

EU RED-II 방법론을 적용한 국내 미이용 바이오매스 케나프 펠릿의 전과정 온실가스 배출량 산정

김연일[‡] · 정선영^{*‡} · 조영재^{*} · 윤 성^{*} · 엄병환[†]

한경국립대학교 식품생명화학공학부 화학공학전공 & 탄소중립자원센터
17579 경기도 안성시 중앙로
*주엔벨롭스

04768 서울시 성동구

(2022년 11월 2일 접수, 2022년 11월 24일 수정본 접수, 2022년 12월 1일 채택)

Life Cycle Greenhouse Gas Emission Assessment on Locally Generated Kenaf Residue Biomass Fuel in South Korea

Youn Il Kim[‡], Sun Young Jung^{*‡}, Youngjae Jo^{*}, Sung Yoon^{*} and Byung Hwan Um[†]

School of Food Biotechnology & Chemical Engineering and Carbon-Neutral Resources Research Center,
Hankyong National University, Anseong, 17579, Korea
*Envelops Co., Ltd., Seoul, 04768, Korea

(Received 2 November 2022; Received in revised from 24 November 2022; Accepted 1 December 2022)

요 약

지속가능한 바이오에너지 이용을 위해서는 국내 바이오매스 이용 확대와 지속가능성 증대가 필수적인데, 국내 관련 체계는 아직 미비한 상황이다. 이에 바이오 연료에 대한 지속가능성 평가를 위한 앞선 체계가 마련되어 있는 EU의 RED-II 방법론을 활용하여 국내 농업 잔재물 바이오매스인 케나프(*Hibiscus cannabinus* L.) 줄기 펠릿을 이용한 바이오매스 발전의 전과정 온실가스 배출량을 이론적으로 산정하였다. 케나프 잔재물 펠릿의 생산경로에 대해 EU 공동연구센터(Joint Research Center)의 배출계수를 이용하여 잔재물 수집, 운송, 펠릿 연료화까지의 전과정 온실가스 배출량을 산정한 결과, 배출량은 3.0 gCO₂eq/MJ로 나타났고 이를 25% 발전효율로 연소하여 전력을 생산하는 경우 전과정 온실가스 배출량은 11.9 gCO₂eq/MJ로 산출되었다. 이는 전력배출계수로 환산하면 42.8 kgCO₂eq/MWh로, 국내 전력배출계수 443.4 kgCO₂eq/MWh와 비교하면 90.3%의 온실가스 배출량 감축을 달성할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 수입 목재펠릿과 비교하는 경우 최소 59.6%의 온실가스 배출 감축이 가능하며, 국내 발생 잔재물 바이오매스를 바이오에너지 생산에 이용하는 경우 기존 수입 목재펠릿에 비하여 높은 수준의 온실가스 배출 감축 달성이 가능함을 확인하였다. 이는 국내 바이오에너지의 전과정 온실가스 배출량 평가 체계 마련을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract – The greenhouse gas (GHG) emission assessment of kenaf pellet, produced from locally generated kenaf residues in South Korea, has been studied based on the EU RED-II methodology for calculating GHG impact of biomass fuels. Based on the production pathway of kenaf residue pellet and emission coefficients from EU JRC report, the life cycle GHG emission of kenaf residue pellet is assessed as 3.0 gCO₂eq/MJ_{pellet} and the life cycle GHG emission of electricity generated from kenaf residue pellet is assessed as 11.9 gCO₂eq/MJ when electrical efficiency of final conversion is 25%. The potential GHG emission reduction of electricity produced from kenaf pellet is 90.3% compared to the domestic electricity emission factor 42.8 kgCO₂eq/MWh. Also, the electricity produced from kenaf pellet can reduce at least 59.6% of GHG emission compared to the electricity produced from imported wood pellets.

Key words: Kenaf, Biomass fuel, Greenhouse gas emission calculation, RED-II

1. 서 론

바이오에너지는 2020년 기준 발전량 9,938,354 MWh를 기록하여 국내 신재생에너지 발전원 중에서 태양광 다음으로 높은 발전량을 기록하고 있는 주요 재생에너지원이다[1]. 신재생에너지 중 발전비

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: bhun11@hknu.ac.kr

[‡]Youn Il Kim and Sun Young Jung contributed equally to this work.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

중은 2016년 33.4%에서 점차 낮아져 2020년 23.1%로 하락하였는데, 이는 국내 신재생에너지 정책 중 가장 영향력이 큰 신재생에너지 공급의무화(Renewable Portfolio Standard, RPS) 제도가 바이오매스 발전의 주 원료인 목재펠릿과 목재칩에 대한 공급인증서 가중치를 환경성 논란과 높은 수입의존도로 인해 지속적으로 하향 조정해 왔기 때문이다. 바이오매스 발전은 바이오매스의 생장기간 동안 축적한 탄소를 연소 시 배출하는 것으로 간주되어 국제적으로 탄소 중립으로 산정되고 있으나 실질적으로는 연소 시 온실가스 발생, 장기간 소요되는 탄소축적기간 대비 단기에 이루어지는 온실가스 배출, 재조림 및 토지이용 변화 등의 문제로 지속가능성에 대한 많은 의문이 제기되고 있고, 목재펠릿은 대부분 수입되어 해외의존도와 보조금 국부 유출이 논란이 되어 왔다[2,3]. 이에 목재펠릿과 목재칩 혼소 발전에 대한 공급인증서 가중치는 2018년 이전 1.0에서 2018년 6월 신규 설비에 대한 가중치가 삭제되었고, 2020년 7월에는 발전공기업의 기존 바이오혼소 설비 가중치가 1에서 0.5로 하락하는 등으로[4] 지원이 축소되었다.

그러나 바이오에너지는 안정적인 이용이 가능한 재생에너지원으로 중요성이 크다. 이에 해외에서는 바이오에너지의 지속가능성을 높이는 기준을 설정하고 이를 검증하는 방식으로 환경성 논란에 대응하고 있다. EU는 재생에너지 지침(Renewable Energy Directive, RED)에서 지속가능성 기준을 규정하고 있고, 일본도 기준 도입을 위해 정책 논의 중이다. 우리나라도 바이오에너지의 장기적이고 지속가능한 이용을 위해서는 국내에서 확보된 바이오매스 원료의 이용 확대와 지속가능성 증대가 필수적임을 인지하고 지속가능성을 확인하고 비교, 검증할 수 있는 평가체계를 도입하여 그 기반을 마련할 필요가 높다. 기존에 국내 바이오매스의 지속가능성 증대를 위한 정책으로는 미이용 산림바이오매스에 대해서 1.5~2.0의 높은 공급인증서 가중치가 적용되고 있고, 또한 수송 부문의 바이오연료에 대해서는 연료 지속가능성 지침 설정, 바이오연료 전과정평가(LCA) 기준 확립 등의 정책 방향성이 발표된 바 있다[5]. 발전 부문에서는 2021년 말 발표된 한국형 녹색분류체계(K-Taxonomy) 가이드라인에서 바이오매스 발전에 대한 온실가스 배출량 기준(100 gCO₂eq/kWh)이 제시되기도 했으나[6], 구체적인 산정 체계는 확정되지 않았다.

전과정 온실가스 배출량 산정 및 기준값 설정은 바이오연료의 지속가능성을 평가하는 기준 중 하나로써, EU RED에서는 산정 방법론을 법제화하고 도입하고 있다. 국내에서 이러한 EU RED 방법론을 활용하여 바이오가스에 대한 전과정 온실가스 배출량 평가가 이루어진 바 있으나[7], 바이오매스에 대한 전과정 온실가스 배출량 평가 연구는 아직 없다. 이에 본 연구에서는 EU의 바이오연료 지속가능성 기준 및 방법론을 온실가스 배출량 감축 기준을 중심으로 살펴보고, 국내에서 이를 적용하여 농업 잔재물 바이오매스를 발전 부문에서 활용하는 경우의 온실가스 배출량 감축 잠재성을 이론적으로 산정하였다.

국내 농업 잔재물 바이오매스로는 현재 국내에서 대량생산을 위한 재배기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있는 케나프 줄기를 대상으로 하였다. 케나프(*Hibiscus cannabinus* L.)는 고온성 열대작물로서 서아프리카가 원산으로 추정되고 있으나 기후나 토양환경에 대한 적응성이 매우 강하고 척박한 토양 환경에서도 매우 잘 자라며, 높은 수량성과 다양한 산업용도 특히 우수한 사료 특성을 보유하고 있는 작물이다[8]. 국내에서는 많은 수량과 우수한 사료가

치를 가진 조사료자원을 공급할 수 있는 케나프를 국내생산을 통한 안정적 공급 방안 등이 요구되어 품종 육성 및 재배기술에 대한 연구가 이루어지고 있다[9]. 케나프 잎은 줄기보다 단백질 함량이 높고 소화율도 높아 사료가치가 높으며[10], 줄기의 경우 펠릿의 소재 자원과 섬유산업, 건축자재 및 바이오플라스틱 소재자원으로서 이용되는 등 산업이용 분야도 대단히 넓지만[9], 국내에서 이용 용도는 아직 확립된 바 없다. 잔재물이란 국내에서는 명확히 규정된 바가 없고 EU에서는 생산과정에서 직접적으로 생산하고자 하는 최종재가 아닌 것을 의미한다고 규정하고 있어[11], 연구에서는 사료자원으로 가치가 높은 케나프 잎 외에 용처가 아직 확립되지 않은 케나프 줄기를 잔재물 바이오매스로 산정하고, 이를 이용해 케나프 펠릿을 제조하여 바이오매스 발전을 하는 경우의 전과정 온실가스 배출량을 평가하였다.

본 연구는 국내에서 발생하는 잔재물 바이오매스를 연료화하여 발전에 이용하는 경우 전과정 온실가스 배출량 감축 잠재량을 확인하고 바이오에너지의 지속가능성을 증대시킬 수 있는 체계 도입을 위한 하나의 방법론을 제시하는 데 목적이 있다. 이를 위해 전과정 온실가스 배출량 산정을 위한 방법론을 설명하고 분석 모형 및 배출계수, 가정값을 서술한 후 그 결과를 기술하였다. 연구를 통해 국내 바이오매스의 효율적 이용 증진과 지속가능한 바이오에너지의 활용에 기여하고자 희망한다.

2. 분 석

2-1. 분석 체계

분석체계는 EU RED-II의 바이오연료 전과정 온실가스 배출량 산정 방법을 적용하여 케나프 펠릿의 전과정 온실가스 배출량을 계산하였다. EU는 2009년 재생에너지지침(Renewable Energy Directive, RED)을 제정하면서 바이오연료의 지속가능성 기준을 도입하였고, 2018년 개정된 RED-II(Directive (EU) 2018/2001)에서는 이를 강화하였다[11]. RED-II 하에서 교통 부문과 전기 및 냉난방 부문에서 이용되는 바이오연료(biofuels, bioliquids and biomass fuels)가 법적으로 재생에너지로 인정되고 재정지원 자격을 충족하기 위해서는 지속가능성 기준(sustainability criteria)과 온실가스 배출 감축 기준(greenhouse gas emissions saving criteria)을 충족하여야 한다. 이는 전기 및 열/냉방 시설에서 사용되는 바이오매스 연료의 경우 열 기준 20 MW 이상 규모의 시설, 바이오가스의 경우 열 기준 2 MW 이상 규모의 시설일 때 적용되며, 회원국별로 더 강화된 규정을 정할 수 있다.

구체적으로 지침 제29조의 단락 2에서 7까지는 바이오매스의 지속가능성 기준으로 바이오매스 생산토지 및 생산방식 조건 등에 대해, 단락 10에서는 기간별 신규 시설에 대한 최소 온실가스 배출 감축 기준에 대해 규정하고 있다. 온실가스 배출 감축 기준은 2021년 1월 1일부터 운영을 시작하는 전기 및 열/냉방 시설에서 사용되는 바이오매스 연료(biomass fuels)는 최소 70%, 2026년 1월 1일부터 운영을 시작하는 시설에서 사용되는 바이오매스 연료에 대해서는 최소 80% 감축이 요구된다. 온실가스 배출 감축 계산은 지침 제31조 1항에 따라 산정하는데, 부속서 VI (Annex VI)에 생산경로(pathway)에 따른 기본값(default value)이 규정되어 있는 경우 일정 조건 하에서 기본값, 부속서 VI 방법론에 따른 실제값(actual value), 또는 계산식 항목별로 기본값과 실제값의 합으로 산정할 수

있다.

이에 따라 부속서 VI에는 대표적인 바이오매스 연료별로 일반적인 온실가스 배출 감축량 비율 (토지이용 변화에 따른 순탄소 배출이 없는 경우), 산정방법(methodology), 연료별 생산과정별 배출량 일반값(typical value) 및 기본값(default value) 등의 온실가스 배출량 산정에 필요한 세부적인 내용들이 규정되어 있다. 기본값은 보수적인 산정을 위해 일반값에 1.2배를 적용한 값으로, 재생에너지 사업자들은 규제기관에 사용 연료의 온실가스 배출량을 보고할 때 지침 제31조에 따라 부속서 VI에서 제시된 과정별 또는 전체 기본값과 실제값 중에서 선택해서 사용할 수 있다.

RED-II에서 바이오매스 연료의 온실가스 배출량 산정은 전과정 평가(life-cycle assessment) 방식에 기반하고 있다. 즉 바이오매스 연료의 원료 생산단계부터 수확(수집), 처리(공정), 운송 및 유통, 사용 단계까지의 배출량을 모두 산정한다. 구체적으로 전기, 열 및 냉방으로 변환 이전 바이오매스 연료의 생산 및 이용에 따른 온실가스 배출량은 다음과 같은 항목들을 포함한 수식으로 계산된다.

$$E = e_{ec} + e_t + e_p + e_{td} + e_u - e_{sca} - e_{ccs} - e_{ccr} \quad (1)$$

E: 에너지 변환 이전 바이오매스 연료 생산과정의 총 배출량

e_{ec} : 원료 물질의 추출 또는 재배 과정 배출량

e_t : 토지이용 변화에 따른 탄소 저장 변화에서 발생하는 연환산(annualised) 배출량

e_p : 처리과정 (processing) 배출량

e_{td} : 운송 및 유통과정 배출량

e_u : 사용연료로 인한 배출량

e_{sca} : 향상된 농업관리를 통한 토양 탄소 축적으로 인한 배출 저감량

e_{ccs} : 연료 생산과정에서 CO₂ 포집 및 지질 저장(CO₂ capture and geological storage)으로 인한 배출 저감량

e_{ccr} : 연료 생산과정에서 CO₂ 포집 및 대체(CO₂ capture and replacement)로 인한 배출 저감량

기계 및 설비의 제조로 인한 배출량은 고려하지 않음

본 연구에서와 같이 잔재물 바이오매스를 분석 대상으로 하는 경우, 부속서 VI의 규정에 따르면 폐기물과 잔재물은 수집 단계까지의 전과정 온실가스 배출량을 0으로 산정하게 되어 있고 CO₂ 포집, 저장, 대체는 연구와 관련이 없으므로, 연구에서 이용된 배출량 계산식은 아래 식 (2)와 같다.

$$E = e_p + e_{td} + e_u \quad (2)$$

부속서 VI의 항목별 세부 계산 방법을 보다 자세히 서술하면 아래와 같다.

처리과정 배출량인 e_p 는 처리과정 자체에서 발생하는 폐기물과 누출, 사용되는 화학물질 및 제품의 생산에서 발생하는 온실가스, 건조 과정 배출, 연소 여부와 상관없이 투입되는 화석연료의 탄소 함량에 상응하는 온실가스를 모두 포함한다. 전기 사용의 경우 자체 생산되지 않은 전기는 해당 지역의 발전 및 배전(production and distribution)에서 발생하는 평균 배출집약도(average emission intensity)를 사용한다. 바이오매스 연료 생산 과정에 열 또는 전기를 공급하는 열병합 발전에서 초과 열 또는 전기가 생산되는 경우, 온실가스 배출량은 열의 온도에 따라 전기와 열에 배분한다.

운송 및 유통과정 배출량 e_{td} 는 원료 및 반제품의 운송, 완제품의

보관 및 유통에서 발생하는 배출량을 포함한다. 연료 사용에서 발생하는 배출량 e_u 는 바이오매스 연료의 경우 CO₂ 배출량은 0으로 계산하고, 비이산화탄소 온실가스인 CH₄와 N₂O 배출량은 포함한다. 나무 윗부분, 가지, 짚, 겨, 씨앗껍질, 크루드 글리세린, 바가스 등의 폐기물(wastes)과 잔재물(residues)은 수집 단계까지의 온실가스 배출량을 0으로 산정한다. 생산과정에서 사용되는 기계 및 설비의 제조로 인한 배출량은 산정하지 않는다.

전기, 열 및 냉방을 생산하는데 이용된 바이오매스 연료의 온실가스 배출량은 위의 연료 자체의 온실가스 배출량 E를 전기만 생산하는 경우 연간 발전효율, 열만 생산하는 경우 연간 열효율, 전기와 열 두가지 모두를 생산하는 경우 이를 비율로 계산한 효율로 나누어 계산한다. 전기만을 생산하는 경우 전기의 온실가스 배출량 산정식은 식 (3)과 같다.

$$EC_{el} = E/\eta_{el} \quad (3)$$

EC_{el} : 전기(최종 에너지 상품)의 총 온실가스 배출량

E: 최종 변환 이전 연료의 총 온실가스 배출량

η_{el} : 전기효율, 에너지 함량 기준 연간 전기 생산량을 연간 연료 투입량으로 나눈 값

그리고 온실가스 배출 감축량(saving)은 전기, 열 및 냉방 생산의 경우 다음의 식으로 계산한다.

$$\text{감축량(saving)} = (EC_{F(h\&c, el)} - EC_{B(h\&c, el)}) / EC_{F(h\&c, el)} \quad (4)$$

$EC_{B(h\&c, el)}$: 바이오매스 연료로 생산한 열 또는 전기의 총 배출량

$EC_{F(h\&c, el)}$: 열 또는 전기의 화석연료 비교치(fossil fuel comparator) 총 배출량

부속서 VI에서 산정하는 온실가스는 CO₂, N₂O, CH₄이며, 배출계수는 CO₂ 환산단위로 각각 1, 298, 25이다. 바이오매스 연료의 온실가스 배출량은 바이오매스 연료의 온실가스 배출량 E의 경우 바이오매스 연료 열량에 대해 gCO₂eq/MJ, 바이오매스 연료를 이용한 전기 또는 열 생산의 온실가스 배출량 EC의 경우 최종 에너지 상품 열량에 대해 gCO₂eq/MJ로 표시한다. 화석연료 비교치(fossil fuel comparator)는 전기 생산에 사용된 바이오매스 연료에 대한 $EC_{F(el)}$ 는 183 gCO₂eq/MJ, 열(난방) 및 냉방 생산에 이용된 바이오매스 연료에 대한 $EC_{F(h)}$ 는 80 gCO₂eq/MJ이다.

2-2. 분석도구

분석도구로는 EU RED-II에 근거한 바이오매스 연료 전과정 온실가스 배출량 산정 툴(tool)인 BioGrace-II 4a 버전의 계산방식과 계수를 이용하였다[6]. BioGrace-II 툴은 바이오매스를 이용한 전기, 열(heat), 냉방(cooling)의 전과정 온실가스 배출량을 산정하기 위한 엑셀 기반의 프로그램으로, EU RED-II에 규정되어 있는 바이오매스 연료 종류 별로 배출량 일반값 및 기본값의 계산을 확인하거나 실제값을 계산할 수 있도록 개발된 것이다.

BioGrace-II 툴에는 고체 바이오매스 연료 14종류, 액체 바이오연료 6종류, 바이오가스/바이오메탄 6종류에 대한 생산경로가 시트 별로 구성되어 있고, 각 경로별로 RED-II에서 규정하고 있는 기본값의 계산과정들이 입력되어 있어 법 상에서 제시되고 있는 기본값의 산정흐름을 확인할 수 있다. 법에서 규정되어 있지 않은 연료에 대해서는 경로가 구성되어 있지 않으나, 필요한 경우에 시트 추가와 변경이 가능하다. 연구에서는 기존에 있는 바이오매스 연료의

Table 1. BioGrace-II Standard Calculation Values used for GHG Emission Assessment of Kenaf Residue Pellet

Standard calculation value parameters	GHG emission coefficient			Density (kg/m ³)	LHV (at 0% water)	Fuel efficiency (MJ/t.km)	Transport exhaust gas emissions	
	gCO ₂ /MJ	gCH ₄ /MJ	gN ₂ O/MJ				gCH ₄ /t.km	gN ₂ O/t.km
Diesel	9.51	0.0	0.0	832	43.1			
Electricity South Korea	184.0	0.31	0.0076					
Truck (40 ton) for chips (diesel)						0.84	0.004	0.0016
Truck (40 ton) for liquids and pellets (diesel)						0.87	0.004	0.0016
CH ₄ and N ₂ O emission from use of diesel (transport)		0.0013	0.0032					
CH ₄ and N ₂ O emission from wood chip boiler		0.005	0.00098					
CH ₄ and N ₂ O		0.003	0.00059					

계산 시트 중에서 생산경로 구성이 유사하고 건조 과정의 변경, 적용이 가능한 시트 중 하나인 포플러 에너지작물 시트를 케나프 기준으로 변경, 편집하여 케나프 펠릿의 전과정 온실가스 배출량을 산정하였다.¹

BioGrace-II 톨에는 온실가스 배출량 산정에 필요한 투입물(연료, 비료 등)의 온실가스 배출계수, 저위발열량, 연비, 운송배출계수 등의 주요 계수들이 표준계산값(standard calculation values)으로 입력되어 있다. 이 값들은 EU 공동연구센터(Joint Research Center, JRC)의 보고서[7]에 근거한 것으로 EU 지역을 대상으로 산출된 값이다. 국내 계수는 환경부 전과정평가 프로그램인 TOTAL 버전 6.6.2를 확인한 결과 동일한 계수가 없거나 EU 공동연구센터 보고서의 계수가 더 보수적인 값을 나타내는 등 일관된 적용이 어려워 여기서는 BioGrace-II의 표준계산값들을 적용하여 배출량을 분석하였다.

연구에서 사용된 BioGrace-II의 표준계산값들은 Table 1와 같다. 케나프칩 및 케나프펠릿의 N₂O, CH₄ 연소 배출계수가 필요하지만 확립된 데이터가 없어 대안으로 가능한 농업잔재물, 짚펠릿, 목재칩, 목재펠릿 연소 배출계수 중에서 가장 보수적인 수치를 나타내는 목재칩 및 목재펠릿 보일러 배출계수를 준용하였다.

2-3. 분석모형

케나프는 현재 대량생산을 위한 재배기술 연구 단계로, 실제 대량생산이 이루어지고 있지는 않으며 따라서 수집, 운송, 펠릿 제조, 발전 과정에 대해서는 단순화된 생산경로를 가정하였다. 연구에서 전과정 온실가스 배출량 산정을 위해 설정한 케나프 펠릿 및 이를 연료로 하는 전기의 생산경로는 Fig. 1과 같다. 주산물인 케나프 사료 생산을 위한 케나프 잎이 재배 및 수확된 이후, 노지 건조를 거친 케나프 줄기 잔재물을 수집하여 펠릿 제조시설로 운송하고 펠릿을 제조한 후 발전소로 운송하여 연료로 이용하는 경로이다. 생산과정에서 사용되는 기계 및 설비의 제조로 인한 배출량은 분석체계에서 기술한 바와 같이 RED-II 방법론에서는 산정하지 않으므로 포함되어 있지 않다.

RED-II 방법론에 따르면 폐기물과 잔재물인 경우 수집 단계 이후부터 전과정 온실가스 배출량을 산정하게 되어 있으나 EU 공동연구센터 보고서 및 BioGrace-II 톨에 의하면 수집 과정 자체에서 주산물과 별도로 수집이 이루어지는 경우 이 때의 연료 사용량 등은 생산과정으로 산정되어 배출량 계산에 포함한다. 따라서 본 모형에

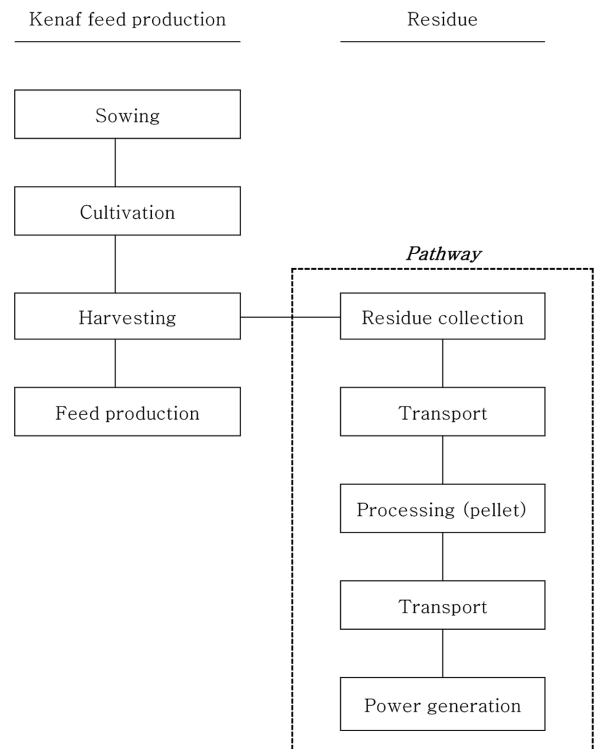


Fig. 1. Pathway for GHG Emission Assessment of Kenaf Residue Pellet.

서는 수집 단계에서의 경우 사용량을 산정 과정에 포함하고 별도 표기하였다.

먼저 케나프 잔재물 바이오매스의 연간 단위면적(1 ha) 당 발생량, 함유율, 발열량은 전라북도농업기술원과 환경대학교의 자료를 받아 Table 2와 같이 가정하였다. 1 ha 발생량 데이터는 10a 기준 생산량을 1 ha로 단순 환산한 값으로, 케나프는 1 ha당 함유율 27% 기준 연간

²케나프칩 CHP는 펠릿 제조시설의 전력 사용량을 전량 공급할 수 있는 규모로 가정하였으며 효율은 BioGrace-II의 기본 CHP 설정을 적용하였다(전력효율: 16.3% / 열효율: 69.6%). 이 경우 펠릿 제조시설에서는 잉여 열이 발생하는데, 잉여 열은 인근에 있는 건물 등에서 이용되는 것으로 가정하였다. 최종 생산되는 케나프 펠릿의 양은 CHP에서 자체 사용되는 케나프 원료를 제외한 양이다.

³전라북도농업기술원에 따르면 함유율 15%의 케나프 바이오매스는 추가 건조 없이 펠릿 제조가 가능하다. JRC 보고서에서 짚 펠릿의 경우에도 함유율 13.5%에서 건조 과정 없이 펠릿으로 제조되는 것으로 가정되고 있다. 그러나 본 분석에서는 펠릿 제조시설에서 15% 함유율 케나프 원료를 10% 함유율로 건조하는 것으로 가정하였다. 현실적으로 일반적인 바이오매스 원료의 경우 건조과정이 필수적이고, 날씨와 계절에 따른 변동가능성이 있으며, 펠릿 성형 이전 원료의 함유율을 일정하게 맞춰야 하는 기술적 필요 등에 따라 건조과정에 보수적인 가정을 적용하였다.

¹잔재물 바이오매스 연료의 경우 농업잔재물, 짚펠릿, 바가스펠릿의 생산경로가 있으나 농업잔재물과 짚펠릿의 경우 건조 과정이 없고 바가스펠릿은 생산경로가 달라서, 과정 구성이 유사한 포플러 에너지작물 시트를 사용하되, 발열량, 함유율 등을 케나프에 맞추어 조정하였다.

Table 2. Generation Quantity and Physical Properties of Kenaf Residues

Parameters	Value	Unit
Annual generation quantity ^a (at 0% water)	18.7	mt/ha/yr
Moisture content ^b (after 5 months field drying)	15%	wt. %
LHV ^c (at 0% water)	17.4	MJ/kg _{dry}

^a: 1 ha generation data is a simple conversion of 10a-based production to 1 ha, and 32 tons of Kenaf per 1 ha per year is produced based on 27% moisture content after one week of harvest, which is 23.4 mt/ha and the double stem ratio is 80%. It was assumed that all residual water stems could be recovered.

^b: Kenaf stems were assumed to be naturally dried in the open field after leaf harvesting and cutting, similar to the straw pellet manufacturing process.

^c: The LHV of Kenaf raw material was converted based on a moisture content of 0% using the average moisture content and the average LHV (average moisture content of 6.28% and average LHV of 16.3 MJ/kg) of the 4 proximate analysis results.

32톤이 생산되고 이를 함수율 0%의 건량 기준으로 환산하면 23.4 mt/ha이다. 이 중 줄기의 비율은 80%로 이를 적용하면 연간 줄기 잔재물 발생량은 18.7 mt/ha이고, 이는 전량 수집 가능하다고 가정하였다. 케나프 줄기는 4~5개월의 노지 건조를 거치면 15%의 함수율 수준으로 건조되고, 함수율 0%의 저위발열량은 17.4 MJ/kg이다.

이후 생산과정에서 투입되는 에너지 사용량 및 운송거리는 Table 3과 같이 가정하였다. EU RED-II 방법론에 따라 기계 설비에 대한 부분은 고려하지 않는다. 케나프 줄기 잔재물 수집은 EU JRC 보고서의 짚펠릿 원료 수집 방식인 베일링(baling) 방식을 준용하여 이루어진다고 가정하여 연료 사용량을 적용하였다. 펠릿 제조시설의 생산효율은 JRC 보고서 설정값인 99%를 적용하였고, 케나프 펠릿 제조과정에서 사용되는 전력과 건조열은 케나프칩을 연료로 하는 제조시설 내 열병합발전시설(CHP)을 통해 자가 공급하는 것으로 가정하였다.² 펠릿 제조시설의 전력 사용량 및 경유 사용량은 JRC

보고서 설정값을 사용하였다. 건조열 사용량의 경우 JRC 보고서의 기본 설정값이 함수율 50%의 목재칩 1톤 건조에 필요한 열량으로 되어 있어, 함수율 15% 기준의 케나프칩 1톤 기준으로 환산하여 적용하였다.³ 운송과정의 경우 원료 운송거리 100 km, 펠릿 운송거리 100 km로 단순 가정하였으며, 운송수단은 JRC 보고서 설정값으로 칩 운송시 40톤 경유트럭과 펠릿 운송시 40톤 경유트럭을 각각 가정하였다. 최종에너지 변환 효율(발전효율)의 경우 JRC 보고서 기본값 산정에 사용된 효율인 25%를 가정하였다.

3. 결과 및 고찰

케나프 펠릿의 전과정 온실가스 배출량을 분석한 결과 Table 4와 같이 산정되었다. 수집 단계의 배출량은 제조 과정과 구분을 위해 별도 포기하였다. 발전 단계 이전 연료 기준의 전과정 온실가스 배출량이지만 EU RED-II 방법론대로 사용단계(최종에너지 변환 단계)의 비CO₂ 배출량이 포함되어 있다.

앞의 식 (3)을 적용하여 최종에너지 변환 후 생산된 전기의 총 온실가스 배출량을 산정하면, 발전효율 25%를 기준으로 케나프 펠릿을 연료로 한 전력의 전과정 온실가스 배출량은 11.9 gCO₂eq/MJ로 산정되었다. 이는 EU의 전력 기준 화석연료 비교치(EC_{F(El)}; 183 gCO₂eq/MJ)와 비교할 때 94%의 온실가스 배출 감축률을 나타낸다. 기 서술한 대로 EU는 RED-II에서 재생에너지 발전 의무를 이행하고 각종 보조금을 받기 위한 바이오매스 신규 발전 요건을 2021년~2025년 신규 발전소 기준 화석연료 비교치 대비 최소 70% 저감율, 2026년 이후 신규 발전소 기준 최소 80% 저감율을 충족할 것을 법제화하였는데, 케나프 펠릿의 경우 이를 충족할 수 있는 것으로 산정되었다.

케나프 펠릿 생산 전력의 전과정 온실가스 배출량을 국내 전력배

Table 3. Inputs and Assumptions for GHG Emission Assessment of Kenaf Residue Pellet

Flow	Inputs	Value	Unit
Collection	Diesel	104.3	L/ha/yr
	Pelletising efficiency	99%	%
Processing	Electricity	853.4	MJ/mt _{pellet}
	Diesel	0.954	L/mt _{pellet}
	Heat	220	MJ/mt _{kenafchip}
	CHP efficiency	electrical efficiency : 16.3% / thermal efficiency : 69.6%	
Transport	Transport distance of feedstock	100	km
	Transport distance of pellets	100	km
	Transport vehicle	40 ton truck (diesel)	-
Final conversion	Electrical efficiency	25%	%

Table 4. Calculated GHG Emissions of Kenaf Residue Pellet

Flow	Collection	Processing	Transport	Non-CO ₂ emissions from the fuel in use	Sum
Value (gCO ₂ eq/MJ _{pellet})	1.3	0.3	1.2	0.3	3

Table 5. GHG Emission Savings of Electricity Generated from Kenaf Residue Pellet Compared to Domestic Electricity Emission Factor

Parameter	Electricity emission factor (A)	Emission factor of electricity generated from Kenaf residue pellet (B)	GHG emission saving ((A-B)/A)
Value (kgCO ₂ eq/MWh)	443.4	42.8	90.3%

⁴이는 일본 바이오매스 발전사업자협회에서 공급자들에 대한 조사를 바탕으로 BioGrace-II 톨을 이용하여 산정한 것이다. 일본의 계산에 사용된 가정값은 수집, 가공, 발전의 경우 BioGrace-II 톨의 기본값, 수송에 대해서는 공급자 정보를 활용한 대략의 수송거리를 사용한 것으로 기술되어 있지만 정확히 나타나 있지는 않아서 가정값 차이로 인한 결과값 차이는 있을 수 있다.

Table 6. Comparison of GHG Emission Savings from Kenaf Residue Pellet and Typical Wood Pellets (wood pellets emissions calculations from Japan Biomass Power Association)

Biomass fuel production system	Country of origin	Feedstock	Heat provision for process drying	GHG emissions (gCO ₂ eq/MJ _{electricity})					Sum
				Cultivation	Collection	Processing	Transport	Final conversion	
Wood pellet	US East	FR 63%, WIR 37%	Biomass	-	4.7	18.6	38.7	1.2	63.3
		FR 99%, WIR 1%	Biomass	-	7.8	29.7	43.9	1.2	82.1
		FR 30%, WIR 70%	Biomass	-	2.2	27.5	44.6	1.2	75.5
	Canada	WIR 100%	Natural gas	-	-	5.6	22.6	1.2	29.4
		WIR 100%	Biomass	-	-	38.6	20.0	1.2	59.8
		FR 50%, WIR 50%	Biomass	-	3.7	9.5	24.5	1.2	38.9
	Vietnam	FIR 50%, WIR 20%, 속성수 30%	Biomass	5.0	3.7	26.7	14.9	1.2	50.5
		WIR 100%	Biomass	-	-	28.6	12.3	1.2	42.1
		Kenaf residue pellet	Korea	AIR 100%	Biomass CHP	-	5.1	1.1	4.7

FR : Forest residue
 WIR : Wood industry residue
 AIR : Agricultural residue

출계수와 비교하는 경우[8], 케나프 펠릿 생산 전력의 배출계수는 11.9 gCO₂eq/MJ 배출량을 MWh 단위로 환산할 때 42.8 kgCO₂eq/MWh로, 국내 발전단 기준 전력배출계수 443.4 kgCO₂eq/MWh 대비 온실가스 배출량을 90.3% 줄일 수 있는 것으로 산정되었다.

국내에 수입되는 목재펠릿과 전과정 온실가스 배출량 비교의 경

우, 수입 목재펠릿에 대해 국내에 기존 분석자료가 없어 일본의 자료를 참고하여 비교를 진행하였다[9]. 일본은 재생에너지 발전을 위해 목재펠릿 등 바이오매스 연료를 미국, 캐나다, 동남아시아 등지에서 수입해서 사용하고 있으며, 목재펠릿의 원산지에서 도착지까지의 해상운송 거리가 우리나라와 비슷하다. 또한 일본에서는 현

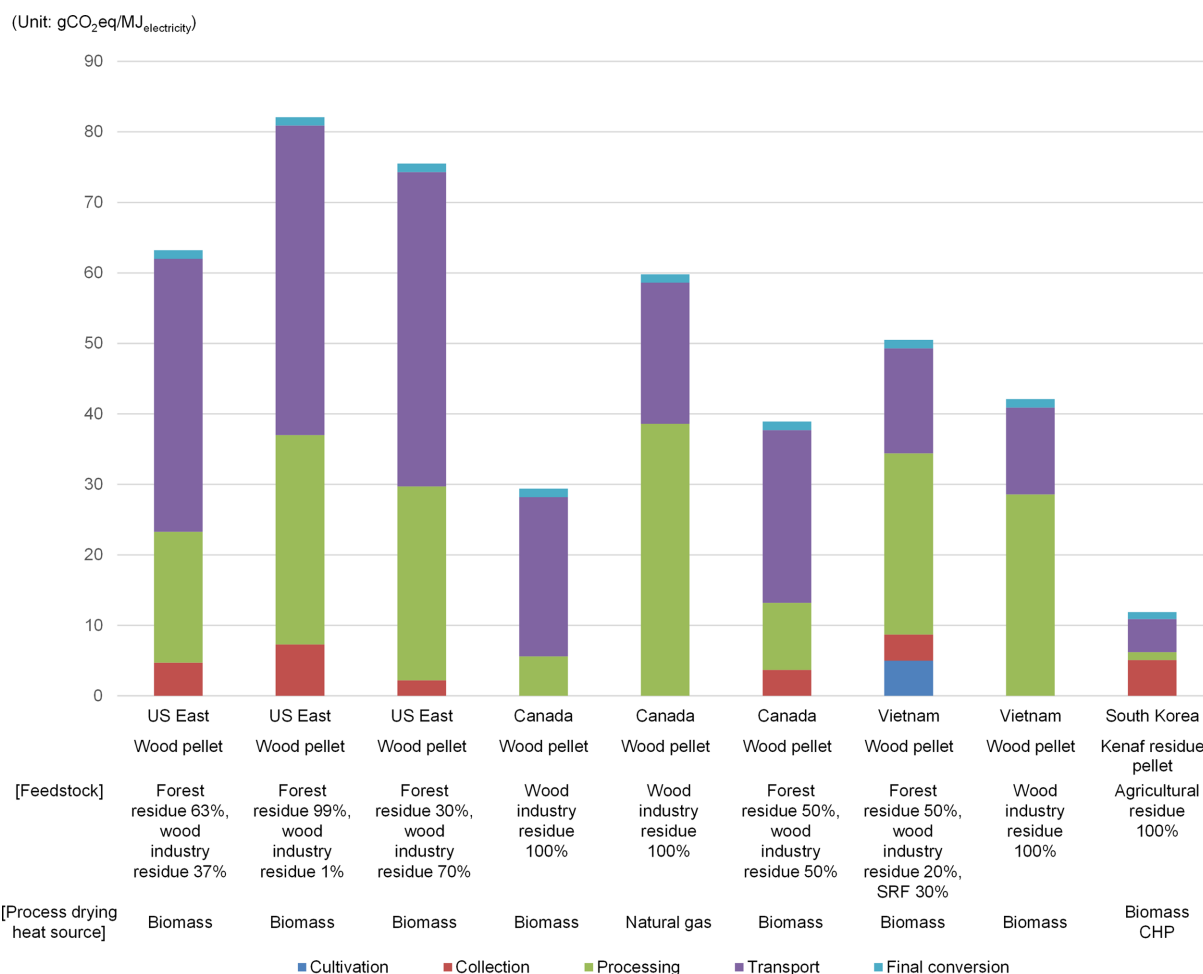


Fig. 2. Comparison of Life Cycle GHG Emissions of Electricity Generated from Imported Wood Pellets and Kenaf Residue Pellet (imported wood pellets emissions calculations from Japan Biomass Power Association).

재 EU의 제도를 참고하여 바이오 연료에 대한 지속가능성 법제화를 진행하고 있는 단계로, 이에 부속 워킹그룹에서 수입 목재펠릿과 바이오매스 연료에 대해 BioGrace-II 톨을 이용하여 전과정 온실가스 배출량 산정을 수행하였다. 그 결과 발전효율 25% 기준으로 수입 목재펠릿으로 생산한 전력의 전과정 온실가스 배출량은 29.4에서 82.1의 배출량 범위를 가진 것으로 산출되었다(Table 6).⁴

이 결과를 케나프 펠릿과 비교하면, 케나프 잔재물 펠릿으로 생산한 전력은 수입 목재펠릿 대비 최소 59.6%(캐나다, 임업잔재물 100%, 건조열원 바이오매스)에서 최대 85.5% (미국 동부, 숲잔재물 99%, 임업잔재물 1%, 건조열원 바이오매스)까지 온실가스 배출량을 저감할 수 있는 것으로 분석되었다. 이를 그래프로 나타내면 Fig. 2와 같다.

4. 결 론

바이오에너지의 지속가능성 확보를 위한 앞선 체계가 마련되어 있는 EU RED-II의 방법론을 활용하여 국내 농업 잔재물 바이오매스인 케나프 줄기 펠릿과 이를 이용한 바이오매스 발전의 이론적인 전과정 온실가스 배출량을 산정한 결과, 배출계수가 42.8 kgCO₂eq/MWh로 국내 전력배출계수 대비 90.3%의 온실가스 배출량 감축을 달성할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 일본 자료를 활용해 수입 목재펠릿과 비교하는 경우 최소 59.6%의 온실가스 배출 감축이 가능하며, 국내에 대량으로 발생하는 잔재물 바이오매스를 바이오에너지 생산에 이용하는 경우 높은 수준의 온실가스 배출 감축 달성이 가능함을 확인하였다.

다만 본 전과정 온실가스 배출량 분석은 케나프 줄기 원료의 25% 정도를 제조 과정에서 자가 전력 및 열 공급에 사용한다는 가정 하에 이루어진 것으로, 경제성까지 고려하는 경우 적용에 한계가 있을 수 있다. 또한 생산경로가 대부분 가정값이고, 생산 규모에 대한 효율 차이가 고려되지 않고 기본값으로 적용되었으며 사용 계수들이 EU 통계에 근거하고 있는 점 등은 향후 전과정 온실가스 배출량 평가 체계 도입을 위해서는 보완이 필요한 부분이다.

감 사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ0147792020)의 지원에 의해 이루어진 것임.

Reference

1. Korea Energy Agency New and Renewable Energy Center, "Statistics of New & Renewable Energy (published 2021)," (2021).

2. Lee, S. H., "The Value and Utilization of Domestic Biomass Power," *KDB Monthly*, **772**, 53-72(2020).
3. The Board of Audit and Inspection of Korea, Audit Report on Current Status of New Growth Engine Energy Business (2017) (retrieved from <https://www.motie.go.kr>)
4. Korean Law Information Center, Management and Operation Guidelines for the New and Renewable Energy Portfolio Standard and Fuel Standard (available at www.law.go.kr)
5. Ministry of Trade, Industry and Energy, "The 5th Master Plan for Research, Development, Use and Dissemination of New & Renewable Technology," (2020) (retrieved from www.motie.go.kr).
6. Ministry of Environment, Guideline for K-Taxonomy (2021) (retrieved from <https://www.biograce.net> (downloaded at 2022.04.01)).
7. Giuntoli, J., Agostini, A., Edwards, R. and Marelli, L., "Solid and Gaseous Bioenergy Pathways: Input Values and GHG Emissions: Calculated According to Methodology Set in COM (2016) 767: Version 2, EUR 27215 EN," European Union (2017).
8. Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea, "2021 Approved National Greenhouse Gas Emission & Absorption Factor," (2022) (retrieved from www.gir.go.kr).
9. Biomass Power Association of Japan, "On the Calculation Result of Biomass Fuels Lifecycle GHG and Further Plans," The 12th Meeting of Biomass Sustainability Working Group (2021) (retrieved from https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene/shinene/shin_energy/biomass_sus_wg/pdf/012_02_00.pdf).
10. Phillips, W. A., Fitch, G. Q., McCollum III, F. T., Adams, R. S. and Hartnell, G., "Kenaf Dry Matter Production, Chemical Composition, and In Situ Disappearance When Harvested at Different Intervals," *The Professional Animal Scientist*, **15**(1), 34-39(1999).
11. European Parliament and Council, 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) (available at <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/2022-06-07>).

Authors

Youn Il Kim: Master, School of Food biotechnology & Chemical Engineering and Carbon-Neutral Resources Research Center, Hankyong National University, Anseong, 17579, Korea; qwer7489@naver.com

Sun Young Jung: Manager, Envelops Co., Ltd., Seoul, 04768, Korea; sunyoung@en-velops.com

Youngjae Jo: Director, Envelops Co., Ltd., Seoul, 04768, Korea; young@en-velops.com

Sung Yoon: CEO, Envelops Co., Ltd., Seoul, 04768, Korea; syoon@en-velops.com

Byung Hwan Um: Professor, School of Food biotechnology & Chemical Engineering and Carbon-Neutral Resources Research Center, Hankyong National University, Anseong, 17579, Korea; bhum11@hknu.ac.kr