하는 것을 1차년도 목표로 설정하고 있다. 이를 위하여 ① 탄소발자국 산정방법론 및 국제표준화·정책·시뮬레이터 개발 동향분석을 통해 R&D 단계에서의 탄소발자국 시뮬레이터 개발의 방향성을 제안하였고, ② 바이오에너지를 중심으로 시뮬레이터에 반영할 6개 대상기술 선정, ③ 심층 문헌조사 및 전문가 설문조사를 통한 바이오에너지 주요 투입/산출 항목 확보, ④ LCI DB 조사를 통하여 탄소발자국 계산을 위한 연계 방안을 마련하고 최종적으로 ⑤ 바이오에너지 탄소발자국 시뮬레이터를 개발하였다.

연구 필요성 도출에 따른 기술범위 및 사용자를 정의하자면, 기술범위는 바이오에너지 6개 기술로 한정하였고, 주 사용자는 탄소발자국 및 LCA에 대한 전문지식이 없는 바이오에너지 기술개발 전문가로 설정하였다. 본 연구 추진을 위해서 국가녹색기술연구소는 탄소발자국 시뮬레이터 개발을 위한 기반을 구축하고 LCA에 대한 전문지식이 없는 바이오에너지 기술개발 종사자들을 위한 시뮬레이터 개발 방향성을 제시하고자 하였다. 이러한 배경에서 본 연구에서는 연구대상 기술에 대한 탄소발자국 선행연구를 조사·분석하여 LCI DB 연계 방안을 제시하였다. 본 시뮬레이터 개발은 국내에서 개발사례가 없을 정도로 신규성이 매우 강한 특징을 갖고 있으며, 개발 과정 및 결과에 대한 공신력 확보가 가장 중요한 요소이다. 따라서 연구수행 과정에서의 적정성 및 연구결과의 효과성 제고를 위한 외부전문가 및 위탁기관과의 공조체제를 구축하였다.

본 연구에서 개발한 바이오에너지 탄소발자국 시뮬레이터는 6개(바이오 고형연료, 바이오가스, 바이오디젤, 바이오중유, 바이오휘발유, 바이오항공유)기술에 대하여 바이오에너지 R&D 기술개발 전문가가 투입물 및 배출물에 대한 정보만 입력하면 전과정 단계별 탄소발자국을 산정하는 기능을 가진다. 또한 기존기술(화석연료기반 연료) 및 신기술(바이오에너지 기술)에 대하여 동일한 기준으로 탄소발자국 감축효과를 산정 할 수 있는 기능을 포함하고 있다.

앞서 설명한 기능을 구현하기 위하여, 시뮬레이터 사용자 부문과 개발자 부문으로 나누어 개발하였다. 시뮬레이터 사용자의 경우 바이오에너지 생산공정에서 주요 투입물 및 산출물에 대한 정보를 입력하고, 에너지 전환 효율만 입력하면 탄소발자국 결과값이 도출될 수 있도록 설계하였다. 이는 현재 개발되어 있는 탄소발자국 및 LCA 시뮬레이터와 다르게 기능단위, 할당방법, LCI DB 등에 대한 정보를 사전에 시뮬레이터에 반영함으로써 비전문가가 별도 선택 없이 사용할 수 있다는 점에서 차별성을 가진다. 또한 시뮬레이터에

개발자가 활용할 수 있는 부분을 따로 설계함으로써 향후 추가하고자 하는 원자재, 부자재, 운송, 유틸리티, 에너지, 폐기물 등에 대한 온실가스 배출량의 확장성을 고려하였다.

<표 5-1> 본 연구 및 기존 탄소발자국 시뮬레이터 개발 사례 간 비교분석

구분	시뮬레이터	용도	데이터 입력	할당 방법	기능단위
LCA	Simapro	전문가용	공정 및 전과정 단계별 입력 및 DB 직접 선택	직접 할당계수 입력	직접 입력
	GaBi	전문가용		물리적 특성 및 경제적 가치 선택 가능	
	ezEPD	전문가/인증담당자용		직접 할당하여 데이터 입력	
탄소 발자국	GREET	전문가용	Sheet별(40~50개) 투입/산출 작성	대체, 에너지, 시장가격, 질량 중 선택	MJ, km 단위로 산정
	GHGenius	전문가용		대체, 에너지, 질량 중 선택	
	태양광 모듈 시뮬레이터	비전문가용 인·검증담당자용	단일 공정 입력	해당 사항 없음	kW 단위로 산정
	바이오에너지 시뮬레이터(GTC)	비전문가용	단일 공정 입력 및 DB 선택 효율화	저위발열량 입력 시 자동 할당	MJ, km 단위로 산정

본 연구에서 개발한 바이오에너지 탄소발자국 시뮬레이터의 타당성 검증하기 위하여 PFAD 기반의 바이오디젤에 대한 탄소발자국을 산정한 연구논문과 비교분석하였다. 연구논문에서의 CFP 값은 30.6g CO<sub>2</sub>-eq/MJ로 나타났으며, 시뮬레이터 산출 CFP 값은 28.1g CO<sub>2</sub>-eq/MJ로 유사한 결과를 보이므로 본 연구에서 개발한 시뮬레이터가 타당하다고 판단하였다.

최종적으로 본 연구에서 개발한 탄소발자국 시뮬레이터는 정부 차원에서 탄소중립 국가전략 이행을 위한 온실가스 배출 모델 적용 방향을 제시할 수 있을 것이다. 본 시뮬레이터를 활용하여 석유기반 연료 및 기존 바이오에너지 기술과 신기술에 대하여 LCA를 기반으로 국내 탄소중립의 효과성을 정량화할 수 있을 것으로 기대된다. 특히, 정부출연연구소 부문에서 R&D 단계에 있는 바이오에너지 기술에 대하여 온실가스 감축효과를 선제적으로 제시함으로써 향후 정책입안자의 의사결정에 이바지할 수 있을 것이다.

또한 본 연구 결과의 대내외 확산을 통하여 향후 R&D 사업기획에도 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 이는 탄소중립기본법 제24조 ‘온실가스감축인지 예산제도’와 연계하여 향후 국가연구개발사업 시행 시 온실가스 감축목표 및 예산을 연동하는 탄소인지 기반 R&D 기획에 적용 가능하기 때문이다.



## 제 2 절 향후 계획

본 사업 2차년도에는 두 가지 주요 방향성에 맞춰 탄소발자국 시물레이터를 개선하고자 한다.

첫 번째로, 현재 개발한 바이오에너지 탄소발자국 시물레이터의 고도화이다. 앞서 설명한 바와 같이 조사된 바이오매스(Feedstock) 중 7개와 부자재 23개의 경우 LCI DB 부재로 인하여 시물레이터에 반영하지 못하였다. 특히 현재 1, 2세대 바이오매스의 경우에는 많은 부분 고려가 되어 있지만 3세대 바이오매스의 경우에는 반영되지 못한 실정이다. 따라서 2차년도에는 Ecoinvent 및 Agrifootprint DB뿐만 아니라, 다양한 DB, 문헌, 전문가 활용을 통하여 시물레이터 내 다양한 DB를 내재하고자 한다. 추가적으로 국내에서 생산되는 바이오매스의 경우 현재는 기존 구축되어 있는 해외 DB를 국내화하여 연계하였으나 한국환경산업기술원 주도로 제/개정하고 있는 국내 LCI DB와 향후 연계 예정이다. 또한 시물레이터 추가 검증은 위하여 바이오에너지 기술개발을 진행하고 있는 정부출연연구소와 협업을 통하여 바이오에너지 기술별 데이터를 확보하고 이를 본 시물레이터 및 범용 소프트웨어(SimaPro)를 활용하여 값을 검증할 예정이다.

[그림 4-21] 환경산업기술원에서 제/개정 중인 LCI DB

### 1 국제 탄소규제 대응 전략 LCI DB 개발 계획

·LCI DB의 경우 (1단계)수출규제 및 기반산업 ⇒ (2단계) 탄소배출 및 수출상위품목 ⇒ (3단계) 탄소중립 이행

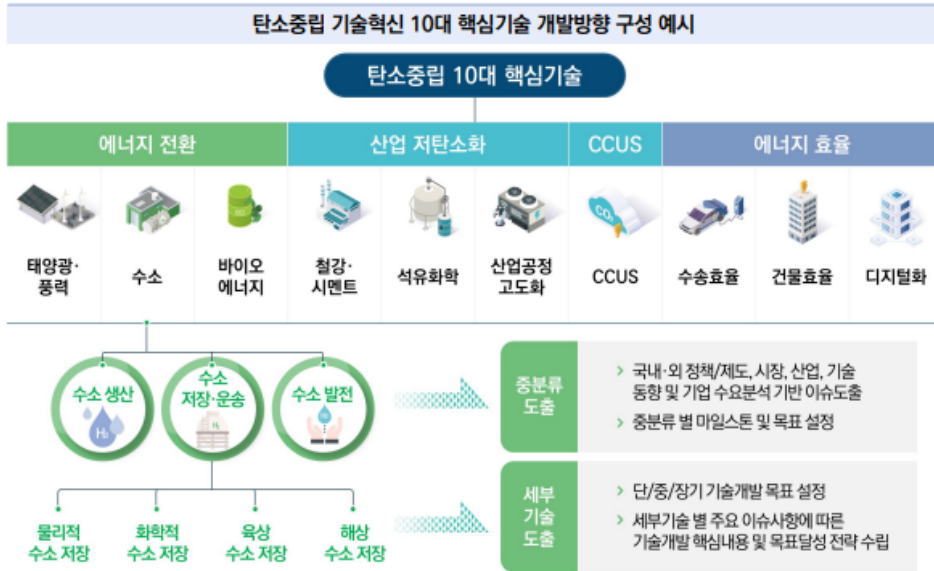
구분	년도	품목별 모듈 DB			
		DB 건수	모듈군	비고	
1단계	수출규제 및 기반산업	'22 (150개)	62	금속, 비금속 자원	모든 산업에서 사용
			16	수자원	
			33	에너지 및 연료	
			27	전기자동차 배터리 제품	탄소규제
			7	화학물질	탄소중립
			5	수소	
2단계	'23 (150개)	5	바이오제품	탄소중립	
		6	수송	모든 산업에서 사용	
		139	기초화학물질(유기, 무기계 등)		
		37	수송	모든 산업에서 사용	
	'24 (150개)	45	재활용 및 폐기	탄소규제	
		6	전기자동차 배터리 제품		
		47	플라스틱류		
		13	화학물질	탄소중립	
		2	탄소포집/활용		

출처 : 한국환경산업기술원, 국제 제품 탄소규제 대응 연구용역 설명회 발표자료, 2022

두 번째로, 다양한 탄소중립 유망기술들을 대상으로 한 탄소발자국 시물레이터 개발 영역의 확장이다. 1차년도에 개발한 탄소발자국 시물레이터는 기술개발 과정에서의 정량적 CO<sub>2</sub> 산정을 위한 프레임워크 구축에 초점을 맞추고 있으며, 이를 적용하기 위한 대표기술 적용에 초점을 두었다. 그러나 탄소중립과 관련한 전환, 산업, 교통, 건물 영역에서의 기술개발 수요가 증가할 것이며, 이를 환경적 측면에서의 기여도 측정을 위한 탄소발자국 시물레이터의 지속적 개발과 확장이 필요한 상황이다. 이러한 정책 수요에 부응하여,

「탄소중립 기술혁신 추진전략(’21.3)」에 제시된 핵심기술들을 아우를 수 있도록 탄소발자국 시뮬레이터를 분야별로 확장하고 기존에 개발된 시뮬레이터를 개선 및 고도화 작업을 추진하여 신뢰성을 제고할 계획이다.

[그림 4-22] 탄소중립 기술혁신 10대 핵심기술



출처 : 탄소중립 기술혁신 추진전략(’ 21.3)

# 참 고 문 헌

## [국내 문헌]

- 1) 기획재정부 (2020), 「2050 탄소중립 추진전략」
- 2) 김동구 · 손인성(2021), 「유럽 그린딜 내 탄소국경세 도입 시 글로벌 가치사슬 영향 및 국내 대응방안 연구」, 『에너지경제연구원』
- 3) 배정환 (2006), 「바이오연료의 보급전망과 사회적 비용편익 분석」, 『에너지경제연구원』
- 4) 산림청(2019), 「산림바이오매스 SRF(고형연료) 제조업\_전체 원재료 조달방법별 구입량」, 『목재이용실태조사』
- 5) 이건모 · Atsushi Inaba(2004). Life Cycle Assessment ISO 14040 시리즈 실무지침, 무역/투자 위원회
- 6) 장영욱 · 오태현(2021), 「EU 탄소감축 입법안( 'Fit for 55' )의 주요 내용과 시사점」, 『KIEP 세계경제 포커스』, 4(44).
- 7) 조현하(2021), 「탄소중립 추진방안 및 관련 재정정책에 관련 국제적 비교 연구」, 『국회예산정책처』
- 8) 한국과학기술기획평가원 (2022), 「[KISTEP 브리프] 바이오연료」, 『기술동향브리프』
- 9) 한국전력공사(2021), 「8-3 행정구역별 신재생 발전설비 및 발전량 (2022)」, 『제90호 (2020) 한국전력통계』
- 10) 한국환경산업기술원(2022), 「국제 제품 탄소규제 대응 연구용역 설명회 발표자료」
- 11) 환경부 (n.d.), 「환경성적표지 작성지침(부속서 3) 표준향해거리표」

## [국외 문헌]

- 1) European Commission(2013), Commission Recommendation of 9 April 2013 on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations
- 2) European Commission(2017), Guidance for the development of Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs), version 6.3
- 3) European Commission(2020), Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020
- 4) European Commission(2021a), Commission Recommendation (EU) 2021/2279 of 15 December 2021 on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations
- 5) European Commission(2021b), Commission Recommendation on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations
- 6) European Parliament(2021), Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing a carbon border adjustment mechanism
- 7) European Parliament(2022a), New EU regulatory framework for batteries
- 8) European Parliament(2022b), Amendments adopted by the European Parliament on 22 June 2022 on the proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council establishing a carbon

border adjustment mechanism (COM(2021)0564 – C9-0328/2021 – 2021/0214(COD))

- 9) European Parliament(2022c), EU carbon border adjustment mechanism: Implications for climate and competitiveness
- 10) Lewis, M. et al.(2021), “Environmental Product Declaration Requirements in Procurement Policies” , Carbon Leadership Forum, University of Washington. Seattle, WA.
- 11) Partl, H. et al.(2021), Product Environmental Footprint (PEF)
- 12) United Nations Environment Programme(2022), All you need to know about PEF: A factsheet for businesses
- 13) White House(n.d.), The Federal Sustainability Plan: Catalyzing Clean Energy Industries and Jobs Through Federal Sustainability
- 14) Zampori, L. and Pant, R.(2019), Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, DOI:10.2760/424613
- 15) European Commission – Joint Research Centre – Institute for Environment and Sustainability (2010), “International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance. First edition,”
- 16) Aikaterini, K., et al.(2020). “Life Cycle Analysis of the Bioethanol Production from Food Waste—A Review,” *Energies* 13, no. 19: 5206. <https://doi.org/10.3390/en13195206>
- 17) Pereira, L. G., et al.(2019). “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*, 110, 1–12. doi:10.1016/j.rser.2019.04.043
- 18) Azapagic A and Stichnothe H.(2011). “3 - Life cycle sustainability assessment of biofuels” , Handbook of Biofuels Production, [tps://doi.org/10.1533/9780857090492.1.37](https://doi.org/10.1533/9780857090492.1.37)
- 19) Jeswani, H., et al.(2020). “Environmental sustainability of biofuels: a review,” *Proceedings of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences* 476(2243):20200351, DOI:10.1098/rspa.2020.0351
- 20) European Union (2018). “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(recast),” *Official Journal of the European Union*
- 21) Liu et al.(2018). “Life Cycle assessment of biofuels in China: Status and challenges” , *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 97, 301–322
- 22) Prasad, S., et al.(2020). “Sustainable utilization of crop residues for energy generation: A life cycle assessment(LCA) perspective” , *Bioresource Technology* 122964
- 23) H. Xu et al.(2020). “Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions of palm fatty acid distillate derived renewable diesel” , *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 110144
- 24) Council of the European Union(2022), Draft regulation of the European Parliament and of the Council establishing.
- 25) House of Representatives(2021), H.R.4534-AIR Transition and Competition Act.
- 26) Wolfgang Wimmer, Rainer Zust and Kun-Mo Lee(2004), ECODESIGN Implementation A Systematic

Guidance on Integrating Environmental Considerations into Product Development, Springer

[웹사이트]

- 1) 과학기술정보통신부(2021), *탄소중립 기술혁신 추진전략 발표*, 2022.10.26. 접속,  
<https://www.msit.go.kr/bbs/view.do?sCode=user&mId=113&mPid=112&pageIndex=&bbsSeqNo=94&nttSeqNo=3180091&searchOpt=ALL&searchTxt=>
- 2) 국가통계포털(KOSIS)(2022), *전국폐기물발생 및 처리현황(2018년~2020년)*, 2022.10.26. 접속,  
<https://kosis.kr/search/search.do>
- 3) 김홍현 · 이윤석 · 성시준(2021), *EU 탄소국경조정제도, 삼일회계법인 발표자료*, 2022.10.26. 접속,  
[https://www.pwc.com/kr/ko/publications/research-insights/samilpwc\\_eu-cbam.pdf](https://www.pwc.com/kr/ko/publications/research-insights/samilpwc_eu-cbam.pdf)
- 4) 대통령직속 국가과학기술자문회의(2021), *(첨부 3) (제17회 심의회의 2호 안건) 탄소중립 중점기술(안)*, 2022.10.26. 접속,  
[https://www.pacst.go.kr/jsp/council/councilPostView.jsp?post\\_id=2137&etc\\_cd1=COUN01&board\\_id=11#this](https://www.pacst.go.kr/jsp/council/councilPostView.jsp?post_id=2137&etc_cd1=COUN01&board_id=11#this)
- 5) 식품의약품안전처(2022), *식품및식품첨가물생산실적 시군구 허가품목(식용유지류)*, 2022.10.26. 접속,  
[https://stat.kosis.kr/statHtml\\_host/statHtml.do?orgId=145&tblId=TX\\_14503\\_A027&dbUser=NSI\\_IN\\_145](https://stat.kosis.kr/statHtml_host/statHtml.do?orgId=145&tblId=TX_14503_A027&dbUser=NSI_IN_145)
- 6) 안태호(2022), *‘2035년 내연기관차 등록 금지’ …윤 당선자 공약 현실화될까*, 2022.10.26. 접속,  
<https://www.hani.co.kr/arti/economy/car/1034419.htm>
- 7) 통계청(n.d.), *농작물생산조사*, 2022.10.26. 접속, [https://kostat.go.kr/portal/korea/kor\\_nw/1/8/8/index.board](https://kostat.go.kr/portal/korea/kor_nw/1/8/8/index.board)
- 8) 한국농정신문(2022), *충북도, 아열대작물 ‘카사바’ 최적 재배법 확립*, 2022.10.26. 접속,  
<http://www.ikpnews.net/news/articleView.html?idxno=48253#:~:text=%EC%9D%B4%EC%97%90%20%EC%B6%A9%EB%B6%81%EB%86%8D%EA%B8%B0%EC%9B%90%EC%9D%80%202019,%EB%A5%BC%20%EA%B0%9C%EB%B0%9C%ED%95%9C%20%EB%B0%94%20%EC%9E%88%EB%8B%A4>
- 9) 한국무역협회(2022), *인니 팜유 수출 금지령에 말레이시아 공급 늘린다*, 2022.10.26. 접속,  
<https://www.kita.net/cmmrcInfo/cmmrcNews/cmercNews/cmercNewsDetail.do?pageIndex=1&nIndex=1822698>
- 10) 한국환경산업기술(n.d.), *환경성적표지전용프로그램 (ezEPD)*, 2022.10.26. 접속, <https://ezepd.epd.or.kr/>
- 11) 한국환경산업기술원(n.d.), *환경성적표지 저탄소제품*, 2022.10.26. 접속,  
<https://www.greenproduct.go.kr/epd/epd/epdIntro04.do>
- 12) Argonne(n.d.), *GREET Model*, 2022.10.26. 접속, <https://greet.es.anl.gov/>
- 13) EUROACTIV(2022), *EU nations approve end to combustion engine sales by 2035*, 2022.10.26. 접속,  
<https://www.euractiv.com/section/transport/news/eu-countries-approve-end-to-combustion-engine-sales-by-2035/>
- 14) GaBi Solutions(n.d.), *GaBi*, 2022.10.26. 접속, <https://gabi.sphera.com/international/index/>
- 15) GHGenius(2022), *GHGenius*, 2022.10.26. 접속, <https://www.ghgenius.ca/>
- 16) International Organization for Standardization(n.d.a), *ISO/CD 14068 Greenhouse gas management and climate change management and related activities; Carbon neutrality*, 2022.10.26. 접속,  
<https://www.iso.org/standard/43279.html>
- 17) International Organization for Standardization(n.d.b), *ISO 14040:2006 Environmental management; Life cycle assessment; Principles and framework*, 2022.10.26. 접속, <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- 18) International Organization for Standardization(n.d.c), *ISO 14044:2006 Environmental management; Life cycle assessment; Requirements and guidelines*, 2022.10.26. 접속,

<https://www.iso.org/standard/38498.html>

- 19) International Organization for Standardization(n.d.d), *ISO 14067:2018 Greenhouse gases; Carbon footprint of products; Requirements and guidelines for quantification*, 2022.10.26. 접속, <https://www.iso.org/standard/71206.html>
- 20) International Organization for Standardization(n.d.f), *STANDARDS BYISO/TC 207 Environmental management*, 2022.10.26. 접속, <https://www.iso.org/committee/54808/x/catalogue/p/1/u/0/w/0/d/0>
- 21) International Organization for Standardization(n.d.g), *STANDARDS BYISO/TC 207/SC 3 Environmental labelling*, 2022.10.26. 접속, <https://www.iso.org/committee/54808/x/catalogue/p/1/u/0/w/0/d/0>
- 22) International Organization for Standardization(n.d.h), *STANDARDS BYISO/TC 207/SC 5 Life cycle assessment*, 2022.10.26. 접속, <https://www.iso.org/committee/54854/x/catalogue/>
- 23) International Organization for Standardization(n.d.i), *STANDARDS BYISO/TC 207/SC 7 Greenhouse gas and climate change management and related activities*, 2022.10.26. 접속, <https://www.iso.org/committee/546318/x/catalogue/>
- 24) Newburger, E.(2022), *California bans the sale of new gas-powered cars by 2035*, 2022.10.26. 접속, <https://www.cnn.com/2022/08/25/california-bans-the-sale-of-new-gas-powered-cars-by-2035.html>
- 25) Office of the Federal Chief Sustainability Officer(n.d.), *Federal Buy Clean Initiative*, 2022.10.26. 접속, <https://www.sustainability.gov/buyclean/>
- 27) OpenLCA(2022), *LCA Data*, 2022.10.26. 접속, <https://www.openlca.org/lca-data/>
- 28) SEA-DISTANCE.ORG(2022), *SEA-DISTANCE.ORG*, 2022.10.26. 접속, <https://sea-distances.org/>
- 29) Simapro(2022), *Simapro*, 2022.10.26. 접속, <https://simapro.com/>
- 30) United Nations Framework Convention on Climate Change(n.d.), *Global Climate Action*, 2022.10.26. 접속, <https://climateaction.unfccc.int/?coopinitid=94>

**[별 첨] 바이오에너지 기술별 투입/  
산출물 전문가 설문조사지**





[별 첨] 바이오에너지 기술별 투입/산출물 전문가 설문조사지

## 바이오에너지 탄소발자국 산정을 위한 기술별 투입/산출물 전문가 설문조사

안녕하십니까,

녹색기술센터에서는 주요사업으로 “탈탄소사회 구현을 위한 탄소발자국 기반 온실가스 배출량 산정 모형 개발” 연구를 수행하고 있습니다. 본 연구의 목표는 탄소중립 기술 대상 전과정평가(LCA) 중심의 온실가스 배출량 산정 프로토타입 시뮬레이터를 개발하는 것이며, 2022년에는 바이오에너지 기술에 대하여 시뮬레이터를 개발하고 있습니다.

바이오에너지 탄소발자국 시뮬레이터를 개발하기 위하여, 바이오에너지 기술별 주요 투입/산출 변수(항목)에 대한 조사가 필요합니다. 이에 따라 녹색기술센터와 (주)엔스타알앤씨에서는 바이오에너지 생산에 대한 심층 문헌조사를 바탕으로 주요 투입/산출 항목 리스트(안)을 아래 표와 같이 작성하였습니다.

그러나, 저희가 파악한 투입/산출 항목의 경우 대부분 과거에 이미 개발되어 현재 상용화된 기술을 반영하는 데이터가 필요한 것으로 판단되어, 각 바이오에너지 기술별 전문가분들께 투입/산출 항목 리스트에 대한 설문조사 의뢰를 드립니다. 전문가님께서서는 현재/미래의 기술개발 동향에 따른 바이오에너지 기술별 추가 또는 제외해야 하는 투입/배출 항목을 작성해주시면 감사하겠습니다.

아래 표에 제시된 투입물(inputs) 및 산출물(outputs) 항목을 중심으로 검토해주시고 수정 또는 추가 항목을 “전문가 검토 의견서” 부분에 작성 해 주시기 바랍니다.

문의	(주)엔스타알앤씨 배정한 본부장(02-6123-3241, 010-3393-3933, collin.jhbae@enstar.kr) 녹색기술센터 이종석 연구원(02-3393-3932, 010-5039-6125, jslee@gtck.re.kr)
----	---

검토위원

성함 : \_\_\_\_\_

문헌조사를 통해 구축한 바이오 고형연료(목재 펠릿) 생산 시 주요 투입/산출 리스트(안)

구분	세부구분	주요 항목 (투입/산출물)
투입물 (inputs)	주원료 (Feed)	sawdust, wet, measured as dry mass
		shavings, hardwood, measured as dry mass
		shavings, softwood, measured as dry mass
		wood chips, wet, measured as dry mass
	부원료	maize starch
		packaging film, low density polyethylene
		lubricating oil
	유틸리티	electricity, medium voltage
		heat, central or small-scale, other than natural gas
		Water, unspecified natural origin
산출물 (outputs)	제품	wood pellet, measured as dry mass
	부산물	-
	폐기물	waste mineral oil
	폐수	-

## 〈전문가 검토 의견서〉

1. 표에 제시된 투입물 중 수정 및 추가 해야 할 주원료(Biomass) 종류
2. 표에 제시된 투입물 중 수정 및 추가 해야 할 부원료 종류
3. 표에 제시된 투입물 중 수정 및 추가 해야 할 유틸리티 종류
4. 표에 제시된 산출물 중 수정 및 추가 해야 할 항목(부산물, 폐기물 등)

**참고자료**

**바이오매스별 바이오 고형연료 (목재 펠릿) 생산을 위한 투입/산출 항목**

<바이오 고형연료 - 목재 펠릿(wood pellet)>

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
투입물 (inputs)	주원료	sawdust, wet, measured as dry mass	0.57	kg
		shavings, hardwood, measured as dry mass	0.15	kg
		shavings, softwood, measured as dry mass	0.15	kg
		wood chips, wet, measured as dry mass	1.30E-01	kg
	부원료	maize starch	0.005	kg
		packaging film, low density polyethylene	0.00228	kg
		lubricating oil	8.40E-05	kg
	유틸리티	electricity, medium voltage	0.096	kWh
		heat, central or small-scale, other than natural gas	0.11232	MJ
		Water, unspecified natural origin	3.00E-05	m3
산출물 (outputs)		wood pellet, measured as dry mass	1	kg
		waste mineral oil	8.40E-05	kg

<표1> 문헌조사를 통해 구축한 “바이오가스” 생산 시 주요 투입/산출 리스트(안)

구분	세부구분	주요 항목 (투입/산출물)
투입물 (inputs)	주원료 (Feed)	sawdust, wet, measured as dry mass
		silage
	부원료	-
	유틸리티	electricity, low voltage
		heat, district or industrial, natural gas
		Water, river
산출물 (outputs)	제품	biogas, from grass
	부산물	protein feed, 100% crude (가축 사료) / grass fibre
	폐기물	solid residues to landfill
		raw digestate
	폐수	wastewater from grass refinery

<표2> 문헌조사를 통해 구축한 “바이오가스 정제를 통한 바이오 메탄가스” 생산 시 주요 투입/산출 리스트(안)

구분	세부구분	주요 항목 (투입/산출물)
투입물 (inputs)	주원료 (Feed)	biogas
	부원료	monoethanolamine
		silicone product
		potassium hydroxide
		sodium chloride, powder
		chemical, organic
		charcoal
		lubricating oil
		activated carbon, granular
		steel, chromium steel 18/8
		calcium carbonate
		nickel
		nitrogen
		rape methyl ester(RME)
		sodium hydroxide
		sulfuric acid
	zinc oxide	
	zeolite	
	유틸리티	electricity, low voltage
		heat, central or small-scale, natural gas
light fuel oil		
compressed air, 800 kPa gauge		
tap water		
산출물 (outputs)	제품	biomethane, high pressure
	부산물	-
	폐기물	heat(waste)
	폐수	

### 〈전문가 검토 의견서〉

1. 표에 제시된 투입물 중 수정 및 추가 해야 할 주원료(Biomass) 종류
2. 표에 제시된 투입물 중 수정 및 추가 해야 할 부원료 종류
3. 표에 제시된 투입물 중 수정 및 추가 해야 할 유틸리티 종류
4. 표에 제시된 산출물 중 수정 및 추가 해야 할 항목(부산물, 폐기물 등)

**참고자료**

**바이오매스별 바이오가스 및 바이오 메탄가스 생산을 위한 투입/산출 항목**

<바이오가스 생산 - grass 사용 >

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
투입물 (inputs)	주원료	grass, Swiss integrated production	0.3164	kg
	부원료	-		
	유틸리티	electricity, low voltage	0.0649	kWh
		heat, district or industrial, natural gas	1.0655	MJ
		Water, river	0.0015	m3
산출물 (outputs)		biogas, from grass	1	m3
		wastewater from grass refinery	0.0013	m3
		Water	2.31E-04	m3

<바이오 메탄가스 생산 by amino washing>

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
투입물 (inputs)	주원료	biogas	1.56492	m3
	부원료	monoethanolamine	1.23E-04	kg
		silicone product	3.64E-04	kg
		sodium chloride, powder	9.29E-05	kg
		chemical, organic	2.64E-05	kg
		charcoal	6.97E-04	kg
	유틸리티	electricity, low voltage	0.116	kWh
		heat, central or small-scale, natural gas	3.85E+00	MJ
		light fuel oil	2.79E-06	kg
		compressed air, 800 kPa gauge	0.00148	m3
tap water		7.58E-05	kg	
산출물 (outputs)		biomethane, high pressure	1	m3
		Heat, waste	4.15	MJ
		Carbon dioxide, non-fossil	1.02346	kg
		Hydrogen sulfide	9.80E-06	kg
		Methane, non-fossil	4.20E-04	kg
		Nitrogen	0.05877	kg
		Sulfur dioxide	5.52E-04	kg



<바이오 메탄가스 생산 by swing adsorption>

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
투입물 (inputs)	주원료	biogas	1.56492	m3
	부원료	charcoal	2.08E-04	kg
		potassium hydroxide	3.98E-06	kg
		lubricating oil	1.50E-04	kg
	유틸리티	electricity, low voltage	0.185629	kWh
산출물 (outputs)		biomethane, high pressure	1	m3
		Heat, waste	1.28	MJ
		Carbon dioxide, non-fossil	0.97457	kg
		Hydrogen sulfide	6.70E-06	kg
		Methane, non-fossil	0.0086	kg
		Nitrogen	0.04878	kg
		Sulfur dioxide	6.60E-06	kg

<바이오 메탄가스 생산 by membrane technique>

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
투입물 (inputs)	주원료	biogas	1.56492	m3
	부원료	activated carbon, granular	0.00214	kg
		steel, chromium steel 18/8	1.01E-04	kg
		lubricating oil	1.14E-04	kg
	유틸리티	electricity, low voltage	0.5745	kWh
산출물 (outputs)		biomethane, high pressure	1	m3
		Heat, waste	1.28	MJ
		Carbon dioxide, non-fossil	0.98872	kg
		Hydrogen sulfide	9.80E-06	kg
		Methane, non-fossil	0.00442	kg
		Nitrogen	0.05156	kg
		Sulfur dioxide	6.60E-06	kg

<표> 문헌조사를 통해 구축한 바이오디젤 생산 시 주요 투입/산출 리스트(안)

구분	세부구분	주요 항목 (투입/산출물)
투입물 (inputs)	주원료 (Feed)	soybean oil, crude
		palm oil, crude
		rape oil, crude
		cottonseed oil, crude
		tallow, unrefined
		residual softwood, wet
		used vegetable cooking oil, purified
		wood
		straw
		miscanthus
		Palm Fatty Acid Distillate (PFAD)
	부원료	citric acid
		hydrochloric acid, without water, in 30% solution state
		phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state
		sodium hydroxide, without water, in 50% solution state
		potassium hydroxide
		glycerin distillate bottom
		sodium methoxide
		residual softwood, wet
		methanol
		ethanol
		hydrogen
		Cobalt
		Ferric hydroxide
		Monoethanolamine
		Nickel
		Nitrogen
		Selexol
		Zinc oxide
		filter ceramic
		rape methyl ether
		silica sand
quicklime		

구분	세부구분	주요 항목 (투입/산출물)
		iron chelate
	유틸리티	electricity, medium voltage
		heat, district or industrial, natural gas
		heat, district or industrial, other than natural gas
		water, deionised
		tap water
		water, cooling, unspecified natural origin
		steam(based on natural gas)
		steam(based on biomass)
		steam(based on coal)
산출물 (outputs)	제품	fatty acid methyl ester
	부산물	glycerine
		propane mix
	폐기물	municipal solid waste
폐수	wastewater(from residence), wastewater(average)	

### 〈전문가 검토 의견서〉

1. 표에 제시된 투입물 중 수정 및 추가 해야 할 주원료(Biomass) 종류
2. 표에 제시된 투입물 중 수정 및 추가 해야 할 부원료 종류
3. 표에 제시된 투입물 중 수정 및 추가 해야 할 유틸리티 종류
4. 표에 제시된 산출물 중 수정 및 추가 해야 할 항목(부산물, 폐기물 등)

**참고자료**

**바이오매스별 바이오디젤 생산을 위한 투입/산출 항목**

<바이오디젤 - 대두(soybeans)>

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
투입물 (inputs)	주원료	soybean oil, crude	0.88699	kg
	부원료	citric acid	6.53E-04	kg
		hydrochloric acid, without water, in 30% solution state	0.038906	kg
		phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state	5.69E-04	kg
		sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	8.72E-04	kg
		sodium methoxide	0.020723	kg
		methanol	0.081521	kg
	유틸리티	electricity, medium voltage	0.006807	kWh
		heat, district or industrial, natural gas	0.24824	MJ
		heat, district or industrial, other than natural gas	0.515359	MJ
		tap water	0.011281	kg
	산출물 (outputs)	vegetable oil methyl ester	1	kg
wastewater, average		3.88E-05	m3	

<바이오디젤 - 팜 오일(palm oil)>

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
투입물 (inputs)	주원료	palm oil, crude	0.92975	kg
	부원료	phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state	0.004162	kg
		potassium hydroxide	0.01027	kg
		methanol	0.102738	kg
	유틸리티	electricity, medium voltage	0.002554	kWh
		heat, district or industrial, natural gas	0.799592	MJ
		tap water	0.013037	kg
		Water, cooling, unspecified natural origin	2.87E-04	m3
		vegetable oil esterification facility	8.45E-10	Item(s)
		Carbon dioxide, in air	0.200362	kg
	산출물 (outputs)	vegetable oil methyl ester	1	kg
		wastewater, from residence	5.66E-05	m3
Water		1.11E-04	m3	
Carbon dioxide, non-fossil		0.274659	kg	

<바이오디젤 - 유채 오일(Rape oil)>

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
투입물 (inputs)	주원료	rape oil, crude	0.92999	kg
	부원료	phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state	0.004154	kg
		glycerin distillate bottom	-0.00825	kg
		potassium hydroxide	0.010278	kg
		residual softwood, wet	9.64E-10	m3
		methanol	0.102813	kg
	유틸리티	electricity, medium voltage	0.001553	kWh
		heat, district or industrial, natural gas	0.82037	MJ
		tap water	0.013481	kg
		Water, cooling, unspecified natural origin	2.87E-04	m3
		vegetable oil esterification facility	8.45E-10	Item(s)
		Carbon dioxide, in air	0.130885	kg
산출물 (outputs)	vegetable oil methyl ester	1	kg	
	wastewater, from residence	5.69E-05	m3	
	Water	1.31E-04	m3	
	Carbon dioxide, non-fossil	0.205848	kg	

<바이오디젤 - 목화씨 오일(cotton seed oil)>

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
투입물 (inputs)	주원료	cottonseed oil, crude	1.02463	kg
	부원료	sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	0.002262	kg
	유틸리티	electricity, medium voltage	0.002662	kWh
		heat, district or industrial, natural gas	0.058767	MJ
		tap water	132.2966	kg
		vegetable oil refinery	1.08E-10	Item(s)
산출물 (outputs)	cottonseed oil, refined	1	kg	
	wastewater from vegetable oil refinery	0.088499	m3	
	Water	0.0649	m3	

<바이오디젤 - 폐식용유 (used vegetable cooking oil)>

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
투입물 (inputs)	주원료	used vegetable cooking oil, purified	0.92975	kg
	부원료	phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state	0.004162	kg
		potassium hydroxide	0.01027	kg
		sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	4.96E-07	kg
		sodium methoxide	5.73E-05	kg
		sulfuric acid	4.69E-06	kg
		methanol	0.102738	kg
	유틸리티	electricity, medium voltage	3.83E-02	kWh
		heat, district or industrial, natural gas	0.83544	MJ
		tap water	1.51E-02	kg
		Water, cooling, unspecified natural origin	2.87E-04	m3
		water, deionised	5.92E-07	kg
		vegetable oil esterification facility	8.45E-10	Item(s)
	산출물 (outputs)	Carbon dioxide, in air	0.126056	kg
vegetable oil methyl ester		1	kg	
municipal solid waste		1.30E-06	kg	
wastewater, from residence		5.66E-05	m3	
Water		3.02E-04	m3	
	Carbon dioxide, non-fossil	0.200362	kg	

<표1> 문헌조사를 통해 구축한 바이오 선박유 생산 시 주요 투입/산출 리스트(안)

구분	세부구분	주요 항목 (투입/산출물)
투입물 (inputs)	주원료 (Feed)	yellow grease
		woody residue
	부원료	HFO(heavy fuel oil)
		Magnesium Oxide (MgO)
		Olivine
		Tar Reformer Catalyst
		Zinc Oxide (ZnO) Catalyst
		FT Synthesis Catalyst (Co based)
		Hydrotreating Catalyst (sulfided CoMo or NiMo)
		Hydrotreating Catalyst
		Isomerization/Hydrocracking Catalyst
		LO-CAT Chemicals (킬레이트화 철 용액)
		Amine Make-Up
		Boiler Chemicals
	Cooling Tower Chemicals	
	유틸리티	Natural gas
		Coal
		Diesel
		Hydrogen
Electricity		
Water		
산출물 (outputs)	제품	Marine bio diesel
	부산물	Pyrolysis Oil, Jet, Gasoline, Propane, Naphtha, Wax, Hydrogen
	폐기물	-
	폐수	-



### 〈전문가 검토 의견서〉

1. 표에 제시된 투입물 중 수정 및 추가 해야 할 주원료(Biomass) 종류
2. 표에 제시된 투입물 중 수정 및 추가 해야 할 부원료 종류
3. 표에 제시된 투입물 중 수정 및 추가 해야 할 유틸리티 종류
4. 표에 제시된 산출물 중 수정 및 추가 해야 할 항목(부산물, 폐기물 등)

**참고자료**

**바이오매스별 바이오 선박유 생산을 위한 투입/산출 항목**

<바이오 선박유 생산 - 5개 생산기술별\*>

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	단위	BTL	GBTL	CBTL	YG	YG+HFO
투입물 (input s)	주원료	yellow grease	kg				0.0304	1.29E-02
		Woody residue	kg	0.108	0.0238	0.0353		
	부원료	HFO	MJ					5.10E-01
		Magnesium Oxide (MgO)	kg	1.3E-05	2.9E-06	4.4E-06		
		Olivine	kg	0.00031	6.8E-05			
		Tar Reformer Catalyst	kg	1.3E-05	5.6E-06	1.4E-05		
		Zinc Oxide (ZnO) Catalyst	kg	3.4E-06	2.2E-06	1.9E-06		
		FT Synthesis Catalyst (Co based)	kg	2.5E-06	1.3E-06	1.4E-06		
		Hydrotreating Catalyst (sulfided CoMo or NiMo)	kg	3.2E-06	2.6E-06	2.7E-06		
		Hydrotreating Catalyst	kg				3.2E-06	3E-06
		Isomerization/Hydrocracking Catalyst	kg				5.2E-07	5.3E-07
		LO-CAT Chemicals (킬레이트화 철 용액)	kg	7.4E-05	1.6E-05	0.00073		
		Amine Make-Up	kg	2E-08	5.4E-06	5.3E-05		
		Boiler Chemicals	kg	4.1E-07	1.1E-07	2.7E-06		
		Cooling Tower Chemicals	kg	2.5E-06	1.1E-06	1.6E-06		
	유틸리티	Natural gas	MJ		1.24		0.0791	8.56E-02
		Coal	MJ			0.836		
		Diesel	MJ	0.00153	0.00125	0.00154		
		Hydrogen	MJ			0.564	0.0771	0.0508
		Electricity	MJ		7E-06	1E-06	0.0112	0.00847
		Water	m3	0.00017	5.5E-05	0.00035	0.00021	0.0002
산출물 (outputs)	제품	Marine/Diesel	MJ	0.180	0.140	0.180	0.110	0.180
	부산물	Pyrolysis Oil	MJ					
		Jet	MJ	0.400	0.310	0.380	0.590	0.480
		Gasoline	MJ				0.220	0.260
		Propane	MJ				0.080	0.080
		Naphtha	MJ	0.310	0.270	0.330		
		Wax	MJ	0.120	0.090	0.110		

\* 5개 생산기술: (1) biomass-to-liquid (BTL), (2) co-feeding biomass and natural gas (GBTL) (3) co-feeding biomass and coal (CBTL), (4) renewable diesel from hydro-processing yellow grease (YG), (5) yellow grease with HFO (YG + HFO)

<표1> 문헌조사를 통해 구축한 바이오항공유 생산 시 주요 투입/산출 리스트(안)

구분	세부구분	주요 항목 (투입/산출물)
투입물 (inputs)	주원료 (Feed)	poplar(bone dry)
		Jatropha(husk)
		Jatropha(fruit)
		Jatropha(seed)
		Castor(husk)
		Castor(fruit)
		Castor(seed)
		camelina oil
		algae derived oil
		corn stover
		switchgrass
		short rotation woody crops
		soybean oil
		palm oil
		rapeseed oil
	부원료	enzymes
		sulfuric acid
		lime
		carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )
		calcium carbonate
		ammonia
		nickel based catalyst
		alumina based catalyst
		clarifier polymer
		corn steep liquor
		Hexane
		Phosphoric acid
		hydrogen
	sodium hydroxide	
	유틸리티	natural gas - to burner
		natural gas - SMR(Steam Methane Reforming)
		steam
		electricity
산출물 (outputs)	제품	Bio-jet fuel
	부산물	electricity, renewable biodiesel, naphtha, LPG, propane mix, wax
	폐기물	Gypsum, Ash
	폐수	-

### <전문가 검토 의견서>

1. 표에 제시된 투입물 중 수정 및 추가 해야 할 주원료(Biomass) 종류
2. 표에 제시된 투입물 중 수정 및 추가 해야 할 부원료 종류
3. 표에 제시된 투입물 중 수정 및 추가 해야 할 유틸리티 종류
4. 표에 제시된 산출물 중 수정 및 추가 해야 할 항목(부산물, 폐기물 등)

**참고자료**

**바이오매스별 바이오항공유 생산을 위한 투입/산출 항목**

<바이오항공유 생산 - poplar(bone dry)>

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
투입물 (inputs)	주원료	poplar(bone dry)	8.14E-02	kg
	부원료	enzymes	0.000683	kg
		sulfuric acid	1.46E-03	kg
		lime	1.51E-03	kg
		carbon dioxide (CO2)	0.000185	kg
		calcium carbonate	2.11E-04	kg
		ammonia	0.00103	kg
		nickel based catalyst	1.74E-06	kg
		alumina based catalyst	1.02E-06	kg
		clarifier polymer	0.000047	kg
		corn steep liquor	0.00218	kg
		sodium hydroxide	0.00194	kg
	유틸리티	natural gas - to burner	1.72E-03	kg
natural gas - SMR(Steam Methane Reforming)		9.66E-03	kg	
산출물 (outputs)	Bio-Jet fuel	1	MJ	
	electricity	0.00254	kWh	
	CO2 - burner (biogenic source)	7.61E-02	kg	
	CO2 - SMR (non-biogenic source)	3.07E-02	kg	
	CO2 - WWT (bio genic source)	1.14E-02	kg	
	CO2 - Fugitive loss	2.06E-04	kg	
	CO	7.26E-06	kg	
	NOx	7.26E-06	kg	
	SO2	5.65E-05	kg	
	Gypsum	3.97E-04	kg	
	Ash	1.55E-03	kg	

<바이오항공유 생산 - jatropha>

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
투입물 (inputs)	주원료	Jatropha(husk)	3.7122	kg
		Jatropha(fruit)	10.4869	kg
		Jatropha(seed)	6.7747	kg
	부원료	Hexane	0.01387	kg
		Phosphoric acid	0.0418	kg
		hydrogen	0.071	kg
	유틸리티	steam	0.835	kg
		electricity	0.6015	kWh
		natural gas	0.0795	kg
산출물 (outputs)		Bio-jet fuel	1	kg
		Renewable biodiesel	0.017	kg
		Naphtha	0.533	kg
		LPG	0.259	kg

<바이오항공유 생산 - castor>

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
투입물 (inputs)	주원료	Castor(husk)	6.6594	kg
		Castor(fruit)	11.099	kg
		Castor(seed)	4.4396	kg
	부원료	Hexane	0	kg
		Phosphoric acid	0	kg
		hydrogen	0.071	kg
	유틸리티	steam	3.0548	kg
		electricity	0.835	kWh
		natural gas	0.0795	kg
산출물 (outputs)		Bio-jet fuel	1	kg
		Renewable biodiesel	0.017	kg
		Naphtha	0.533	kg
		LPG	0.259	kg

<표1> 문헌조사를 통해 구축한 바이오에탄올 생산 시 주요 투입/산출 리스트(안)

구분	세부구분	주요 항목 (투입/산출물)
투입물 (inputs)	주원료 (Feed)	maize grain
		potato
		rye grain
		molasses, from sugar beet
		vinasse, from fermentation of sugar beet molasses
		sugar beet
		vinasse, from fermentation of sugar beet
		sweet sorghum stem
		vinasse, from fermentation of sweet sorghum
		cassava
		barley
		pampas grass
		whey
	부원료	ammonium sulfate
		sulfuric acid
		soda ash, light, crystalline, heptahydrate
		inorganic nitrogen fertiliser, as N
		sodium phosphate
		sodium sulfate, anhydrite
		ammonia, anhydrous, liquid
		sodium chloride, powder
		chlorine, liquid
		lubricating oil
		ammonia
		Calciumhydroxide
		Magnesium sulfate
		Sodium hydroxide
		enzyme
		alpha amylase
		gluco amylase
		cellulase
	yeast	
	유틸리티	electricity
		heat, district or industrial, natural gas
		tap water
		Water, cooling, unspecified natural origin
		water, decarbonised
산출물 (outputs)	제품	ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation
	부산물	Distiller's Dried Grains with Soluble
	폐기물	municipal solid waste, waste mineral oil, wood ash mixture(pure)
	폐수	wastewater(from residence), wastewater(average)

<표2> 문헌조사를 통해 구축한 바이오부탄올 생산 시 주요 투입/산출 리스트(안)

구분	세부구분	주요 항목 (투입/산출물)	
투입물 (inputs)	주원료 (Feed)	corn	
		부원료	alpha amylase
	gluco amylase		
	sulfuric acid		
	유틸리티	tap water	
		Water, cooling, unspecified natural origin	
		water, decarbonised	
		electricity	
	산출물 (outputs)	제품	bio-butanol
		부산물	ethanol, acetone, Distiller's Dried Grains with Soluble(DDGS), gasoline, acetic acid, butric acid, hydrogen, carbon dioxide
폐기물			
폐수		wastewater	

<표3> 문헌조사를 통해 구축한 바이오가솔린 생산 시 주요 투입/산출 리스트(안)

구분	세부구분	주요 항목 (투입/산출물)
투입물 (inputs)	주원료 (Feed)	soybean oil
		pyrolysis oil
	부원료	methanol
		oxygen
	유틸리티	electricity
		water
steam		
산출물 (outputs)	제품	green gasoline
	부산물	LPG, product gas, light-cycle oil, clarified slurry oil, hydrocarbons
	폐기물	ash
	폐수	wastewater



### 〈전문가 검토 의견서〉

1. 표에 제시된 투입물 중 수정 및 추가 해야 할 주원료(Biomass) 종류
2. 표에 제시된 투입물 중 수정 및 추가 해야 할 부원료 종류
3. 표에 제시된 투입물 중 수정 및 추가 해야 할 유틸리티 종류
4. 표에 제시된 산출물 중 수정 및 추가 해야 할 항목(부산물, 폐기물 등)

**참고자료**

**바이오매스별 바이오에탄올 생산을 위한 투입/산출 항목**

<바이오에탄올 - 옥수수(maize)>

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
투입물 (inputs)	주원료	maize grain	3.2259	kg
	부원료	ammonium sulfate	0.0097	kg
		sulfuric acid	0.0240	kg
		soda ash, light, crystalline, heptahydrate	0.0361	kg
		inorganic nitrogen fertiliser, as N	0.0097	kg
	유틸리티	electricity, medium voltage	0.3972	kWh
		heat, district or industrial, natural gas	13.8834	MJ
		tap water	4.2240	kg
		Water, cooling, unspecified natural origin	0.0044	m3
		ethanol fermentation plant	0.0000	Item(s)
		transport, tractor and trailer, agricultural	0.0323	t*km
		Carbon dioxide, in air	1.4910	kg
	산출물 (outputs)	ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation	1.0000	kg
wastewater, from residence		0.0030	m3	
Water		0.0056	m3	
Carbon dioxide, non-fossil		2.4965	kg	

<바이오에탄올 - 감자(potatoes)>

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
투입물 (inputs)	주원료	potato	14.2193	kg
	부원료	ammonium sulfate	0.0112	kg
		sulfuric acid	0.0185	kg
		soda ash, light, crystalline, heptahydrate	0.0428	kg
		inorganic nitrogen fertiliser, as N	0.0112	kg
	유틸리티	electricity, medium voltage	0.5596	kWh
		heat, district or industrial, natural gas	18.5307	MJ
		tap water	1.0525	kg
		Water, cooling, unspecified natural origin	0.0002	m3
		ethanol fermentation plant	5.E-10	Item(s)
		transport, tractor and trailer, agricultural	0.1422	t*km
		Carbon dioxide, in air	1.7339	kg
	산출물	ethanol, without water, in 95% solution state, from	1.0000	kg

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
(outputs)		fermentation		
		wastewater, from residence	0.0111	m3
		Water	0.0006	m3
		Carbon dioxide, non-fossil	3.1220	kg

<바이오에탄올 - 호밀(Rye)>

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
투입물 (inputs)	주원료	rye grain	3.3588	kg
		부원료	ammonium sulfate	0.0100
	sulfuric acid		0.0251	kg
	soda ash, light, crystalline, heptahydrate		0.0376	kg
	inorganic nitrogen fertiliser, as N		0.0100	kg
	유틸리티	electricity, medium voltage	0.4105	kWh
		heat, district or industrial, natural gas	13.9358	MJ
		tap water	4.2049	kg
		Water, cooling, unspecified natural origin	0.0001	m3
		ethanol fermentation plant	0.0000	Item(s)
		transport, tractor and trailer, agricultural	0.0336	t*km
		Carbon dioxide, in air	1.4394	kg
	산출물 (outputs)		ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation	1.0000
		wastewater, from residence	0.0030	m3
		Water	0.0043	m3
		Carbon dioxide, non-fossil	2.4520	kg

<바이오에탄올 - 사탕무 당밀(Sugar beet molasses)>

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
투입물 (inputs)	주원료	molasses, from sugar beet	4.07598	kg
		부원료	ammonium sulfate	0.005032
	sulfuric acid		0.037741	kg
	vinasse, from fermentation of sugar beet molasses (사탕무 당밀 발효 후 부산물)		-2.50383	kg
	inorganic nitrogen fertiliser, as N		4.50E-06	kg
	유틸리티		electricity, medium voltage	0.034722
		heat, district or industrial, natural gas	9.127945	MJ
		tap water	8.051276	kg

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
		ethanol fermentation plant	4.87E-10	Item(s)
		Carbon dioxide, in air	0.654439	kg
산출물 (outputs)		ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation	1	kg
		wastewater, from residence	0.00763	m3
		Water	4.21E-04	m3
		Carbon dioxide, non-fossil	1.676571	kg

<바이오에탄올 - 사탕무 (Sugar beet)>

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
투입물 (inputs)	주원료	sugar beet	6.507831	kg
		부원료	sodium phosphate	0.0038917
	sodium sulfate, anhydrite		0.0025947	kg
	sulfuric acid		0.0194727	kg
	vinasse, from fermentation of sugar beet (사탕무 발효 후 부산물)		-4.033359	kg
	유틸리티	electricity, medium voltage	0.1202257	kWh
		heat, central or small-scale, other than natural gas	0.0052901	MJ
		heat, district or industrial, natural gas	2.143094	MJ
		tap water	0.6203265	kg
		Water, cooling, unspecified natural origin	3.41E-07	m3
			ethanol fermentation plant	2.89E-10
산출물 (outputs)		ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation	1	kg
		Water	6.21E-04	m3
		Carbon dioxide, non-fossil	0.5437944	kg

<바이오에탄올 - 단수수 부산물 (sweet sorghum bagasse)>

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
투입물 (inputs)	주원료	sweet sorghum stem	1.39E+01	kg
		부원료	ammonia, anhydrous, liquid	1.79E-07
	ammonium sulfate		4.06E-03	kg
	sulfuric acid		0.030477	kg
	sodium chloride, powder		8.93E-05	kg
	chemical, organic		1.25E-04	kg
	chlorine, liquid		7.14E-06	kg

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
		inorganic nitrogen fertiliser, as N	6.10E-03	kg
		lubricating oil	2.57E-04	kg
		vinasse, from fermentation of sweet sorghum	-1.07E+01	kg
	유틸리티	tap water	1.19E+01	kg
		water, decarbonised	1.71E-02	kg
		ethanol fermentation plant	4.04E-10	Item(s)
heat and power co-generation unit, 6400kW thermal, building		4.73E-08	Item(s)	
	Carbon dioxide, in air	0.8613404	kg	
산출물 (outputs)	ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation	1.00E+00	kg	
	Acetaldehyde	1.33E-06	kg	
	Ammonia	3.79E-05	kg	
	Arsenic	2.18E-08	kg	
	Benzene	1.78E-05	kg	
	Benzene, ethyl-	5.86E-07	kg	
	Benzene, hexachloro-	1.41E-13	kg	
	Benzo(a)pyrene	9.76E-09	kg	
	Bromine	1.31E-06	kg	
	Cadmium	1.52E-08	kg	
	Calcium	1.27E-04	kg	
	Carbon dioxide, non-fossil	4.2831854	kg	
	Carbon monoxide, non-fossil	1.37E-04	kg	
	Chlorine	3.92E-06	kg	
	Chromium	8.62E-08	kg	
	Chromium VI	8.71E-10	kg	
	Copper	4.79E-07	kg	
	Dinitrogen monoxide	5.01E-05	kg	
	Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	6.05E-13	kg	
	Fluorine	1.09E-06	kg	
	Formaldehyde	2.54E-06	kg	
	Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified	1.78E-05	kg	
	Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated	6.05E-05	kg	
	Lead	5.42E-07	kg	
	m-Xylene	2.34E-06	kg	
	Magnesium	7.86E-06	kg	
	Manganese	3.72E-06	kg	
	Mercury	6.53E-09	kg	
	Methane, non-fossil	8.47E-06	kg	
	municipal solid waste	7.14E-05	kg	
	Nickel	1.31E-07	kg	
	Nitrogen oxides	0.0019161	kg	
	NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	1.19E-05	kg	
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	2.15E-07	kg		

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
		Particulates, < 2.5 um	8.77E-04	kg
		Phenol, pentachloro-	1.58E-10	kg
		Phosphorus	6.53E-06	kg
		Potassium	5.10E-04	kg
		Sodium	2.83E-05	kg
		Sulfur dioxide	5.42E-05	kg
		Toluene	5.86E-06	kg
		waste mineral oil	7.14E-05	kg
		wastewater, average	1.71E-05	m3
		Water	1.19E-02	m3
		wood ash mixture, pure	0.0115189	kg
		Zinc	6.53E-06	kg

<바이오에탄올 - 유청 (whey)>

구분	세부구분	항목 (투입/산출물)	수량	단위
투입물 (inputs)	주원료	whey	4.14513	kg
	부원료	soda ash, light, crystalline, heptahydrate	0.003319	kg
		sodium phosphate	4.22E-04	kg
		sodium sulfate, anhydrite	1.61E-04	kg
		sulfuric acid	0.001839	kg
	유틸리티	electricity, medium voltage	0.030276	kWh
		heat, central or small-scale, other than natural gas	0.279697	MJ
		heat, district or industrial, natural gas	0.512877	MJ
		tap water	0.48726	kg
		Water, cooling, unspecified natural origin	1.04E-04	m3
		ethanol fermentation plant	4.44E-11	Item(s)
	산출물 (outputs)	ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation	1	kg
BOD5, Biological Oxygen Demand		0.003268	kg	
Carbon dioxide, non-fossil		0.208649	kg	
COD, Chemical Oxygen Demand		0.003268	kg	
DOC, Dissolved Organic Carbon		0.001307	kg	
TOC, Total Organic Carbon		0.001307	kg	
Water		5.92E-04	m3	

---

탈탄소사회 구현을 위한 탄소발자국 기반  
온실가스 배출량 산정 모형 개발 연구

---

인 쇄 | 2022년 12월

발 행 | 2022년 12월

발행인 | 이상협

발행처 | 국가녹색기술연구소

인쇄처 | 세일포커스

---

※ 동 보고서의 내용에 문의 사항이 있는 경우 아래로 연락주시기 바랍니다.

국가녹색기술연구소(NIGT) 기술총괄부

- 주소 서울특별시 중구 퇴계로 173  
남산스퀘어 17층(우 04554)
- 전화 02-3393-3988
- 이메일 rurouni628@nigt.re.kr