



산림바이오매스에너지에 관한 과학적 근거에 따른 통설적 접근

이승록¹⁾ · 한규성^{2)*}

Forest Biomass Utilization for Energy Based on Scientifically Grounded and Orthodox

Seung-Rok Lee¹⁾ · Gyu-Seong Han^{2)*}

Received 4 December 2023 Revised 7 February 2024 Accepted 7 February 2024 Published online 13 March 2024

ABSTRACT Addressing climate change necessitates evidence-based policies grounded in science. The use of forest biomass for energy production is based on a broad scientific consensus at the international level. However, some environmental groups in South Korea are opposing this system of energy production. Through this study, the authors aim to reduce unnecessary confusion and foster an atmosphere conducive to meaningful evidence-based policies. We have classified the issue into eight categories: biological carbon cycle, carbon debt, nature-based solutions, air emissions, cascading principles and sustainability certification, forest environmental impacts, climate change litigation, and the behavior of environmental groups and public perception. Consequently, the following key points were derived: (1) the actions of some environmental groups seem to follow a similar pattern to denialist behavior that denies climate change and climate science; (2) the quality of evidence for campaigns that oppose the use of forest biomass for energy production is low, with a tendency to overgeneralize information, high uncertainty, and difficulty in finding new claims.; (3) most of the public believes that forest biomass energy is necessary, and the governments of major countries are aware of its importance. Significantly, Forest biomass for energy is based on an overwhelming level of scientific consensus recognized internationally.

Key words Bioenergy(바이오에너지), Wood pellet(목재펠릿), Carbon neutral(탄소중립), Climate lawsuit(기후소송), Evidence based policy(증거기반정책)

1. 서론

기후변화정책 개발에서 핵심 역할을 맡은 과학은 불확실성과 복잡성, 정치적 이슈와 서로 영향을 주고받으면서 과학자들에게 다양한 역할을 부여한다.^[1] 그러나 기후변화와

관련한 행위자들이 세간의 지식과 견주어 상반된 해석을 도출하는 것은 결코 놀라운 것이 아닌데, 이는 서로 다른 출처에 의존하기 때문이다.^[2] 따라서 확증편향 등 논리적 오류에 기반한 체리피킹(Cherry Picking)이나 오용된 증거를 의사결정 과정에서 배제하고 타당한 과학 증거를 활용하는 것은 더 나은 거버넌스와 사회정책 목표 달성에 도움이 된다.^[3]

이처럼 증거의 품질을 고려해 신뢰할 수 있는 정책을 결정하는 것을 ‘증거기반정책(Evidence Based Policy)’이라 정의하는데,^[4] 이는 국제기구를 비롯한 선진국 행정의 핵심 패러다임으로 자리 잡고 있다.^[5] 증거기반정책은 과학적이고 객관적으로 설명 가능한 근거로 문제의 해결 가능성을

1) Ph.D Student, Graduate School of Energy and Environment (KU-KIST GREEN SCHOOL), Korea University

2) Professor, Department of Wood and Paper Science, College of Agriculture, Life & Environments Sciences, Chungbuk National University

*Corresponding author: wood@chungbuk.ac.kr

Tel: +82-43-261-2807

Fax: +82-43-273-2241

높이려는 정책적 노력을 의미하기도 한다.^[6] 이 과정에서 활용되는 근거가 바로 ‘과학 문헌’인데, 이는 분석의 맥락과 정책 목표에 따라 서로 다르게 해석될 여지를 제공하거나 중요한 매개 변수와 주요 가정, 그리고 도출되는 결과에 영향을 주기도 한다.^[7]

이때, ‘잘못된’ 과학적 증거는 과학에 대한 대중의 이해를 저해하고, 연구결과에 대한 신뢰를 약화해 정책 결정을 지연시키는 부정적 속성을 지닌다.^[8] 그렇다면, 기후변화와 관련하여 잘못된 과학 증거가 어떻게 유통되는지 살펴볼 필요가 있다. Farrell *et al.* (2019)에 따르면 소수의 전문가가 주도하는 패턴화된 조직적 네트워크(Topology)가 기후에 관한 ‘과학적 허위정보’를 전례 없는 규모로 생산하고 있으며, 확립된 사실에 대한 의심을 증폭시키기 위한 행위—*과학적 합의 불신, 과학 문헌 왜곡, 선택적 인용, 백서 발간, 인터넷 기사 등*—를 바탕으로 과학적 정당성이나 대등한 위치에서 과학적 반론이 존재하는 것처럼 묘사하여 대중의 관심으로 가장한다고 밝혔다.^[8]

한편 이는 ‘부인주의(Denialism)’로 정의되기도 하는데, Diethelm and Mckee(2009)에 따르면 과학자들 사이에 증거와 관련한 압도적인 합의가 존재함에도 부인주의자는 그 합의 존재 자체를 부정하거나, 어떠한 주장을 내세우는 행동에 대하여 스스로 ‘지배적인 정통성에 대한 지적 용기의 표시’로 간주함으로써 본인들의 이데올로기 또는 신념(Ideology or Faith)과 맞지 않는 모든 것을 거부하기에, 부인주의자와는 정상 수준의 학문적 담론이 어렵다고 밝혔다.^[9] 증거 기반정책의 수립과정에서 신중한 접근이 요구되는 이유다.

이러한 배경을 토대로 본 연구는 산림자원을 활용한 에너지, 즉 ‘산림바이오매스에너지’¹⁾에 대하여 ‘가짜 재생에너지’ 혹은 ‘빨감’이라는 언어적 유희로 인간적 감정을 담아 그 가치를 낮추고자 노력하는 일부 환경단체(Environmental Group, EG)의 주장에 주목했다. 이들은 ‘기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)가 발간한 보고서 등을 근거로 관련 정책에 의문을 제기한다.

하지만 IPCC가 발간한 「1.5°C 특별보고서」에 따르면,^[10] 2050년 기준 바이오매스를 활용한 총1차에너지 공급 비중

1) 원료에 해당하는 것은 산림바이오매스이며 연료(제품)에 해당하는 것은 목재펠릿과 목재칩이 대표적이다. 이를 활용한 에너지를 산림 바이오매스에너지라 지칭한다.

과 발전량은 중앙값 기준으로 각각 27%, 8%에 달한다. IPCC는 같은 보고서에서 바이오에너지와 결합한 탄소 포집 및 저장기술(Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS)의 유무와 별개로, 에너지 부문의 탈탄소화에 바이오에너지가 다양한 역할을 수행하므로 1.5°C 경로에서 중요하다고 강조한다. 국제에너지기구(International Energy Agency, IEA)가 2023년 최신화하여 발표한 「Net Zero Roadmap: A global pathway to keep the 1.5°C goal in reach」에 따르면^[11] 2050년 바이오에너지 사용은 발전 부문에 주로 집중되어 전 세계 에너지 공급의 18%를 차지하게 될 것이고, 이를 위한 원료의 절반 이상은 산림부산물 이 될 것으로 예측했다. 같은 보고서에서 IEA는 2022년 687 TWh로 집계된 전 세계 바이오에너지 발전전력량은 2050년까지 BECCS를 포함하면 3,700 TWh 까지 확대될 것으로 내다봤다. 이를 증명하듯 2022년 기준 EU-27과 영국의 목재펠릿 소비 총량은 3천만 톤에 달했고, 국제총생산량은 4.6천만 톤, 국제 총 생산능력은 7천만 톤 수준에 도달함으로써 뚜렷한 성장세를 보인다.^[12~14]

외견상 산림바이오매스에너지를 둘러싼 EG의 주장은 마치 대등한 논쟁의 여지가 있는 것처럼 보이지만, 실상은 모순임을 알 수 있다. 따라서 국제적 수준의 기본원칙에 대한 과학적 합의를 토대로 증거기반정책의 배경을 한층 강화하기 위해서는 일각에서 제기하는 주장들을 학문적 관점에서 고품질의 증거로 분석할 필요가 있다.

이에 본 연구는 그간 제기된 이슈를 구체적으로 항목화하고 국제 수준의 방대한 과학적 합의사항과 정책적 측면에서 주요국(미국, 영국, 일본, EU 등) 및 국내 현안을 살펴 그 타당성을 점검하고자 한다. 나아가 산림바이오매스 에너지에 대한 국내외 EG의 주장과 그 증거의 품질을 분석하여 정책 활용 측면에서 적합성을 판단하고자 한다. 이로써 이슈화에 따른 불필요한 혼란을 줄이고, 다양한 이해관계자들에게 객관적 통찰력을 제공하여 바이오에너지 전반에 건강하고 유의미한 증거기반정책이 자리매김하도록 돕는 것을 본 연구의 목적으로 설정하였다.

2. 연구방법

산림바이오매스에너지에 대한 과학 중심의 증거기반정

책 실현을 위해서는 증거의 품질을 판단하는 기준을 우선 정립해야 한다. 이를 위해 Howes *et al.*(2018)이 수행한 영국 기후변화위원회(UK Committee on Climate Change, UK CCC)의 보고서에 명시된 증거품질판단 분류체계를 참고했으며,^[15] 그 기준은 아래와 같다.

- 높은 품질: 학술지널, 국제 연구프로젝트에 따른 연구, 정부 지원 연구
- 중간 품질: 민간자금(협회, NGO, 기업, 개인)
- 낮은 품질, 신뢰성 확인 곤란: 웹사이트, 블로그 등

본 연구는 위 기준을 참고하여 보편적으로 인정받는 양질의 과학적 증거로 높은 품질을 확보하고자 각국 정부 자료와 IEA 보고서, 산림자원과 바이오에너지 부문에 특화된 ‘IEA Bioenergy’의 자료, 그리고 선행연구에 해당하는 Berndes *et al.*(2016)^[7]과 Cowie *et al.*(2021)^[16]을 중점 활용했다.

IEA 데이터와 보고서는 180여 개국으로부터 권위 있고 신뢰 가능한 데이터를 수집·분석하여 정책 권고안을 제공한다.^[17] 우리나라는 IEA에 정식 가입하기 위해 국내 비준 절차까지 거쳤으므로 그 정당성과 권위를 존중하여 해당 웹사이트

정보라 하더라도 높은 품질의 증거로 간주했다.^[18] Berndes *et al.*(2016)^[7]의 보고서는 정책지원을 위한 European Forest Institute의 Multi Donor Trust Fund(프랑스, 독일, 핀란드, 스페인, 스웨덴 등 EU 소속 국가에서 마련한 기금)의 협조로 각국의 연구진이 참여한 결과물이다. Cowie *et al.*(2021)^[16]은 IEA Bioenergy Technology Collaboration Programme Task 45의 ‘Climate and sustainability effects of bioenergy within the broader bioeconomy’ 프로젝트로, 미국 에너지부 등의 지원으로 각국의 권위 있는 연구기관들의 참여와 동료심사까지 거친 높은 수준의 증거 자격을 갖췄다고 볼 수 있다.

이와 반대되는 주장은 공신력 있는 출처에서 식별할 필요가 있을 것인데, 최근 영국 의회(하원)가 사회 각계를 대상으로 추진한 ‘Sustainable Timber and Deforestation’ 프로그램으로 제출된 구두·서면 증거를 참고했다.^[19] 보조적으로는 산림바이오매스 에너지를 상대로 반대 캠페인을 추진하는 주요 EG(Forest Defenders Alliance; FERN; Dogwood Alliance; WWF; NRDC; PFPI; EPN; and Biofuelwatch 등)가 발간한 백서, 웹사이트, 그리고 각각의 출처에서 언급된 선행연구를 살폈다.

이렇게 마련한 주요 논의 항목은 다음의 8가지로 구조화

Table 1. Scientific and societal orthodoxy on forest biomass energy utilization

Category	Scientific and societal orthodoxy on forest biomass energy utilization	Reference
Biological carbon cycle	<ul style="list-style-type: none"> • Given the inherent differences between circular biogenic carbon and fossil fuel-derived carbon, it is inappropriate to compare their impacts based on emission levels at the point of combustion. 	Riebeek (2011); IPCC (2013); KSLA (2018); Welfle <i>et al.</i> (2020); IEA Bioenergy (2002, 2020, 2023a); US EIA (2022) UK Forest Research (2023b); The Government of Australia (2023)
	<ul style="list-style-type: none"> • When utilizing biomass for energy, emissions are not included in the ENERGY sector to prevent double counting, considering that they have been accounted for in the AFOLU sector. • If counted duplicated, the increase in complexity and uncertainty would hinder the achievement of larger objectives intended through carbon accounting measures (such as leakage prevention, prevention of domestic and international forest carbon stock loss, and reduction of fossil fuels). • It is reasonable to ensure consistency and verifiability through better data in all countries. 	Kline <i>et al.</i> (2009); Pingoud <i>et al.</i> (2010); Welfle <i>et al.</i> (2020); The Government of Canada (2020a); Cowie <i>et al.</i> (2021); IPCC (2016, 2023); GHG Protocol(2023); Japan METI (2023b); UK DESNZ (2023a); UK parliament (2023b)
	<ul style="list-style-type: none"> • Forest biomass energy is carbon neutral and replaces fossil fuels. • The exclusion of bioenergy, CCS, and BECCS increases the likelihood of failing to limit global warming to below 2°C with high confidence. 	IEA Bioenergy (2011); IPCC (2014, 2018); U.S. EPA (2018); Kunkuk University (2019); Germany Federal Ministry of Food and Agriculture (2021); The government of the Republic of the Korea (2020, 2023); ECO & PARTNERS 2°C (2021); U.S. EIA (2022); Japan METI (2022a, 2023b); UK DESNZ (2023a); KFS (2023a)

Table 1. Scientific and societal orthodoxy on forest biomass energy utilization (Continued)

Category	Scientific and societal orthodoxy on forest biomass energy utilization	Reference
Carbon debt	<ul style="list-style-type: none"> · Due to the complexity of the forest biomass energy system, it cannot be represented by a single indicator, has uncertainty, and is influenced by the subjectivity of the researcher. 	Malmsheimer <i>et al.</i> (2011); Cherubini <i>et al.</i> (2013); Bernier and Paré (2013); Miner <i>et al.</i> (2014); Ranius <i>et al.</i> (2018); IEA Bioenergy (2020); Schulze <i>et al.</i> (2020); Holmgren (2021); Cowie <i>et al.</i> (2021); Peng <i>et al.</i> (2023); Donnison <i>et al.</i> (2023)
	<ul style="list-style-type: none"> · The concept of carbon debt is perceived as having a long recovery time from a human perspective, and even when examining the state of forests over a period of more than 100 years, there is no specific point at which one can claim that carbon debt has occurred. · The concept of carbon debt exaggerates unrealistic assumptions as if they were facts, and denies the climate benefits of bioenergy. 	IEA Bioenergy (2011, 2020); Berndes <i>et al.</i> (2016); Cowie <i>et al.</i> (2021); Donnison <i>et al.</i> (2023)
	<ul style="list-style-type: none"> · The impacts of forest carbon should be evaluated, considering various impacts at the landscape level. · From a landscape perspective, changes in forest carbon storage appear evenly. It should be a modeling that integrates all cumulated affected parts in time dynamics related to wood utilization as a resource. 	IPCC (2001, 2007); Malmsheimer <i>et al.</i> (2011); Mckechine <i>et al.</i> (2011); Mckinley <i>et al.</i> (2011); Adams (2013); Berndes <i>et al.</i> (2016); Hoover and Riddle (2020); Cowie <i>et al.</i> (2021); IEA Bioenergy (2023b)
Nature-based solutions	<ul style="list-style-type: none"> · Given that there is no universally accepted definition yet, caution is needed in interpretation and approach. · There is a need to approach it in a way that maintains (or increases) the total benefits gained by society, and utilizing sustainable biomass for energy can be included in this. Conservation is not the only solution. 	Ter-Mikaelian <i>et al.</i> (2008); Malmsheimer <i>et al.</i> (2011); Janowiak <i>et al.</i> (2017); Sedden <i>et al.</i> (2020); Wendling <i>et al.</i> (2021); Lee <i>et al.</i> (2022); White House (2022); Choi <i>et al.</i> (2022, 2023)
Air emissions	<ul style="list-style-type: none"> · Substance emissions during the combustion of biomass can be controlled through various scientifically commercialized technologies. · Small combustion devices and firewood fuels are encouraged to change to modernized devices and high-quality wood pellet products. 	Khan <i>et al.</i> (2019); Lee and Han (2022); KFS (2023a, 2023b); U.S. EPA (2023); UK Forest Research (2023c); IEA Bioenergy (2023c)
	<ul style="list-style-type: none"> · Biomass serves as a base load renewable energy source that replaces fossil fuels such as coal power, contributing to the environment and climate. · The production and distribution of energy will expand, focusing on low-value-added biomass from raw materials such as forest residues and wood industry by-products. 	Malmsheimer <i>et al.</i> (2011); Bracmort (2016); Government of Canada (2020b); Tomlin (2021); UK DEFRA (2023); Bioenergy Insight (2023); UK DESNZ (2023a, 2023b); UK Parliament (2023b); UK CCC (2023); KFS (2023c); IEA (2023a); Lee <i>et al.</i> (2022a, 2022b, 2023)
Cascading principle and sustainability certification	<ul style="list-style-type: none"> · The principle of cascading (value-based) needs to be respected at the declarative level, and it is reasonable to leave it to market autonomy rather than legislation enforcement. · Realities such as geographically national forest resources specificity and energy supply stability must be considered. · The institutionalization of cascading principle increases complexity and does not guarantee that climate or economic benefits will always be high, nor is it easy to objectively define what a valuable purpose is. It can solidify the current(or former) resource use pattern. 	Malmsheimer <i>et al.</i> (2008, 2011); IEA Bioenergy (2016); Berndes <i>et al.</i> (2016); EC (2016); Olsson <i>et al.</i> (2017, 2018); EP and EU (2023)
	<ul style="list-style-type: none"> · The third-party certification serves as a means to verify the sustainability of bioenergy, and it is necessary to incorporate it into the legal system to suggest a meaningful direction for development. 	Adams (2013); Lee and Han (2021); Japan METI (2019, 2022b, 2023b); EC (2023a); IEA Bioenergy (2023d)
Forest environmental impact	<ul style="list-style-type: none"> · Forest biomass energy promotes forest management and enhances forest health. 	Berndes <i>et al.</i> (2016); Aguilar <i>et al.</i> (2016, 2020); Galik and Abt (2016); Tidwell (2016); Dale <i>et al.</i> (2017); U.S. EPA (2018); Hoover and Riddle (2020); Petrokofsky <i>et al.</i> (2021); UK DESNZ (2023c)
	<ul style="list-style-type: none"> · Successful forest management where logging does not exceed growth (optimization, not maximization, of carbon sequestration) is necessary. If not, it can be affected as a disturbance factor, such as in forest fires or by harmful insects. 	Janowiak <i>et al.</i> (2017); Cowie <i>et al.</i> (2021); U.S. EIA (2022); UNEP (2022); UK DESNZ (2023c)
	<ul style="list-style-type: none"> · From a long-term perspective, no meaningful changes in deep soil carbon due to wood harvesting can be observed. 	Ter-Mikaelian <i>et al.</i> (2008); Harrison <i>et al.</i> (2008); Lippke <i>et al.</i> (2011)

하였다. 탄소순환(Biological Carbon Cycle), 탄소 부채(Carbon Debt), 자연기반 해법(Nature-based Solution, NbS), 대기 배출물질과 청정성, 산림환경 영향성, 가치 단계적 원칙(Cascading Principle, CP)과 지속가능성 인증, 기후변화 소송, EG의 행동 방식과 대중의 인식이 그것이다. 특히 본 연구는 사회적인 부문까지 논의 범주를 확대하여 선행연구와의 차별성을 기했다.

본 연구를 통해 도출된 과학적이고 사회적인 통설은 제3장의 문두에 별도의 표를 요약 배치하여 그 중요성을 강조했다(Table 1 참조). 각 항목은 EG의 주장을 검증하는 형태로 전개하여 독자들의 접근성을 높였다.

3. 연구결과

3.1 산림바이오매스에너지와 탄소순환

(EG) 바이오매스를 연소하면 CO₂가 배출되므로 기후 위기에 도움이 되지 않을 것이다. IPCC 가이드라인에 따른 바이오에너지 탄소 회계는 오류다.^[20]

3.1.1 Biogenic CO₂ and Non-Biogenic CO₂

위 주장은 생물 유래 탄소(Biogenic CO₂)와 화석연료 등에 따른 탄소(Non-Biogenic CO₂)의 본질적 차이를 부인하는 주장이다. IPCC는 탄소순환 주기가 10,000년을 초과하는 느린 영역, 그리고 식생과 토양 탄소의 순환 주기가 각각 1~100년, 10~500년인 빠른 영역으로 구분한다. 화석연료 사용은 느린 영역에서 빠른 영역으로 탄소를 이동시키지만(일방향), 바이오에너지 체계는 빠른 영역 내에서 작동한다(양방향)(Fig. 1 참조).^[21~23] NASA 웹사이트^[24]와 스웨덴 왕립 농업·임업 아카데미의 과학적 의견도 동일하다.^[25]

Biogenic CO₂와 Non-biogenic CO₂의 근본적 차이는 기후위기 대응 수단으로서 화석연료를 줄여야 한다는 대전제로 연결된다. 이는 다시 바이오매스가 성장하는 동안 대기에서 탄소를 흡수했다가 연소를 통해 대기로 다시 환원하므로 조림과 재조림, 산림복원 등의 관리 활동으로 CO₂ 수준이 순증하지 않도록 순환계를 유지해야 한다는 필요성과 연계된다. 이를 반영하듯 IPCC 보고서는 ‘바이오에너지, CCS(Carbon Capture and Storage) 및 이 둘을 결합한

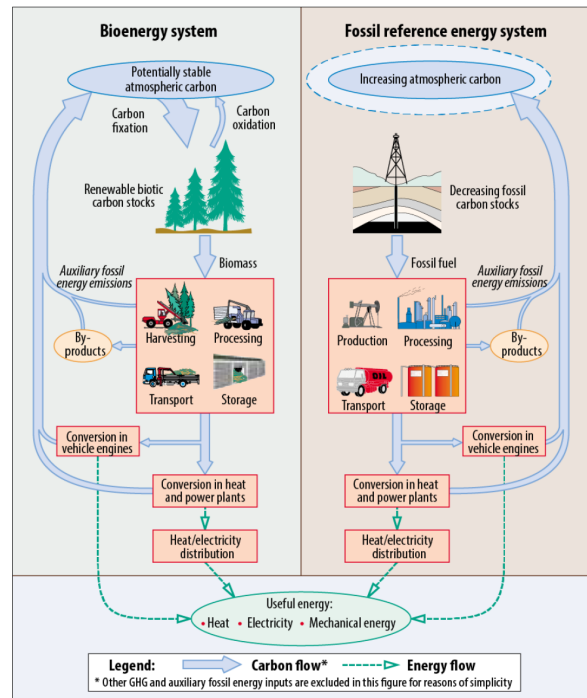


Fig. 1. Bioenergy CO₂ balance vs. Fossil fuel CO₂ balance.^[21]

BECCS와 같은 기술이 제한되면, 많은 기후 모형에서 온난화를 2°C 이하로 제한하지 못할 가능성이 크다(높은 신뢰도)’라고 강조했다.^[26] 따라서 전 지구적 수준의 기후위기에 대응하기 위해서는 개별 국가 단위의 특수성을 고려해 국제적으로 실행 및 이행점검이 가능한 메커니즘이 요구된다.^[27] 이러한 메커니즘이 바로 ‘IPCC 가이드라인’이다.

3.1.2 IPCC 가이드라인과 탄소 회계

앞서 언급한 IPCC 가이드라인은 국제 수준의 합의로 구현되었으며, 에너지원으로 활용하는 산림바이오매스까지 포괄한다. 산림바이오매스에너지와 관련한 세부 산정방법론은 UK Supergen Bioenergy Hub의 보고서에서 확인 가능한데,^[28] 이는 AFOLU(Agriculture, Forestry, and Other Land Use), ENERGY, WASTE, 그리고 International Bunker Fuel Emissions 부문에 걸쳐 광범위하게 연결된다. 여타 사항은 논외로 하되, 본 연구와 해당 메커니즘의 핵심은 ‘바이오매스를 에너지로 사용할 때 다른 부문과 중복하여 CO₂ 배출량을 산정하지 않도록’하는 것이다. 즉 바이오매스 연소를 통해 발생하는 CO₂ 배출은 AFOLU 부문의 일부로서 해당 부문에서 산정 및 보고하며, 에너지를 목

적으로 사용할 때는 ENERGY 부문에서 정보 항목으로만 보고한다.

이는 앞서 언급한 순환적 생물 유래 탄소의 성격을 전제로 하며, 가장 최근의 2019년 IPCC 가이드라인 개정 시에도 해당 내용의 일관성은 유지되었다.^[29,30] 온실가스 배출량에 관한 국제표준(GHG Protocol)의 경우에도 이러한 사항을 따르도록 하고 있으며, 기업활동에 관한 Scope 1, 2 또는 3 산정이라 할지라도 국가 온실가스 인벤토리와 동일한 접근법을 적용하도록 안내한다.^[31]

중복산정 금지와 관련해서는 다음의 네 가지 배경을 추가로 고려할 필요가 있다. (1) 바이오매스와 바이오에너지를 생산하는 국가는 AFOLU 부문 온실가스 인벤토리 내에서 배출량을 감축하는 편익이 존재하고, 이것을 이용하는 국가는 화석연료를 대체하여 ENERGY 부문 온실가스 인벤토리에 포함되는 배출량 감소를 유도함으로써 다수 당사자에게 합리적인 옵션으로 작용한다.^[28] (2) 교토의정서에서 온실가스 배출량을 인벤토리화하기 위한 시스템 경계로 국가 경계가 선택되었기 때문에, 복잡성과 불확실성을 증폭시켜 상황을 악화하는 것보다는 모든 국가의 참여를 통해 생물학적 탄소흡수원 및 배출원을 더 나은 데이터로 검증할 수 있도록 하는 것이 더 합리적이다.^[32] (3) 토지이용 변화의 유일한 원인이 바이오에너지도 아니며, 국가에 따라 일부 배출원을 계산하지 않기로 선택하는 경우가 존재한다.^[33] (4) 국익을 고려한 수확(벌채)된 목제품(Harvested Wood Products, HWP)의 온실가스 산정방법론도 일부 고려해야 한다. 결과적으로 온실가스 배출량에 대하여 논할 때 선진국 관점으로만 바라볼 일은 아니고 다양한 국가들의 개별 특수성과 상황을 넓은 시야로 바라봐야 한다.

따라서 단순히 바이오매스의 에너지 사용과 관련된 요소를 조정하고자 기존의 탄소 회계 프레임워크를 수정하게 되면, 국가들의 바이오매스 활용은 일시에 부정되고 기후 이점까지 부정됨으로써 오히려 전체 시스템에 좋지 않은 영향을 끼치게 될 수 있다. 나아가 바이오매스에 대한 탄소 회계상의 조치로 달성하고자 하는 더 큰 목적 - *누출 발생 방지, 국내외 산림 탄소저장량 손실 예방, 화석연료 감축 등* - 달성이 어려워질 것이며, 기후 이외의 부문까지 문제가 확대되어 탄소의 흡수를 돕는 임업 기반 활동이 화석연료나 도시개발과 같은 배출원 활동으로 그 지위가 부정될

수 있다는 지적이다.^[16]

한편 EG는 IPCC 가이드라인에 따른 연료별 배출계수에 주목하여 산림바이오매스가 석탄을 대체하면 MWh당 CO₂ 배출량이 더 많다고 주장한다.^[34] 하지만 IEA Bioenergy (2020)^[35]는 발열량과 탄소함량 비율 등에 따라 CO₂ 배출계수가 석탄과 일부 비슷하다 할지라도 연소 시점에서의 배출량을 상호 비교하여 연료전환에 따른 대기 중 온실가스 농도 영향까지 유추하는 것은 적절하지 않다고 강조한다. 바이오에너지가 반드시 같은 양의 석탄을 대체하는 것도 아니며, 다양한 외생변수로 인하여 일반화하기 어렵다. 선행 연구에 따르면 설비용량 100 MW 규모의 석탄발전을 동일 용량의 바이오매스 열병합 발전시설로 전환 시, 연간 약 78만 tCO₂eq의 온실가스 감축 효과가 존재한다는 평가다(20년간 운영 시 합계 약 1,552만 tCO₂eq 감축)^[36] 또한 전과정을 고려한 단위발열량(1 MJ)당 탄소발자국을 산출한 결과(상대 비교를 통한 일반화는 적합하지 않지만), 목재펠릿의 환경성(1.22E-02 kgCO₂eq/MJ)은 무연탄(1.34E-01 kgCO₂eq/MJ) 대비 약 1/11, 등유(8.71E-02 kgCO₂eq/MJ) 대비 약 1/7 수준에 불과하였다.^[37]

결과적으로 국가별 서로 다른 여건과 특수성을 고려할 때 건전한 바이오에너지 보급을 위해 견고하고 간단하면서도 투명하고 예측이 가능한 기준과 방법으로 화석연료를 얼마나 대체 가능한지, 이로써 산림의 탄소흡수량을 얼마나 증가시킬 수 있는지에 대한 논의가 더욱 실질적일 것이다.^[38] 즉 생물 유래 탄소와 화석 유래 탄소의 본질은 서로 다르므로 비교 대상이 아니라는 압도적인 과학적 합의를 존중해야 한다는 의미다.

3.1.3 주요국의 산림바이오매스에너지 정책과 입장

미국 환경보호청(U.S. EPA)은 2018년 탄소중립 연료로서 산림바이오매스에 대한 필요성과 확실성, 그리고 명확성을 부여한다고 발표했으며,^[39] 미국 에너지정보청(U.S. EIA)은 화석연료와 바이오매스 연소에 따른 온실가스가 서로 다르다고 구분 짓는다.^[40] 국가별 산림바이오매스에너지 활용에 따른 화석연료 대체 편익과 탄소중립성을 강조한 정책은 우리나라의 「2050 장기저탄소 발전전략(2020)」^[41]과 「탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획(2023)」^[42], 일본의 「2050년 탄소중립에 따른 녹색성장전

략(2021)」^[43,44], 영국 하원 환경감사위원회 보고서^[45]와 영국 정부의 「바이오매스 전략(2023)」^[46] 등이 대표적이다.

이 가운데 영국 정부가 최근 발표한 「바이오매스 전략(2023)」에 따르면 정부 지원을 토대로 경제 전반에 걸쳐 지속가능한 바이오매스 사용과 공급을 대폭 확대하고, 연관된 모든 정책에서 에너지 안보를 고려할 것이라 강조했다. 이 특징이다. 독일 정부도 「목재현장 2.0」을 통해 이와 유사한 의견을 선언했으며,^[47] 특히 산림과 목재 이용 부문(연료, 제품)에서의 기여가 없었더라면 독일의 온실가스 국가 총배출량은 14% 더 높았을 것이라는 분석도 내놓았다.^[48] 호주 정부도 바이오에너지의 생물 탄소 순환성을 분명히 인식하고 있는 것으로 확인된다.^[49] 참고로 우리나라는 「온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침」을 통해 바이오매스를 활용한 에너지 생산 시 직·간접 배출량을 산정하지 않도록 제도화하는 등 다양한 법체계를 마련하고 있으며, 산림청도 일관된 입장으로 정책 신뢰성을 유지하고 있다.^[50]

3.2 산림바이오매스에너지 활용과 탄소 부채

(EG) 산림바이오매스를 에너지로 활용하게 되면 연소 초기에 CO₂가 많이 발생하는데, 이를 회복하기까지 수십 년이 소요되므로 시급한 기후위기 대응에 부적합하다.^[51]

3.2.1 복잡한 생태 시스템에 대한 일반화의 한계

위 주장은 수학적 모형으로 산림이 수확된 후 재조립되어 다시 이용 가능한 시점까지 걸리는 기간을 탄소 부채(Carbon Debt)로 간주하고, 기후위기 대응 시점과 대조하여 산림바이오매스에너지 활용체계를 부정하는 논거로 활용된다.^[52~55]

하지만 산림바이오매스에너지 시스템은 복잡한 역학을 가지고 있어 단일 지표로 정량화하기 어렵다.^[56,57] 탄소 부채 개념을 주장하는 선행연구도 이와 같은 한계를 인식하고 있는바, Peng *et al.*(2023)^[58]은 국가별 용어 정의 차이에 따른 통계적 불확실성, 수확된 목재의 수량에 대한 불확실성, 산림에 존재하는 임목(나무)의 성장률 변화와 소요 시간의 불확실성 등이 존재한다고 밝혔다. 따라서 탄소 부채 개념은 산림바이오매스에너지 활용에 반대하는 주장을 뒷받침하는 일부 근거를 제시하겠으나, 공간과 시간 척도

에 대한 오해와 연구자의 주관성에 좌우된다는 비판은 피하기 어렵다.^[59~61]

Cowie *et al.*(2021)^[16]은 탄소 부채 방법론이 기후 완화 조치에서 바이오매스의 기여를 간과하고 있으며, 일반적인 시간 값을 선언하는 것은 가능하지도 적절하지도 않다고 비판한다. IEA Bioenergy(2020)^[35]는 종종 비현실적인 가정을 중요한 사실인 것처럼 과장하는 연구가 존재한다고 지적했다. 이는 국내 한 선행연구에서도 확인되는데,^[62] 해당 연구에 따르면 ‘현재 사용 중인 화석연료를 일시에 전부 바이오에너지로 대체’한다는 매우 비현실적인 가정에 기초한다. UK Supergen Bioenergy Hub가 발간한 보고서에 따르면,^[63] 산림을 경관 관점에서 볼 때 탄소 부채 개념은 인간의 기준에서 그 회복 속도가 길어 보일 뿐, 100년 이상의 기간에 걸친 산림 상태로 미뤄보아 탄소 부채가 발생했다고 주장 가능한 특정한 지점은 존재하지 않는다고 비판했다.

특히 기후와 산림이라는 거대 담론에 접근할 때는 임목(나무 한 그루 혹은 특정한 지역, Stand) 수준이 아닌 경관(거시적 산림지대, Landscape) 관점에서 생각해야 한다. 일반적으로 산림은 순환 관리되므로 한 그루의 나무가 수확되더라도 다른 나무들은 다양한 재성장 단계에 있으므로 전체 산림은 탄소흡수원으로 여전히 기능한다.^[64] 따라서 협소한 산림 단위 수준에서 연소까지의 배출량을 추정하는 것은 경관 수준에서 산림의 기후 영향과 상호작용을 간과한 것이며,^[65] 이로 인해 전체 시스템에 대한 오해나 왜곡을 유발하므로 정책 결정에 적절한 증거로써 유용하다고 간주하기 힘들다.^[7,65]

미국 의회보고서도 탄소가 산림생태계에 머무는 기간은 기후, 수문학, 영양분 가용성, 산림의 나이 등 여러 가지 이유로 다르며 흡수한 탄소의 배출은 산림에 따라 크게 다르다고 강조한다.^[66] 캐나다 정부는 산림바이오매스에너지가 화석연료 대비 상대적으로 더 많은 이산화탄소를 단기적으로 배출할 수는 있겠으나, 시간이 지남에 따라 산림은 재생 가능하여 대기에 순이익이 존재하므로 온실가스 순배출량을 줄이는 효과적인 방법이라 설명한다.^[67] IPCC는 개별적 기후 완화 조치가 특정한 시간대에 도달해야 한다고 결정짓지 않았고(다양한 시나리오를 제시), 대신 국제 수준의 인위적인 총 누적 CO₂ 배출량을 제한하는 조치가 필요하다

고 강조했다.^[16]

이 같은 논점을 종합하면 인류 사회는 기후변화 완화를 위해 단기 또는 장기 온실가스 감축 편익을 제공하는 가능한 모든 옵션을 사용해야 할 것이나, 산림바이오매스에너지라는 옵션 없이는 사실상 어렵다는 의견을 무게감 있게 수용해야 한다.^[68,69] 결과적으로 산림바이오매스에너지와 탄소 부채 개념을 연계하려는 EG의 주장은 지구 수준의 다중생태계를 미시적 관점에서 접근한 것이라 판단된다.

3.2.2 사회경제적 편익을 고려한 경관(Landscape) 수준의 올바른 접근

IEA Bioenergy(2023b)^[70]는 목재수확에 따른 일부 산림에서의 탄소 손실은 다른 산림에서의 성장으로 인한 탄소 흡수량의 증가와 균형을 이루어 경관 수준에서 탄소저장량의 변화가 고르게 나타난다고 설명한다. 이는 Fig. 2의 (A)를 통해 모식화되었는데, 그 평가 범위가 확대될수록 탄소 저장량의 변화는 균형 있게 수렴함을 알 수 있다. 또한, 이

그림은 목재수확량과 고사율이 산림 전체의 순성장량을 초과하지 않는 한 산림 탄소저장량이 유지됨을 뒷받침한다.^[65]

이러한 경관 규모 평가는 예상되는 수요에 반응하여 산림관리와 목재의 수확에 관련한 모든 변화영역을 통합하는 것이므로, 산림 시스템 역학을 더욱 명확하게 표현할 수 있다.^[7,71,72] IPCC(2007)도 이와 동일한 의견이다.^[73] IPCC가 채택한 모델은 Fig. 2의 (B)와 같다.^[74,75] 이 모델은 산림 순환경영의 영향평가 시 탄소 저장고(토양, 지상부 및 지하부 바이오매스, 토양 등)를 구성하는 핵심 요소의 변화에 대한 시간 역학적 평가와 화석연료 집약적인 제품 및 에너지 대체 편익을 누적하여 폭넓게 고려해야 한다는 것을 설명한다. 즉 산림자원 활용에 대한 편익은 경관 규모에서 모든 요소를 시공간적으로 통합한 가치평가모델에 기초해야 한다는 것이다. 다만 바이오매스에 대한 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)는 일부 불확실성이 존재함에 유의하여 접근해야 한다.^[33,76~81]

3.3 산림바이오매스에너지와 자연기반 해법

(EG) NbS 관점에 따라 숲을 자연 상태로 오랫동안 유지하기 위해 인간의 개입에 따른 산림관리는 최소화해야 한다.^[82]

위 주장은 환경에 대한 인간의 개입을 사실상 배제하자는 보존(Preservation) 관점이 우세한 주장이다. 하지만 NbS 개념은 아직 모호하고 보편화되지 않았으므로 해석과 접근에 유의해야 한다.^[83~85]

Seddon *et al.*(2020)^[86]에 따르면 NbS가 인류에게 생태계 서비스의 잠재적 역할을 인식하게 한다는 점에서 유의미할 것이나, 불확실성이 높고 적절한 비용평가 프레임워크가 부재하며 다양한 이해관계자 간 상충관계를 식별하기 어렵다고 설명한다. Choi *et al.*(2023)^[85]은 NbS를 바라봄에 있어 토지이용의 통합적 접근을 토대로 사회가 얻는 총편익을 유지 또는 증가하는 방향으로 바라봐야 한다고 보았으며, Choi *et al.*(2022)^[87]은 산림에 관한 NbS 활동에 바이오매스(바이오 차, 바이오 연료)가 포함된다고 판단했다.

파리협약 제5조 제1항은 ‘산림을 포함한 온실가스 흡수원 및 저장고를 적절히 보전하고 증진하는 조치(Conserve

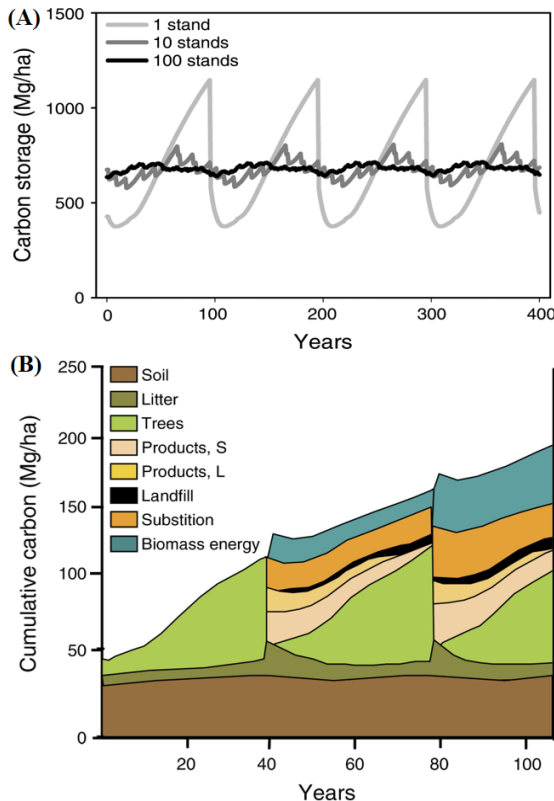


Fig. 2. (A) Changes in carbon storage as assessment levels, (B) An integrated valuation model to account for changes in reforestation-based carbon stocks.^[65,74,75]

and Enhance)’를 요구한다.^[88] 국내의 「생물다양성 보전 및 이용에 관한 법률」에서 언급된 생태계 서비스의 종류에는 ‘목재 등 유형적 생산물을 제공하는 공급 서비스’를 포함하고 있으며, 같은 법 제3조 기본원칙 조항에는 생물자원의 지속가능한 이용을 위하여 체계적으로 보호되고 관리되어야 한다고 규정함으로써 ‘보호와 관리’의 중요성을 대등하게 강조한다. 아울러 「탄소흡수원 유지 및 증진에 관한 법률」은 산림의 탄소흡수 기능을 유지하고 증진시켜 기후변화에 대응하기 위한 방안의 하나로, 목재제품과 산림바이오매스에너지를 균형 있게 반영하고 있다.

미국 산림청은 산림생태계에서 탄소격리의 극대화가 아닌 최적화를 강조한다.^[89] 최근 바이든 행정부가 발표한 ‘Opportunities to Accelerate NbS’ 보고서에 따르면^[90] NbS는 기술적인 접근(솔루션)과 강력한 동맹(Powerful Allies)이자 상호 보완적인 관계라며, 인플레이션 감소법안과 연계해 NbS를 위한 투자의 일환으로 산불 예방을 위해 연료(즉 산림 내 연소 가능한 바이오매스) 저감 및 산림관리 활동에 약 50억 달러를 투입한다고 밝혔다.

무엇보다 산림의 탄소격리 효과에만 초점을 맞추면 수확된 임산물을 활용한 실질적인 탄소저장 및 온실가스 대체 효과 등 다양한 편익을 놓치게 된다. 관리되지 않은 산림은 무제한으로 성장하지 않으며, 화재와 곤충, 질병, 폭풍 등의 교란에 노출되어 탄소흡수와 저장 기능이 저하된다.^[65] 그러한 점에서 산림보존은 규제되지 않은 목재의 수확으로 인해 막대한 산지 전용(Deforestation)이 발생하는 일부 국가에서는 유효한 접근일 것이나, 지속가능한 산림관리를 실천하면서 목재 자원을 탄소중립 에너지원으로 사용하는 곳에서는 보존만이 최선은 아니라는 의견에 주목할 필요가 있다.^[91] 결과적으로 NbS 관점에서의 접근이라 할지라도 되도록 주관적 해석과 일반화를 지양하고, 사회의 총편익을 높이는 관점에서 해석할 필요가 있다.

3.4 산림바이오매스에너지 활용과 대기 배출물질

(EG) 산림바이오매스에너지 활용 시 대기 배출물질로 인한 부정적 영향이 우려된다.^[92]

3.4.1 과학적 증거기반 정책

위 주장은 산림바이오매스에너지 활용 과정에서 발생하

는 배출물질에 대한 우려라고 볼 수 있으나, 이는 바이오매스 형상에 따른 발생량 차이와 대응기술의 진보를 깊이 고려하지 않은 주장이다. 환경부와 국립환경과학원 고시에 따른 배출물질 계수를 적용하면, 목재펠릿 합계가 유연탄의 5% 수준이고, 먼지(Particulate Matter, PM)와 황산화물(Sulfur Oxides, SOx)은 유연탄 대비 각각 2% 이내, 그리고 질소산화물(Nitrogen Oxides, NOx)은 유연탄 대비 32% 수준으로 환경성이 뛰어나다.^[50] 폐목재 기반의 바이오 고형연료(Bio-SRF)는 순수 목질계를 대상으로 하는 본 연구와 상관성이 떨어지므로 논외로 한다.

특히 연소제어가 용이하고 사실상 완전 연소에 가까운 발전 부문(Utility-Scale)에서 대기 배출물질 발생 여부를 논하는 것은 유의미하지 않다. 발전소별 입지와 설립연도에 따른 연소 기술적용 수준도 서로 다르므로 이를 수평에서 상대 비교하는 것도 부적절하다. 우리나라는 법률상 발전 호기별로 배출기준치를 별도로 정하고 있으며 사업장 대기 배출물질 정보를 실시간 공개하고 있다. 소규모 목재펠릿 보일러 연소기기는 KS 표준이 마련되어 있고 산림청은 불완전연소 가능성이 큰 화목보일러를 안정성 높은 목재펠릿 보일러로 전환을 독려하는바,^[93] 이는 미국의 정책과 동일하다.^[94]

적정 수준의 연소를 위해서는 무엇보다 연료의 품질이 중요한데, 목재펠릿으로 대표되는 산림바이오매스의 국내 품질규격은 ISO 국제표준과 대등한 수준이다.^[95] 흙, 돌, 철 등 불순물이 많은 산림부산물을 에너지원으로 주로 활용하는 특수성과 높은 수준으로 규범화된 품질 표준을 복합적으로 고려하면, 국내 제조시설의 전처리 및 가공기술 수준은 상당한 정도에 이르렀음을 시사한다.^[95] 아울러 고체 형태의 산림바이오매스에너지라 할지라도 형상에 따라 서로 다른 법정 품질기준과 고유 명칭이 존재하므로 ‘땀값’이라는 감정적 표현은 지양해야 한다.

3.4.2 UK Forest Research의 과학적 설명

UK Forest Research는 산림바이오매스 연료 연소 시 다양한 배출물질이 발생하지만 현대적이고 효율적인 연소 기기와 고품질 연료를 사용하면 그 배출량을 최소화할 수 있다며, 모든 연소 기기의 배출 수준은 기기의 특성과 연료의 품질 및 운영 방식에 따라 다르다고 조언한다.^[96] 관련된

과학적 설명을 살펴보면 다음과 같다.

산림바이오매스 연소 시스템이 대기질에 영향을 줄 수 있는 주요 항목은 일산화탄소(Carbon Monoxide, CO), NO_x, PM 정도다. (1) CO는 최적화된 최신의 연소 시스템 설계와 램다 산소 센서를 적용하여 적정 연소 조건을 조성해 극복할 수 있다(Fig. 3 참조). (2) NO_x 형성은 여러 메커니즘의 결과인데, 연료의 질소가 산화되어 fuel NO_x가 발생하고 1,100°C 이상의 고온 연소 공정에서는 대기 중 질소 산화로 thermal NO_x가 생성될 수 있다. (3) 목재의 황 함량은 일반적으로 0.1% 내외로 매우 낮아 유의미한 수준이라 보기 어렵다. 연소과정에서 fly ash 입자에 황산염으로 응축된다. (4) 식물의 성장에는 칼륨과 인을 비롯한 여러 가지 미네랄이 필요한데, 이러한 미네랄 성분은 수피(나무껍질)와 잎에 주로 존재한다. 대기, 토양, 물에 존재하는 기타 미네랄 성분은 바이오매스 성장 과정에서 흡수될 수 있으며 이들 대부분은 다양한 염류의 형태로 ash 형성에 기여한다. IEA Bioenergy(2023c) 의견도 앞선 내용들과 동일하다.^[97]

Utility-scale의 경우, 통제된 여건에서 사실상 완전히 연소하므로 CO는 문제 되지 않으며, NO_x는 SCR(Selectivity Catalytic Reduction), SNCR(Selective Non Catalytic Reduction) 등의 환경설비로 제어하고 있다. SO_x는 대부분 검출 한계치 미만을 구성하여 유의미하지 않고, ash는 필터로 포집하는 기술이 상용화되어있다. 국내에서 추진된 목재펠릿으로의 석탄발전소 연료전환 효과는 장기간의 누적 데이터 분석으로 증명되었다.^[98]

영국의 최근 30년간(1990~2021년) 대기 환경 변화에

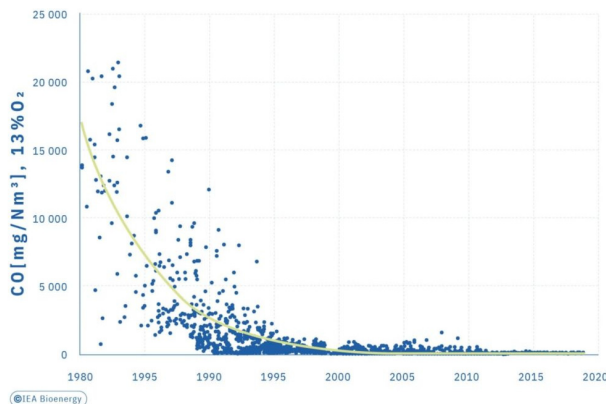


Fig. 3. Mitigating CO emissions from small scale wood pellet boilers type testing at BLT Wieselburg, in Austria.^[97]

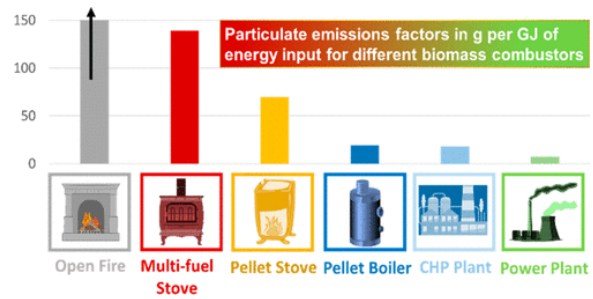


Fig. 4. Particulate emissions factors in a g/GJ of energy input for different biomass combustors.^[100]

관한 보고서를 살펴보면^[99] 에너지와 산업부문에서 NO_x가 74%(2005~2021년), SO₂가 99%(1990~2021년) 비율로 감축되었다고 밝혔다. 각각의 원인에 대하여 영국 정부는 (1) NO_x의 경우 석탄화력발전소 폐쇄 또는 바이오매스로의 연료전환이, 그리고 (2) SO_x의 경우 석탄에서 가스 및 바이오매스로의 연료전환과 기존 석탄화력발전소에 적용한 탈황설비로 인한 것이라고 분석했다. Tomlin(2021)에 따르면^[100] 2014년 프랑스에서 목재 연소 금지법안이 마련되었으나, 대중의 강한 반대로 실행을 며칠 앞두고서 폐기되었다며 연소 효율과 배출물질, 특히 미세먼지 제어 능력은 규모화된 발전소가 효과적이라 밝혔다(Fig. 4 참조).

결과적으로 산림바이오매스에너지 이용 과정에서 발생 가능한 대기 배출물질은 상용화된 과학기술로 충분히 극복 가능하므로 우려할 사안이 아님을 알 수 있다.^[101] 다만 규모의 경제 실현이 어려워 후단 환경설비를 갖추기 힘든 소규모 연소는 ‘고효율-저배출’ 형태의 기술 고도화에 꾸준한 관심을 가질 필요가 있다.

3.4.3 기저 에너지원으로서 산림바이오매스의 역할

미국 의회보고서는 바이오매스를 활용한 발전소가 기저 부하 수요에 필요한 전력을 안정적으로 공급 가능한 몇 안 되는 재생에너지원 중 하나라고 평가했다.^[102] 영국 정부도 동일한 영국 정부도 동일한 의견이며^[103] 「바이오매스 전략(2023)」을 통해 산림바이오매스에너지 활용은 계속될 것이며 안정적인 연료 수급을 위해 동맹국과의 관계까지 고려할 것이라 강조했다.^[46] 프랑스는 합계 1.8 GW 규모 석탄화력발전소 2기를 바이오매스로 연료 전환할 것이라고 대통령직접 밝혔다.^[104] 석탄을 대체하는 과학적이고 현실적인 선택이 정책 의지로 연결될 사례라 판단된다.

이러한 움직임은 자연스럽게 자국 내 저부가가치 산림자원 활용과 연결된다. 영국 하원 환경감사위원회는 자국 내에서의 연료 조달을 확대하고자 적극적인 산림관리를 강조하면서 산림부산물과 속성수 확보에 주목했고,^[45] UK CCC는 자국 내 바이오매스 공급 확대로 수입 의존도를 낮추어야 한다고 권고했다.^[105] 캐나다 정부도 에너지원으로서 산림부산물에 주목했다.^[67] Malmshemer *et al.* (2011)^[65]에 따르면, 저부가가치의 목재를 제대로 활용한다면 산불 예방으로 추가적인 대기편익이 존재하고, 통제된 여건에서 에너지로 활용한다면 비 이산화탄소 배출량을 획기적으로 줄이고, 화석연료를 지하에 남겨두는 편익까지 존재하므로 실행 가능성을 높이기 위해 수익성이 뒷받침되어야 한다고 강조했다.

국내의 경우 지난 2000년대 초반부터 국가 차원에서 산림바이오매스에너지 이용 확대를 꾸준히 추진해왔으며, 최근에는 국정과제로 채택되었다.^[106] 특히 2018년 시작된 ‘미이용 산림바이오매스’ 제도는 어느 목재산업에서도 이용하지 못하고 산림에 방치되던 자원을 에너지원으로 활용한다는 측면에서 국제 추세와 궤를 같이하므로, 산업군의 경제적 참여 유도요인을 한층 강화할 필요가 있다.^[107]

다만, EG는 산림바이오매스 활용체계에 의문을 제기하면서도, 한편으로는 극소규모 발전 형태는 일부 옹호하는 역설이 확인된다.^[108] 물론 마을과 같은 마이크로단위에서 산림바이오매스를 활용한 발전체계는 이상적일 것이나, 그 수가 급속도로 증가하면 전력계통 안정성에 부담 요인이 될 수 있으므로,^[109] 면밀한 영향평가를 전제로 질서 있는 보급이 요구된다.^[110] 나아가, 바이오에너지의 활용 형태(열 또는 전기)에 대한 선호나 우열에 대한 논의는 주관이 개입될 여지가 있으므로, 에너지라는 큰 틀에서 각각이 지닌 나름의 가치와 쓰모를 존중하되 사회적 우선순위와 그 간의 제도 변화 양상을 고려하면서 접근해야 한다. 그 과정에는 협소한 국내 지리적 특수성과 거리와 물량에 비례하는 운송 경제성, 그리고 상품재(사유재)로서 목재 자원의 이동권이 보장되어야 한다.

3.5 가치 단계적 원칙과 지속가능성 인증

(EG) 목재의 사용은 에너지 등이 아닌 고부가가치 순서로만 우선 사용하도록 제한해야 한다.^[111]

3.5.1 가치 단계적 원칙(Cascading Principle, CP)

이 원칙은 사유재산인 목재 자원의 상품적 성격을 충분히 고려하지 아니하거나, 탄소를 저장하는 기간에 국한하여 산업을 계층화하는 것이다. 하지만 목재는 건축, 에너지, 물질, 제품, 화학 등 나름의 쓰모로 다양하게 활용되어 궁극적으로 국민 편익을 높이는 데 기여하므로 객관적 근거와 현실에 대한 고려가 충분하지 않은 상태에서 가치의 우열을 제도화하는 것은 신중해야 한다. 설령 목재산업의 수직계열화를 강제하더라도, 원료의 수급 상황에 따른 연쇄 파동을 최소화하고자 오히려 대의 의존성이 높아질 수 있으므로 국가별 특성과 자원 안보 등 다양한 대내외적 여건까지 넉넉히 고려해야 한다. 즉 CP 자체가 정책의 목적이 되기보다는 상징적인 수준에서 존재할 필요가 있다는 의미다.

스웨덴의 선례를 살펴보면 펄프와 제지업계의 찬성으로 1983년 CP를 법제화했으나,^[112] 관리비용 증가와 수입 제품 증가 등 다양한 부작용과 함께 스웨덴 산림산업의 발전을 방해한다는 비판에 결국 시행 10년 만에 폐지되었다. Olsson *et al.* (2018)^[112]은 CP의 제도화를 ‘실패한 규제’라고 평가하면서 상향식이 되어야 한다고 강조했으며, 목재의 소비 경향은 항시 변하므로 폐기물 처리에 적용되는 위계적 질서를 상업적 자원인 목재에까지 적용하는 것은 현행 자원 사용 패턴을 고착화하는 중속 효과를 초래할 것이라 보았다.

참고로, 전 세계 산림 가운데 사유림 비중은 22%로 1990년 이후 꾸준한 증가세다.^[113] 우리나라는 사유림 비중이 66%에 달하며, 사유림 산주는 합계 200만 명을 상회한다. 무엇보다 바이오매스 공급원료의 가용성은 소유권 유형과 소유자의 선호도에 따라 달라진다.^[65,114] 따라서 흡수원으로서 산림 기능을 강화하기 위해서는 산림 소유자에 대한 정책적 관심과 적정 수준의 가치책정으로 사유재산권 행사를 보완할 필요도 있다고 본다. 그런 점에서 우리나라에서 2022년 제정된 「임업산림 공익기능 증진을 위한 직접지불제도 운영에 관한 법률」은 의미가 크다고 할 수 있다.

IEA Bioenergy(2016)^[115]는 CP에 대한 명확한 합의나 정의가 존재하지 않으며 EU에서 제도화되더라도 북미 등 다른 지역에서 제도화되지 않으면 오히려 체계 복잡성만 증가하기 때문에 CP를 모든 문제의 해결책으로 간주해서는 안 된다고 밝혔다. Berndes *et al.* (2016)^[7]은 CP에 따른

활용이 항상 기후 편익이나 경제적 편익이 높다는 것을 보장하는 것은 아니라며, 유연성과 지역적 특수성을 고려해야 한다고 언급했다. 스톡홀름연구소의 자료에 따르면, CP를 정책과 실천으로 연결 짓는 것이 어려운 사유에 대하여 ‘무엇이 가치 있는 목적(Valuable Purpose)을 구성하는지 정의하기 어렵기 때문’이라 지적했다.^[116]

이와 같은 논의는 최근의 두 사례로 증명된다. 첫째는 최근 확정 발표된 EU 재생에너지 지침(Renewable Energy Directive III, RED III)인데, EU도 결국 CP의 제도화에 있어서 국가별 특수성과 에너지 공급 안정성 등 다양한 예외를 인정했는바, 이는 이상보다 현실을 선택한 것으로 보인다.^[117] 둘째는 일각에서 바이오에너지에 대한 영국의 재정지원이 미국의 목재 시장을 왜곡한다는 취지로 유럽 집행위원회(European Commission, EC)에 이의를 제기한 사례다.^[118] 이와 관련하여 EC는 2016년 목재펠릿이 목재제품 시장의 경쟁을 부당하게 왜곡하지 않는다고 결론지었다.

따라서 목재와 연관된 전체 공급망의 투명성을 강화하고, 국내 현실을 고려해 목재의 다양한 활용이 기후변화를 완화하는 데 도움 되도록 행정조직과 예산을 강화하는 편이 합리적일 것이다.

3.5.2 지속가능성 증명을 위한 제3자 인증

바이오에너지에 대한 지속가능성 인증은 목적을 위한 수단 혹은 도구적 성격을 지닌다. 이는 실현 가능해야 하며 합리적 수준의 비용으로 관리 감독이 가능해야 한다.^[64] EU는 재생에너지 지침에 따른 일정한 기준(추적 가능성 등)을 충족하는 자발적 혹은 국가 수준의 다양한 인증체계를 운용 중이다(2023년 기준 15개).^[119] 이렇듯 점차 보편화되는 인증체계지만, EG는 산림 탄소흡수원의 손실을 유발한다며 ‘쓸모없다(Uselessness)’라는 다소 격한 주장을 펼친다.^[120]

그러나 IEA Bioenergy(2023d)^[121]는 지속가능성 인증을 일관된 거버넌스와 통합하여 운영한다면 시장 참여자들이 보다 지속가능한 방향으로 발전하도록 유도할 것이라는 견해다. 이와 같은 국제 추세를 고려해 우리도 국내 현실에 맞는 ‘한국형 지속가능성 인증’의 제도화를 심도 있게 검토할 필요가 있다. 여건에 따라서는 에너지용 바이오매스 공급망의 지속가능성 증명에 특화된 SBP(Sustainable Biomass Program)²⁾^[122]를 제도권 내에 편입하는 것도 필요할 것인

데, 현재 EU와 영국 등에서 이를 완료하였다. 일본의 경우 국산 연료는 산림법 등에 근거하여 지속가능성을 확인하고, 수입산은 SBP 도입을 적극적으로 검토하되 영국 RO(Renewables Obligation) 제도를 참고하여 조달량과 조달지역(국가, 지역) 정보만 제한적으로 공개하는 방향으로 FIT(Feed-in-Tariff)와 연계 시행할 계획이다.^[76,123,124] 바이오에너지의 지속가능성 평가항목별 비교는 IPCC의 ‘Climate Change and Land(2019)’ 보고서를 참고할 필요가 있다.^[125]

3.6 산림바이오매스에너지와 산림환경 영향성

(EG) 산림바이오매스에너지 활용으로 산림이 무분별하게 파괴되어 흡수원으로서 기능이 상실될 것이다.^[120]

3.6.1 유럽의 목재펠릿 수요 증가에 따른 주요 공급지역의 산림환경 영향성 여부

EG는 정상 절차로 목재수확이 이뤄진 현장을 에너지 부문과 연계하여 부정적으로 묘사한다. 수확으로 발생한 다양한 목재 자원 가운데 상품성이 떨어져 에너지 부문으로 향하는 몇 대의 트럭을 촬영한 뒤, 전체 공급망을 주관적으로 해석하려는 시도가 국내외에서 종종 확인된다. 일부 EG는 산림바이오매스에너지로 인해 유럽의 산림이 놀라운 속도로 파괴된다고 주장한다.^[120]

하지만 UN FAO는 1990~2020년 사이 매 10년 단위 전 세계 산림면적의 손실 정도가 -7.8%에서 -5.2%, -4.7%로 각각 둔화되고 있으며, 산림관리가 적용되는 모든 지역에서 산림면적이 증가세고, 전 세계 ha당 임목 축적량(산림의 울창한 정도)은 1990년 대비 2020년 각각 132 m³/ha에서 137 m³/ha로 순증했다는 분석이다(한국은 같은 기간 38.4 m³/ha에서 165.2 m³/ha로 증가).^[113] 미국 의회보고서는 지역별 정도의 차이는 있지만 전 세계적으로 산림이 순 탄소흡수원으로 기능한다고 판단했다.^[66] 아울러 유럽의 산림면적은 확대되고 있으며 임목 증가율이 수확량을 초과하는 등 흡수원의 탄소저장량도 증가세다.^[7]

EU로 수출되는 미국산 목재펠릿이 미국 산림에 영향을 끼치는지에 대하여, EC 보고서는 상관성(토양 영향성 포

2) 에너지용 산림바이오매스의 국제 무역에 관련한 적법성과 지속가능성 등을 확인하는 제3자 인증

함)을 발견하기 어려웠다고 결론지었다.^[126] 영국 정부를^[127] 비롯한 Galik and Abt(2016)^[128], Aguilar *et al.*(2020)^[129]은 미국의 바이오에너지용 원료 공급지역의 산림 탄소저장량의 유의미한 변화는 확인하기 어려웠고, 직접 상관성도 확인할 수 없다고 판단했다. 목재펠릿 생산시설이 집중된 미국 남동부 산림손실의 주요 원인은 도시화와 강수량, 기온 패턴 변화이며, 오히려 에너지 부문이 펄프재 수요 감소를 대체해 지역 일자리와 산림관리를 지원한다는 평가다.^[130] Petrokofsky *et al.*(2021)^[131]는 다수의 선행연구를 분석한 결과, 대부분의 임업 관행이 생물다양성에 부정적인 영향을 끼치지 않는다고 판단했으며, 일부 부정적 영향이 존재한다고 밝힌 연구라 할지라도 대부분 목재수확 직후 짧은 기간 제한적으로 수행된 것일 뿐, 산림바이오매스에너지원 생산에 따른 생물다양성 피해 주장은 근거가 부족하다고 강조했다.

산림지역 토양에서의 탄소 축적은 기후를 비롯한 질소와의 역학관계가 주요 원인이며, 이외에도 다양한 외부 요인이 존재하므로, 목재를 수확하지 않거나 수확 후 발생하는 부산물을 수집하지 않는다고 해서 반드시 토양에 저장된 탄소가 증가하는 것도 아니다.^[132] Ter-Mikaelian *et al.*(2008)^[91]은 중장기적 관점에서 목재수확과 토양 탄소 변화 간에 유의미한 상관성은 존재하지 않는다고 보고하면서, 이와 반대되는 EG의 주장은 문헌을 불완전하거나 부정확하게 사용한 것이라 지적했다. 이외에도 Harrison *et al.*(2011)^[133]은 토양 탄소 평가를 얇은 층의 변화만으로 판단할 사안이 아니라고 강조했다. 결과적으로 EG의 주장은 현실과 다소 거리가 있거나, 단기적인 관점에서 비롯된 것으로 보인다.

3.6.2 미국의 산림바이오매스에너지에 관한 견해

U.S. EPA는 에너지를 위한 바이오매스의 사용이 미국의 산림관리를 지원함으로써 산림의 탄소저장량을 증가시킬 수 있고, 해충 관리나 수질 및 토양의 품질 개선, 산불 위험 감소 등 다양한 환경적 편익과 함께 일자리와 소득 등 지역사회에 끼치는 사회적 편익에 주목했다.^[39] 특히 미국의 Tidwell 산림청장이 2016년 벨기에 브뤼셀에서 발표한 연설문 ‘A sustainable bioenergy policy for the period after 2020’^[134]의 핵심 메시지를 요약하면 다음과 같다.

- 정책 의사결정 과정은 견고하고 입증된 정보에 기반한 과학적 근거에 따라 이뤄져야 한다.
- 미국의 바이오매스 시장은 사회·경제·생태적 지속가능성 세 가지 영역 모두에서 목표를 달성하는 데 도움이 된다.
- 바이오에너지는 산불 완화, 건강한 산림, 유역 개선, 복원, 미관 개선 등 다양한 산림관리로 지속가능성 목표를 달성하는 데 도움이 된다.

3.6.3 지속가능한 목재의 이용 수준과 산림관리

IEA Bioenergy는 목재수확이 성장을 초과하지 않도록 하는 성공적인 산림관리 및 산림 탄소저장량 제고 정책이 스웨덴에서 성공을 거두었고, 뒤이어 덴마크, 핀란드, 미국 남동부에서 유사한 사례가 확인된다고 언급했다.^[16] 미국 에너지정보청(U.S. EIA)^[40]은 나무가 성장하는 속도를 넘어서는 정도로 수확하지 않을 것을 강조한다. 영국 정부는 산림을 관리하지 않으면 더 많은 탄소가 축적될 수는 있겠지만 산불 등 재해로 인한 안전 문제로 연계될 수 있다며 경계했다.^[127] UNEP(2022)^[135]에 따르면, 세계의 많은 지역에서 산불을 일으킬 수 있는 충분한 양의 연료가 산에 쌓인 것이 산불의 주요 원인의 하나라고 지목하면서 각국이 산불 예방 차원에서 가지치기, 목재수확, 지표 연료 제거(관목, 초본, 잔가지, 수확 후 부산물 등)가 필요하다고 강조했다.

참고 사례로 국토의 약 50%가 산림으로 구성된 에스토니아는 2020년부터 산림이 흡수원에서 배출원으로 바뀌었는데, 이에 대하여 국제통화기금(International Monetary Fund, IMF)은 산림의 노령화(Ageing Forests)가 원인이라고 지목했으며,^[136] EC는 국가 단위의 산림발전계획을 통한 산림관리가 필요하다고 에스토니아에 권고했다.^[137] 산림관리를 통한 흡수원 기능 제고가 국가 경쟁력과 직결되는 시대가 다가왔음을 시사한다.

국내의 경우는 어떠한가. 목재수확 과정에서 양질의 경제성 높은 원목은 시장기능에 따라 공급되고 있다. 이는 사유림 산주의 사유재산권 행사와 연계되어 있다. 협소한 국내 지리적 여건과 기후 담론의 거시성을 고려해 우리나라 면적 전체를 경관 단위로 간주하여 임목축적 통계를 살펴보면, ‘20년 기준 국내에 존재하는 나무의 총량은 10.4억 m³으로 추정된다. 통계가 존재하는 최근 3년간 연평균 성장량은 22,283천 m³으로 추정되는바(Table 2 참조), 이를

Table 2. South Korea's forest growing stock, volume changes compared to last year, and total domestic consumption of round wood

Unit: 1,000 m ³	2018	2019	2020
Forest growing stock	995,079	1,016,996	1,040,447
Volume changes compared to last year	+ 21,480	+ 21,917	+ 23,451
Total domestic round wood consumption	4,577	4,273	4,049

Sources: KFS(2023d; 2023e; 2023f)^[138~140]

‘22년 국내 모든 목재 산업군이 이용한 국산 원목의 수량 3,700천 m³을 적용하면 연평균 성장량 대비 16.6% 수준의 이용률이 도출된다.^[138,139] 산림부산물 등 저부가가치 목재 자원 사용량까지 모두 합한 수량(4,309천 m³)을 적용하면, 연평균 성장량과 총량 대비 이용률은 각각 19.3%, 0.4% 정도다.^[140] 주요국 대비 우리나라의 1인당 에너지용 목재소비량과 수확량 대비 연료용 목재 비율이 극히 낮은 수준임은 선행연구로 이미 확인되었다.^[141]

여건이 다르지만, 핀란드의 경우 지속가능하게 수확할 수 있는 것으로 평가되는 원목은 연평균 80,500천 m³이다. 이 가운데 연간 86~97%를 수확하고 있으며, 에너지 용도로 투입된 자국산 목재의 총량은 ‘22년 기준 약 30,000천 m³(난방과 발전부문 22,900천 m³, 소규모 주택 및 농장부문 6,900천 m³)으로 투입된 목재의 형상 가운데 원목 형태가 11,000천 m³였다.^[142,143] 논의 범위를 확대하여 ‘21년 EU 지역에서 에너지 생산에 투입된 산림바이오매스의 수량을 살펴보면, 독일이 66,658천 m³, 스웨덴이 65,102천 m³ 등으로 EU 총합계는 262,858천 m³, 목재산업에서 유래한 부산물이 에너지원으로 투입된 총합계는 144,821천 m³로 집계되었고, 그 형상은 대부분 원목(215,440천 m³)이었다.^[144] 결과적으로 건강한 산림을 위해 연간 성장량을 담보하는 테두리 안에서 지속가능한 방법으로 어느 수준까지 어떻게 자원을 획득할 것인지에 대한 논의가 더욱 실효적이라 판단된다. 가치 단계적 원칙에 대한 판단도 유연하고 탄력적으로 이루어져야만 한다.

3.7 산림바이오매스에너지와 기후변화 소송

(EG) 바이오에너지는 기후위기와 환경에 도움 되지 않으므로 법원에서 그 적정성이 판단되어야 한다.^[145]

기후변화 소송에서 기후과학은 핵심으로 작용한다. 특히 IPCC의 보고서는 기후변화에 대한 과학계의 합의된 이해를 종합하고 각국 정부들의 검토와 검증 및 동의를 획득한 것으로, 법정에서 권위 있는 증거자료이자 반박하기 어려운 신뢰성을 가진 것으로 평가된다.^[146] 따라서 본 장에서는 산림바이오매스 정책 혹은 이와 직접 연관된 발전체계에 대한 소송행위를 기후소송(Climate Lawsuit)으로 간주하여 접근했다. 이때 외국의 판례는 Sabin Center for Climate Change Law가 운영하는 Climate Change Litigation Databases에서 조회했다.

이렇게 식별된 국가별 주요 판례 3건은 다음과 같다. (1) 네덜란드 V 사에 대한 바이오매스 발전설비 건설 및 사용허가의 적법성 여부,^[147] (2) 산림바이오매스를 재생에너지원으로 규정한 당시 EU RED II 조문의 적절성 여부,^[148] (3) 미국 H 사의 바이오에너지 전력구매계약에 관한 공공요금 위원회 측의 승인 거부 사례다.^[149] 해당 소송에서 유추하거나 확인할 수 있는 EG의 주장을 종합하면 대기 배출물질 우려, 생태환경 영향 우려(산림파괴), 단위 에너지당 석탄 대비 목재펠릿이 더 많은 CO₂를 배출하므로 기후위기 대응에 부적합하다는 것으로 요약된다.

이에 대한 각각의 판결은 다음과 같다. 2021년 네덜란드 North-Holland 지방법원은 EG의 주장이 발전소 허가 절차와 직접 관련이 없고, 발전설비 운영에 따른 직접적이고 구체적인 영향에 관한 것도 아니었으며, 국제 협약상 바이오매스는 탄소중립 에너지에 해당한다고 판단했다. 2021년 EU 사법재판소는 RED II로 인해 EG가 다른 사람들과 구별되는 정도로 특정한(직접적인) 영향을 받았음을 입증하지 못했다고 보았다. 2023년 미국 하와이주 대법원은 해당 결정이 정당하다고 판단했는데, 주요 쟁점은 발전사업자 측이 제출한 자료 가운데 연료의 공급 신뢰성, 탄소배출-흡수 모델링의 정교성, 연료비 변화에 연동된 에너지 비용변화의 적절성 등 발전 실무와 연관된 내용이 주된 쟁점이었으므로, 그 취지의 확대해석에 유의해야 한다.³⁾

국내 사례는 5건이 식별되며, 이를 심급별로 구분하면 다음과 같다. (1) 특정 재생에너지 사업자들과 EG 등이 제기

3) Biogenic CO₂ 규제 여부와 관련된 미국의 ‘Center for Biological Diversity v. EPA (722 F.3d 401, 2013)’ 및 이와 연결된 판례는 본 논문의 3.1.3에서 언급한 U.S. EPA(2018)^[40] 발표를 고려해 3.7의 논의 범주에서 제외하였다.

한 2건의 헌법소원(헌법재판소 2020. 10. 27. 선고 2020헌마1303 결정; 헌법재판소 2021. 4. 6. 선고 2021헌마348 결정), (2) 인허가와 관련된 2건의 연결된 판례(건축허가사항변경 불허가처분 취소의 소(전주지방법원 2019. 5. 23. 선고 2019구합511 판결; 광주고등법원 2019. 10. 30. 선고 (전주)2019누1499 판결), 도시계획시설사업 실시계획인가신청 불허 처분 취소의 소(광주고등법원 (전주)2021. 1. 27. 선고 2019누2294 판결; 대법원 2021. 11. 25. 선고 2021두34282 판결), 그리고 (3) 행정소송 1건(서울행정법원, 2023. 4. 18. 선고 2021구합82625 판결).

국내 판례로 확인 가능한 원고 측의 주장은 해외 EG의 주장과 거의 유사하지만, 국내에서 시행 중인 RPS (Renewable Portfolio Standard, 일정 규모 이상의 발전사업자에게 총발전량의 일정 비율 이상을 신재생에너지로 공급하도록 의무화한 제도) 제도와 연계했다는 점, 그리고 특정 재생에너지를 운영하는 사업자의 재산권 행사와 연계했다는 점에서 약간의 차이가 있다. 각각의 판결은 다음과 같다.

헌법소원 2건은 재판관 전원의 일치된 의견으로 기본권 침해의 법적 관련성을 충족하지 못하였으므로 각하하였다. 이렇게 제기된 헌법소원 가운데 일부는 외국으로부터 편당 받아 진행된 것으로 보인다.^[145] 인허가와 관련한 2건의 판례와 그 취지를 종합해보면 법원은 일관된 입장으로 ‘단정하기 어려운 단순한 가능성이나 막연한(추상적인) 우려에 그친다며, 제출된 증거만으로는 해당 사안을 불허할 정도로 중대한 공익상 필요가 존재한다고 볼 수 없고 구체적인 내용과 근거를 제시하지 못한다’라는 지적이다. 아울러 법원은 구체적인 수치와 근거를 토대로 목재펠릿의 석탄 대체 효과를 인정한 것으로 확인되며, 특히 대법원은 전원일치 의견으로 산림바이오매스에너지 측의 손을 들어줬다. 행정소송은 원고적격이 인정되지 않았다.

총 8건의 국내외 판례를 통해 해당 소송이 2020년 전후에 집중적으로 제기되었으며, 국내외에서 개진된 EG 들의 주장은 대체로 직접 증거로 채택되기 힘든 추상적 우려에 그쳤다는 공통점이 있다. 각국의 법체제와 법 감정이 서로 다름에 유념할 필요가 있을 것이나, 최소한 산림바이오매스에너지 부문에 대한 기후소송에 있어서만큼은 법원이 과학적 증거를 채택하는 경향이 뚜렷하다고 볼 수 있다. 기후과학이 소송에 활용된 적정 사례다.

3.8 EG의 행동 방식과 대중의 인식

3.8.1 IEA Bioenergy의 EG에 대한 비판적 평가

IEA Bioenergy의 비판 의견은 EG 등이 추진한 ‘반대 캠페인’과 ‘출판물’에 대한 것으로 구분할 수 있다. 우선 EG의 캠페인에 대한 비판을 종합하면 다음과 같다. ‘마치 산림을 착취하는 것으로 묘사하여 무책임한 에너지원으로 바라보게 만들고, 목재 생산과 사용이 순환적 생물 유래 탄소의 일부라는 것을 간과하는 등 국제 온실가스 회계 원칙을 불신하며, 위험할 정도로 근시안적인 시각에서 넓은 범주의 환경적·사회적 함의를 도외시한다는 비판이다.^[150] 이를 토대로 IEA Bioenergy(2022a;2022b)^[151,152]는 정책이 허구가 아닌 사실에 기반해야 한다고 강조했다(Fig. 5 참조).

나아가 IEA Bioenergy는 EG와 유사한 맥락을 보이는 출판물에 대하여 강도 높게 비판했다. 대표적인 비판의 대상은 다음의 다음의 두 가지로, 국내에서도 해당 보고서를 인용하는 사례가 존재하므로 그 해석에 참고할 필요가 있다. (1) EASAC(European Academies’ Science Advisory Council, 유럽과학자문위원회)가 2019년 발간한 출판물^[153]에 대하여 IEA Bioenergy(2019)^[154]는 ‘오류, 반쪽짜리 진실, 일반화’라고 비판했으며, EC는 EASAC에 대하여 ‘바이오에너지는 에너지 믹스의 중요한 부분으로, 에너지와 기후변화 목표를 비용 효과적으로 달성할 수 있도록 한다’라고 반론했다.^[155] (2) 영국의 International Affairs Think Tank (Chatham House)의 출판물^[156]에 대하여 IEA Bioenergy(2017)^[157]는 ‘목재수확이 산림 탄소 저장고에 미치는 영향에 대해 부정확한 해석과 단기 탄소 균형에 대한 잘못된 초점을 제공하며, 수확되지 않은 산림의 기후변화 완화 가치를 과장하는 등 비현실성에 기초한다’라고 비판했다. 특히 IEA Bioenergy는 해당 출판물에서 강조하는 주요 결론과



Fig. 5. Image from IEA Bioenergy's press release.^[152]

정책별 권고 사항은 ‘근거 없는 주장과 결합 있는 논거’라며, 신중하고 실질적인 논의에 참여할 것을 Chatham House 측에 공개 촉구했다.

3.8.2 국내외 EG 주장 비교

본 장에서는 산림바이오매스에너지에 반대하는 국내 EG의 논지를 찾아 주요 항목별로 구분하고, 이를 다시 해외의 것과 비교했다(Table 3 참조). 다만 최근 국내외 EG가 공동성명을 발표하면서 주장의 맥락에 유의미한 차이가 없으므로, 비교 정합성을 높이고자 해외 EG의 주장 가운데 상

대적으로 앞선 시점의 내용을 중심으로 비교했다.

그 결과, 국내 EG의 주장 대부분이 해외에서 과거에 주장되었던 내용을 재차 반복하는 것으로 확인되었다. 차이 점은 미국에서 제기되는 주장 가운데 목재펠릿 제조시설의 지리적 위치가 인종 차별과 연계된다는 주장이 국내에서는 확인되지 않는다는 정도다. 국내에서 발간된 출판물의 참고문헌을 살펴보면 해외 EG 발간자료, 웹사이트, 그리고 이론적 근거를 제공하는 일부 학술자료 등이 대부분이다. 출판물의 내용은 주관성이 높아 독자가 쉽게 이해하기 어렵다는 모호한 특징을 보인다. 즉 EG의 주장 가운데 새롭거

Table 3. Compare the major arguments of domestic and international EGs opposing forest biomass utilization for energy

Major arguments	International EG	Domestic EG (Republic of Korea)
Termination of biomass subsidies	PFPI (2011a) ^[158] ; Biofuelwatch (2011a) ^[159]	SFOC (2019) ^[160] * Report funded by NRDC (US)
Forest biomass energy utilization is an act of forest destruction,	PFPI (2011a) ^[158] ; Biofuelwatch (2011b) ^[161]	SFOC (2019) ^[160] * Report funded by NRDC (US)
Carbon debt incurred by biomass utilization takes decades, which is not helpful in urgent climate change response	PFPI (2011b) ^[162]	SFOC (2019) ^[160] * Report funded by NRDC (US)
Harmful air emissions occur during biomass combustion	Biofuelwatch (2014) ^[163] ; Booth (2014) ^[164] * Supported by the Heinz Endowments, Rockefeller Family Fund, Threshold Foundation, and Civil Society Institute	SFOC (2019) ^[160] * Report funded by NRDC (US)
Bioenergy emits more carbon than coal when combusted, and it has a negative effect on climate change	PFPI (2011a) ^[158]	SFOC (2019) ^[160] * Report funded by NRDC (US)
Establishment of convincing and scientific sustainability standards	Emsting (2012) ^[165] ; Stashwick (2013) ^[166]	CECRCS (2022) ^[167]
Exclusion of bioenergy from the renewable classification system, (e.g. EU Taxonomy)	WWF (2019) ^[168]	CECRCS (2022) ^[167]
Strengthening and registration of the cascading principle	Biofuelwatch (2020) ^[169]	CECRCS (2022) ^[167]
The IPCC guideline for carbon accounting has errors related to biomass for energy purposes	NRDC (2010) ^[170]	SFOC (2021a) ^[171]
Delivery of a group opposition letter against forest biomass energy to the government	Mongabay (2021) ^[172]	SFOC (2021b) ^[173]
Filing of a climate change litigation	EUBLC (2019) ^[174]	Hankyoreh (2020) ^[175] ; SFOC (2021c) ^[176] ; PFPI (2020) ^[145] * Constitutional complaint funded by the Center for Climate Integrity (US)
Criticism of bioenergy through public broadcasting	BBC (2022) ^[177]	KBS (2021) ^[178]
Issue environmental concerns about wood pellet manufacturing facilities and nearby areas	CNN (2021) ^[179]	Kim <i>et al.</i> , (2022) ^[180]
Racial issues related to environmental justice	Davis (2023) ^[181]	n/a

나 유의미한 내용은 확인하기 어렵다는 것으로 귀결된다. 따라서 EG가 내세우는 주장과 그 증거는 상대적으로 낮은 품질임에, 정책적 증거로 활용하기에는 그 적합성이 부족하다고 판단된다.

이러한 결과는 앞서 언급한 Howes *et al.*(2018)^[15]의 ‘산림바이오매스에너지와 관련된 증거들의 품질평가 연구’와 유사하다. 그의 연구 가운데 낮은(혹은 중간 이하) 품질의 증거, 그리고 주장에 불확실성이 존재한다고 평가된 영역은 다음과 같다.

산림 훼손 우려, 탄소 부채, 환경 및 건강 영향성 우려, 지속가능성 증명의 신뢰성 우려, 양질의 원목이 에너지 용도로 활용된다는 주장, 목재펠릿과 기존 목재 산업군 간의 연료 경합성 주장⁴⁾ 등

3.8.3 EG의 행동 양상에 대한 학술적 접근

EG는 종종 기후변화에 대한 행동의 필요성과 그 시급성을 강조하고자 IPCC 보고서 혹은 그 맥락을 추정하여 인용한다. 하지만 기후위기에 대한 해결책으로 IPCC가 강조하는 ‘산림자원 기반의 바이오에너지’라는 핵심 요소에 대한 수용은 선택적으로 거부한다.^[182] 본 연구를 통해 EG의 자료를 분석한 결과, 미시적인 부분을 확대해석하거나, 비전문적인 시각에서 복잡한 사안을 일반화하고, 동료심사를 거치지 않아 신뢰성이 담보되지 않은 백서를 웹사이트에 업로드하며, 이를 다른 매체로 확대 재생산(상호인용, 언론 보도 등) 하는 경향이 관찰된다. 이 같은 행동은 일종의 의제 설정(Agenda Setting)을 통한 의제파급(Agenda Rippling) 효과로 설명 가능하다.^[183]

이외에도 선택적 인용(Cherry Picking)은 쉽게 확인할 수 있었지만, IEA 자료를 직접 인용한 사례는 찾아볼 수 없다. 설령 동료심사를 거친 학술적 접근이라 하더라도 과학자들의 검토 결과, 그 전제에 오류가 있음이 추후 확인되는 사례도 있다.^[184] 나름의 관점과 문제의식에서 이의를 제기하지만, 합리적이고 현실적인 대안을 제시하는 사례는 찾아보기 어렵다. Mather-Gratton *et al.*(2021)^[108]

은 산림바이오매스ener지를 둘러싸고 유럽에서 발생한 갈등 관계에 대해 ‘성장과 기술주의적 환경 정책에 대한 급진적인 EG들의 회의론을 고려하면 그다지 놀라운 일이 아니다’라고 평가했다. 이러한 평가는 앞서 서론에서 언급한 Grundmann(2007)^[2]과 같은 맥락이다.

해외 EG의 활동 사례를 살펴보면, EU 분류체계(EU Taxonomy) 논의 과정에서 EG는 ‘바이오에너지와 원자력 부문에서 과학에 기반한 본인들의 조언을 따르지 않았다’라며 관련 협의체를 탈퇴한 사례가 확인된다.^[185] 미국에서는 탐사보도로 EG에 기부된 자금의 출처와 성격, 액수가 공개되어 이슈화되었는데, 조사된 리스트에는 산림바이오매스 에너지 반대 활동에 적극적인 EG가 식별된다.^[186] 1960년대 이후 미국에서의 산림관리와 목재 활용에 대한 EG의 활동에 관하여는 Sedjo(2010),^[187] Lyon(2010)^[188]의 자료를 참고할 필요가 있다. 나아가 EG 상호 간의 대립 양상도 확인되는데^[189] 결국 이러한 내용은 EG가 사회의 트렌드를 반영한 하나의 산업으로 자리 잡고 있음을 시사한다. 그런 점에서 공익적 가치실현에 비례하는 책임과 회계 투명성이 EG에게 요구된다는 사회적 목소리에 귀 기울여야 할 때다.

산림바이오매스에너지 활용에 부정적인 일부 국내외 EG의 행동 방식을 학술적 관점에서 살펴보면, 기후변화와 기후과학을 부정하는 부인주의적 행동 패턴과 유사하다는 점을 발견할 수 있는데, 이를 종합하면 다음과 같다.^[8,9,108,190~192]

- 과학에 의한 압도적 합의를 부정, 과학 문헌 왜곡, 선택적 인용, 동료심사 등 학술제도 훼손
- 블로그 등을 통해 유사과학적(Pseudoscience) 의견을 제시, 인터넷 매체 등을 통해 과학적 정당성이나 대등한 과학적 반론이 존재하는 것처럼 묘사하고, 이를 대중의 관심으로 가장
- 다양한 네트워크를 통한 자금조달로 허위정보의 생산 및 확산에 개입, 확증편향과 같은 심리적 휴리스틱이 정보 확산에 기여
- 이데올로기나 신념(Ideology or Faith)에 반대되면 모든 것을 거부함, 이러한 믿음에 근거한 주장을 지배적인 정통성에 대한 지적 용기의 표출이라 믿음

4) EC(2023c)^[144]에 따르면, 최근 EU 지역에서 원자재(목재) 가격이 지난 몇 년간 상승한 것은 맞으나, 이는 에너지 생산을 위한 바이오매스 사용 증가와 관계없다고 결론지었다.

3.8.4 국민으로의 인식 범위 확대

최근 독일에서 2천 명을 대상으로 수행된 ‘기후 운동에 대한 사회적 인식 연구’에 따르면, ‘일반인들과 활동가들의 인식 괴리감(다양한 집단과의 소통 능력)에 대한 체감 정도’는 2021년 63%에서 2023년 29%로 감소하여 사회적 인식에 변화가 존재한다고 분석했다.^[193]

이에 주목하여 산림바이오매스에너지에 대한 인식 범위를 EG 외부(영국, 한국)로 확대하였다. 그 결과는 다음과 같다. (1) 영국 정부가 2023년 사회 각계를 대상으로 광범위한 심층 조사와 증거기반 평가를 시행한 결과, 참가자 대부분이 산림바이오매스에너지를 탄소중립 달성에 중요한 역할을 수행한다고 인식했다.^[194] (2) 국내에서 실시된 ‘산림에 관한 국민 의식조사 결과(2023년)’, ‘방치되는 목재를 에너지원으로 활용하는 것이 필요한가?’에 대한 질문에 국민의 71.5%, 전문가의 87.9%가 ‘매우 필요’하다고 답했다.^[195] 이는 산림바이오매스에너지 관련 정책이 국민 대다수에게 충분히 설득력 있게 다가서고 있음을 증명하는 한편, 국민과 EG 사이에 인식격차가 존재한다는 것을 시사한다. 또한 이러한 결과는 앞서 소개한 독일의 설문 결과와 궤를 같이한다고 볼 수 있다.

4. 결론

산림바이오매스에너지 정책은 국가적 수준에서의 국토 관리를 비롯하여 목재 자원 생산과 연결되며, 사회경제적 측면에서 산주와 임업, 물류업, 제조업, 발전업의 활력과 직간접적으로 연계된다. 안보 측면에서는 기저부하로서 타 재생에너지의 간헐성을 보완하여 에너지 안보에 기여하고, 국내 자원을 활용한다는 점에서 자원 안보에 도움 된다. 화석연료를 일부 직접 대체하여 기후 편익을 높임에 따라 지구환경에 도움이 된다.

따라서 이와 같은 정책은 현실적이고 객관적이며 과학적인 증거로 국제 수준의 합의된 기본원칙을 준수하는 ‘증거기반정책’의 좋은 사례로 판단된다. 그러한 점에서 볼 때 국내 산업생태계를 더욱 공고하게 구축하기 위해서는 산업적 니즈를 적시에 파악하고 패러다임의 변화에 맞추어 유연하면서도 지속가능한 원료 수급 정책과, 합리적 수준의

탄력적인 지원정책에 국가 차원의 관심과 역량이 집중되어야 한다.

본 연구는 산림바이오매스에너지 활용 과정에서 제기되는 모순된 주장의 근원을 살펴보았다는 점, 그리고 과학적인 증거로 진실된 내용을 엄밀하게 탐색하여 증거기반정책의 중요성을 뒷받침했다는 점에서 나름의 학술적 의의가 존재한다. 나아가, 본 연구는 에너지로서 산림자원의 응용 활용과(지속가능한 항공유, BECCS 등) 탄소중립을 위한 자율적 규범(CFE 이니셔티브, RE100, 24/7 CFE Compact)과 연계된다는 점에서 다양한 시장 참여자들의 이해를 도울 것으로 기대된다.

현세대에 이르러 기후위기에 대한 담론이 성숙한 만큼, 그에 비례하는 건강한 과학 기반의 정보 분별 능력도 요구되는 시대다. 이에, 최근 일부 사회현상을 비판적으로 접근한 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 순환적 생물 유래 탄소와 화석연료 유래 탄소는 본질적 성격이 서로 달라 배출 시점에서 상호 비교하는 것은 부적절하다. 국제 합의사항인 IPCC 가이드라인은 존중되어야 하며, 국제 추세와 현실을 고려해 지속가능성을 증명하기 위한 제3자 인증 도입이 심도 있게 논의되어야 한다.
- 2) 산림바이오매스에너지는 탄소중립의 성격을 지닌 연료로서 화석연료를 일부 직접 대체 가능한 현실적인 선택지다. 대기 배출물질은 극복 가능한 과학기술이 상용화되어있으며, 각국은 산림바이오매스에너지를 기후위기 대응과 에너지 안보 차원에서 도입을 확대하는 추세다.
- 3) 산림 탄소 영향은 경관 수준에서 통합 평가해야 한다. 산림바이오매스에너지의 이용 확대는 산림관리에 기여하고 산불과 병해충 등 교란 요인을 억제하며, 지역경제에 도움이 된다. 국민 대다수는 해당 정책의 필요성을 넉넉히 인정하고 있다.
- 4) 산림바이오매스에너지 활용에 따른 탄소 부채 주장은 불확실성이 높고, 연구자의 주관에 영향을 받으며 비현실적인 가정을 전제로 하는 등 인간적 기준에서의 시간개념이므로 논의에 신중할 필요가 있다. 가치 단계적 원칙은 국익과 현실을 고려해 접근할 사

안이다.

- 5) 지속가능한 산림바이오매스에너지 활용은 과학적 측면에서 기후 친화적이고, 산림환경 영향은 유의미하지 않음이 국제적으로 확인되었다. 자연기반 해법은 사회의 총편익을 제고하는 방향으로 바라봐야 한다. 다양한 관점은 존중해야 할 것이나 지나친 확증편향은 경계해야 한다.

감사의 글

본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술연구개발사업(2021353D10-2123-AC03)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

References

- [1] Morgan, E.A., and Di Giulio, G.M., 2018, "Science and evidence-based climate change policy: Collaborative approaches to improve the science-policy interface", In: Serrao-Neumann, S., Coudrain, A., Coulter, L. (eds.) *Communicating Climate Change Information for Decision-Making*, Springer, Cham, 13-28.
- [2] Grundmann, R., 2007, "Climate change and knowledge politics", *Env polit.*, **16**(3), 414-432.
- [3] Parkhurst, J., 2016, "The politics of evidence: From evidence-based policy to the good governance of evidence", 1st ed., Routledge, Oxfordshire.
- [4] Han, S.H., and An, H.S., 2021, "A study on evidence-based policy: Debating points and its applicability to the Korean context", *KPAS*, **30**(1), 289-314.
- [5] Choi, Y.J., Jeon, M.S., and Yoon, S.Y., 2016, "Evidence-informed policy-making in an uncertain world: Exploratory analysis of interactions between mental models, evidence, and uncertainty", *KPAS*, **50**(2), 243-270.
- [6] Yang, H.C., Lee, H., Baek, D.H., Kim, M.J., and Park, B.Y., 2021, "Establishment of the basis of evidence-based policies through analyzing information in science, technology, and innovation", *Science and Technology Policy Institute*, <https://www.stepi.re.kr/site/stepiko/report/View.do?cbIdx=1292&reIdx=1002&cateCont=A0201>.
- [7] Berndes, G., Abt, B., Asikainen, A., Cowie, A., Dale, V., Egnell, G., Lindner, M., Marelli L., Paré, D., and Kim, P., *et al.*, 2016, "Forest biomass, carbon neutrality and climate change mitigation", *European Forest Institute, From science to policy*, **3**(7), DOI: <https://doi.org/10.36333/fs03>.
- [8] Farrell, J., McConnell, K., and Brulle, R.J., 2019, "Evidence-based strategies to combat scientific misinformation", *Nat. Clim. Change.*, **9**(3), 191-195.
- [9] Diethelm, P., and McKee, M., 2009, "Denialism: What is it and how should scientists respond?", *European Journal of Public Health*, **19**(1), 2-4.
- [10] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2018, "Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty", Cambridge University Press, Cambridge and New York, DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157940>.
- [11] International Energy Agency (IEA), 2023a, "Net zero roadmap: A global pathway to keep the 1.5°C goal in reach", <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>.
- [12] Flach, B., and Bolla, S., 2023, "European Union: Wood pellets annual", U.S. Department of Agriculture (Foreign Agricultural Service), <https://www.fas.usda.gov/data/european-union-wood-pellets-annual>.
- [13] UK Forest Research, 2023a, "UK Wood production and trade: Provisional figures", Accessed 3 October 2023, <https://www.forestresearch.gov.uk/tools-and-resources/statistics/statistics-by-topic/timber-statistics/uk-wood-production-and-trade-provisional-figures/>.
- [14] Bioenergy Europe, 2023, "Statistical report 2023: Pellets", Accessed 20 October 2023, <https://bioenergyeurope.org/articles/431-pellets-2.html>.
- [15] Howes, P., Bates, J., Mason-Salkeld, R., and Garrick, D., 2018, "Bioenergy call for evidence report and associated

- responses - report for Committee on Climate Change (CCC)", Ricardo Energy & Environment, ED 11434 Issue Number 3, <https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2018/12/Biomass-in-a-low-carbon-economy-Call-for-Evidence-report.pdf>.
- [16] Cowie, A.L., Berndes, G., Bentsen, N.S., Brandão, M., Cherubini, F., Egnell, G., George, B., Gustavsson, L., Hanewinkel, M., and Harris, Z.M., *et al.*, 2021, "Applying a science-based systems perspective to dispel misconceptions about climate effects of forest bioenergy", *Glob. Change Biol. Bioenergy.*, **13**(8), 1210-1231.
- [17] International Energy Agency (IEA), 2023b, "From oil security to steering the world toward secure and sustainable energy transitions", Accessed 4 October 2023, <https://www.iea.org/about/history>.
- [18] Kim, J.K., 2004, "International Energy Agency and improving oil market crisis response capabilities", Korea Institute for International Economic Policy (KIEP), *OECD Focus*, **3**(4), 22-31, https://www.kiep.go.kr/gallery.es?mid=a10103050800&bid=0015&act=view&list_no=7215.
- [19] UK Parliament (House of Commons Environmental Audit Committee), 2023a, "Written evidence (Sustainable timber and deforestation)", Accessed 4 October 2023, <https://committees.parliament.uk/work/6880/sustainable-timber-and-deforestation/publications/written-evidence/>.
- [20] Bastable, S., 2023, "Biomass carbon accounting is no longer fit for purpose and must be fixed, demand biomass campaigners at Bonn climate conference", Environmental Paper Network (EPN), Accessed 2 December 2023, <https://environmentalpaper.org/2023/05/biomass-carbon-accounting-is-no-longer-fit-for-purpose-and-must-be-fixed-demand-biomass-campaigners-ahead-of-bonn-climate-conference/>.
- [21] IEA Bioenergy, 2002, "Greenhouse gas balance of bioenergy systems - Standard methodology schematic structure", Accessed 3 December 2023, https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/17_AR1998Task25colour.pdf.
- [22] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013, "Chapter 6 - Carbon and other biogeochemical cycles", In: *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- [23] IEA Bioenergy, 2023a, "Fossil vs biogenic CO₂ emissions", Accessed 27 September 2023, <https://www.ieabioenergy.com/iea-publications/faq/woodybiomass/biogenic-co2/>.
- [24] Riebeek, H., 2011, "The carbon cycle", NASA Earth observatory, Accessed 4 October 2023, <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle/page1.php>.
- [25] Royal Swedish Academy of Agriculture and Forestry (KSLA), 2018, "Forests and the climate - Manage for maximum wood production or leave the forest as a carbon sink?", https://research.chalmers.se/publication/507846/file/507846_Fulltext.pdf.
- [26] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014, "Climate Change 2014: Synthesis Report", Contribution of Working Groups I, II and III to the 5th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva, 151.
- [27] UK Forest Research, 2023b, "Why use biomass?", Accessed 4 October 2023, <https://www.forestresearch.gov.uk/tools-and-resources/fthr/biomass-energy-resources/general-biomass-information/why-use-biomass/>.
- [28] Welfle, A., Röder, M., Cooper, S., and McManus, M., 2020, "Accounting whole life cycle bioenergy emissions within the UNFCCC emission accounting framework", UK Supergen Bioenergy Hub, <https://www.supergen-bioenergy.net/output/accounting-whole-life-cycle-bioenergy-emissions-within-the-unfccc-emission-accounting-framework/>.
- [29] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2016, "Report of IPCC scoping meeting for a methodology report(s) to refine the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories", Report of the IPCC Scoping Meeting, ISBN: 9784887881969.
- [30] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023, "2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories", Accessed 20 October 2023, <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/>

- public/2019rf/index.html.
- [31] Greenhouse Gas(GHG) Protocol, 2023, “Calculation tools - specific accounting questions”, Accessed 4 November, 2023, <https://ghgprotocol.org/calculation-tools-faq>.
- [32] Kline, K.L., Dale, V.H., and Grainger, A., 2009, “Challenges for bioenergy emission accounting”, Bioenergy Knowledge Discovery Framework Science e-letter, 2010.5.2.
- [33] Pingoud, K., Cowie, A., Bird, N., Gustavsson, L., Rüter, S., Sathre, R., Soimakallio, S., Türk, A., and Woess-Gallasch, S., 2010, “Bioenergy: counting on incentives”, *Science*, **327**(5970), 1199-1200.
- [34] Forest Defenders Alliance, 2022, “Biomass plant CO₂ emissions - an explanation”, Accessed 4 January 2024, <https://forestdefenders.eu/biomass-plant-co2-emissions-an-explanation/>.
- [35] IEA Bioenergy, 2020, “The use of forest biomass for climate change mitigation: dispelling some misconceptions”, Accessed 15 October 2023, <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/the-use-of-forest-biomass-for-climate-change-mitigation-dispelling-some-misconceptions/>.
- [36] ECO & PARTNERS 2°C, 2021, “A study on the feasibility of a low-carbon clean fuel conversion Project”, Korea Ministry of Environment, 98.
- [37] Konkuk University, 2019, “Development of a methodology for evaluating the entire process by conversion method for extending the carbon storage period of wood products”, Korea Forest Service (KFS), 123-132.
- [38] IEA Bioenergy, 2011, “Bioenergy, land use change and climate change mitigation. Background Technical Report”, Accessed 11 December 2023, <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/Bioenergy-Land-Use-Change-and-Climate-Change-Mitigation-Background-Technical-Report.pdf>.
- [39] U.S. Environmental Protection Agency(U.S. EPA), 2018, “EPA’s treatment of biogenic carbon dioxide(CO₂) emissions from stationary sources that use forest biomass for energy production”, Accessed 19 January 2024, https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-04/documents/biomass_policy_statement_2018_04_23.pdf.
- [40] U.S. Energy Information Administration(U.S. EIA), 2022, “Biomass explained (Biomass and the environment)”, Accessed 4 October 2023, <https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/biomass-and-the-environment.php>.
- [41] The Government of the Republic of Korea, 2020, “2050 LEDS (Carbon neutral strategy of the Republic of Korea towards a sustainable and green society)”, Accessed 2 December 2023, https://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?pagerOffset=60&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=10276&orgCd=&condition.deleteYn=N&seq=7633.
- [42] The Government of the Republic of Korea, 2023, “National strategy for carbon neutral and green growth and the first national basic plan”, Accessed 2 December 2023, <https://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=2&boardNo=1469&searchCategory=&page=1&searchType=title&searchWord=%EA%B8%B0%EB%B3%B8%EA%B3%84%ED%9A%8D&menuLevel=2&menuNo=16>.
- [43] Japan Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), 2022a, “Japan’s green growth strategy to achieve carbon neutrality in 2050”, Accessed 20 October 2023, https://www.meti.go.jp/english/policy/energy_environment/global_warming/ggs2050/index.html.
- [44] Japan Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), 2023a, “Result of the public solicitation of opinions on the third interim report (Draft) of the biomass sustainability working group, new energy subcommittee, energy conservation and new energy subcommittee, advisory committee for natural resources and energy”, Accessed 1 October 2023, https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/biomass_sus_wg/022.html.
- [45] UK Parliament (House of Commons Environmental Audit Committee), 2023b, “Seeing the wood for the trees: the contribution of the forestry and timber sectors to biodiversity and net zero goals”, 5th Report of Session 2022-23, HC 637, Accessed 13 December 2023, <https://publications.parliament.uk/pa/cm5803/cmselect/cmenvaud/637/report.html>.
- [46] UK Department for Energy Security and Net Zero

- (DESNZ), 2023a, “Biomass strategy 2023”, UK Government, Accessed 10 October 2023, <https://www.gov.uk/government/publications/biomass-strategy>.
- [47] Germany Federal Ministry of Food and Agriculture, 2021, “Mitigating climate change. Creating value. Utilising resources efficiently (The charter for wood 2.0)”, the Federal Government of Germany, Accessed 12 October 2023, https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/EN/_Forests/charter-for-wood-2.html.
- [48] Germany Federal Ministry of Food and Agriculture, 2019, “Klimaschutz, wald und nutzung von holz”, the Federal Government of Germany, Accessed 1 October 2023, <https://www.bmel.de/DE/themen/wald/waelder-weltweit/wald-holz-klimaverhandlungen.html>.
- [49] The Government of Australia (Geoscience Australian), 2023, “Bioenergy”, Accessed 24 October 2023, <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/energy/resources/other-renewable-energy-resources/bioenergy>.
- [50] Korea Forest Service (KFS), 2023a, “About wood pellet”, Accessed 21 October 2023, https://www.forest.go.kr/kfswb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?mn=NKFS_02_01_11_04_01&cmsId=FC_001019.
- [51] Bastable, S., 2023, “How UNFCCC carbon accounting has created a biomass delusion and is contributing to climate change and global inequity”, Environmental Paper Network (EPN), Accessed 2 December 2023, <https://environmentalpaper.org/2023/11/how-unfccc-carbon-accounting-has-created-a-biomass-delusion-and-is-contributing-to-climate-change-and-global-inequity/>.
- [52] Norton, M., Baldi, A., Buda, V., Carli, B., Cudlin, P., Jones, M.B., Korhola, A., Michalski, R., Novo, F., and Oszlányi, J., *et al.*, 2019, “Serious mismatches continue between science and policy in forest bioenergy”. *Glob. Change Biol. Bioenergy*, **11**(11), 1256-1263.
- [53] Sterman, J., Moomaw, W., Rooney-Varga, J.N., and Siegel, L., 2022, “Does wood bioenergy help or harm the climate?”, *Bull. At. Sci.*, **78**(3), 128-138.
- [54] Booth, M.S., 2018, “Not carbon neutral: Assessing the net emissions impact of residues burned for bioenergy”, *Environ. Res. Lett.*, **13**(3), 035001.
- [55] Schlesinger, W.H., 2018, “Are wood pellets a green fuel?”, *Science*, **359**(6382), 1328-1329.
- [56] Cherubini, F., Bright, R.M., and Strömman, A.H., 2013, “Global climate impacts of forest bioenergy: what, when and how to measure?”, *Environ. Res. Lett.*, **8**(1), 014049.
- [57] Bernier, P., and Paré, D., 2013, “Using ecosystem CO₂ measurements to estimate the timing and magnitude of greenhouse gas mitigation potential of forest bioenergy”, *Glob. Change Biol. Bioenergy*, **5**(1), 67-72.
- [58] Peng, L., Searchinger, T.D., Zionts, J., and Waite, R., 2023, “The carbon costs of global wood harvests”, *Nature*, **620**, 110-115.
- [59] Ranius, T., Hämäläinen, A., Egnell, G., Olsson, B., Eklöf, K., Stendahl, J., Rudolphi, J., Sténs, A., and Felton, A., 2018, “The effects of logging residue extraction for energy on ecosystem services and biodiversity: A synthesis”, *J. Environ. Manage.*, **209**, 409-425.
- [60] Schulze, E.D., Sierra, C., Egenolf, V., Woerdehoff, R., Irsinger, R., Baldamus, C., Stupak, I., and Spellmann, H., 2020, “Response to the letters by Kun *et al.* and Booth *et al.*”, *Glob. Change Biol. Bioenergy*, **12**(12), 1038-1042.
- [61] Holmgren, P., 2021, “The forest carbon debt illusion”, Swedish Forest Industries, Accessed 29 September 2023, <https://www.forestindustries.se/news/events/reportthe-forest-carbon-debt-illusion/>.
- [62] Choi, S.H., 2021, “A mathematical programming method for minimization of carbon debt of bioenergy”, *Clean Technology*, **27**(3), 269-274.
- [63] Donnison, C., Sparks, J., Thornly, P., Fothergill, R., Röder, M., Welfle, A., Rowe, R., and Holland, R., 2023, “Written response to the environmental audit committee inquiry on sustainable timber and deforestation”, UK Supergen Bioenergy Hub, <https://www.supergen-bioenergy.net/output/supergen-bioenergy-hub-input-to-the-environmental-audit-committee-inquiry-on-sustainable-timber-and-deforestation/>.
- [64] Adams, D., 2013, “Sustainability of biomass for co-firing”, IEA Clean Coal Center, 43-58, ISBN: 9789290295501.
- [65] Malmshemer, R.W., Bowyer, J.L., Fried, J.S., Gee, E., Izlar, R.L., Miner, R.A., Munn, I.A., Oneil, E., and Stewart, W.C., 2011, “Managing forests because carbon

- matters: Integrating energy, products, and land management policy”, *J. For.*, **109**(7S), S7-S50.
- [66] Hoover, K., and Riddle, A.A., 2020, “Forest carbon primer”, U.S. Congressional Research Service, R46312, <https://crsreports.congress.gov/product/details?prodcode=R46312>.
- [67] The Government of Canada, 2020a, “Plain language summary - Range and uncertainties in estimating delays in greenhouse gas mitigation potential of forest bioenergy sourced from Canadian forests”, Accessed 29 September 2023, <https://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=36533>.
- [68] Ter-Mikaelian, M.T., Colombo, S.J., and Chen, J., 2015, “The burning question: Does forest bioenergy reduce carbon emissions? A review of common misconceptions about forest carbon accounting”, *J. For.*, **113**(1), 57-68.
- [69] Miner, R.A., Abt, R.C., Bowyer, J.L., Buford, M.A., Malmshemer, R.W., O’Laughlin, J., Oneil, E.E., Sedjo, R.A., and Skog, K.E., 2014, “Forest carbon accounting considerations in US bioenergy policy”, *J. For.*, **112**(6), 591-606.
- [70] IEA Bioenergy, 2023b, “Forest management and market responses”, Accessed 27 September 2023, <https://www.ieabioenergy.com/iea-publications/faq/woodybiomass/market-responses/>.
- [71] Burschel, P., Kürsten, E., Larson, B. C., and Weber, M., 1993, “Present role of German forests and forestry in the national carbon budget and options to its increase”, *Water Air Soil Pollut.*, **70**, 325-340.
- [72] McKechnie, J., Colombo, S., Chen, J., Mabee, W., and MacLean, H.L., 2011, “Forest bioenergy or forest carbon? Assessing trade-offs in greenhouse gas mitigation with wood-based fuels”, *Environ. Sci. Technol.*, **45**(2), 789-795.
- [73] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007, “Climate Change 2007: Working Group III: Mitigation of Climate Change (Figure 9.3)”, IPCC Fourth Assessment Report, Accessed 15 October 2023, https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/figure-9-3.html.
- [74] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001, “Carbon balance from a hypothetical forest management project (Figure TS.6)”, *Climate Change 2001: Mitigation – Technical Summary (A Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change)*, Accessed 13 October 2023, <https://archive.ipcc.ch/ipccreports/tar/vol4/english/wg3figts-6.htm>.
- [75] McKinley, D.C., Ryan, M.G., Birdsey, R.A., Giardina, C.P., Harmon, M.E., Heath, L.S., Houghton, R.A., Jackson, R.B., Morrison, J.F., and Murray, B.C., *et al.*, 2011, “A synthesis of current knowledge on forests and carbon storage in the United States”, *Ecol. Appl.*, **21**(6), 1902-1924.
- [76] Japan Ministry of Economy Trade and Industry (METI), 2019, “Biomass sustainability working group, 1st interim report”, Accessed 1 October 2023, https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/biomass_sus_wg/20191118_report.html.
- [77] Wear, D.N., and Bartuska, A., 2020, “Forest bioenergy 101: Generation and emissions”, *Resources for the Future*, Accessed 4 October 2023, <https://www.rff.org/publications/explainers/forest-bioenergy-101/>.
- [78] Martin-Gamboa, M., Marques, P., Freire, F., Arroja, L., and Dias, A.C., 2020, “Life cycle assessment of biomass pellets: A review of methodological choices and results”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **133**, 110278.
- [79] Government of Canada, 2020b, “Forest bioenergy”, Accessed 29 September 2023, <https://natural-resources.canada.ca/our-natural-resources/forests/industry-and-trade/forest-bioeconomy-bioenergy-bioproducts/forest-bioenergy/13325>.
- [80] U.S. National Renewable Energy Laboratory, 2021, “Life cycle greenhouse gas emissions from electricity generation: Update -NREL fact sheet”, U.S. Department of Energy, <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/80580.pdf>.
- [81] Kim, G., Lee, J.S., Lim, Y.J., and Oh, S.J., 2022, “An analysis of current bioenergy life cycle assessment methodology”, *GTC BRIEF*, **3**(11).
- [82] Hong, S.H., 2022, “Problems of forest management from a carbon neutral perspective and nature based solutions”, *Environmental Law and Policy*, **29**, 21-48.
- [83] Wendling, L., Garcia, J., Descoteaux, D., Sowińska-Świerkosz, B., McPhearson, T., Frantzeskaki, N., La Rosa, D., Yiwen, Z., Lin, T., and Fidélis, T., *et al.*,

- 2021, “Editorial: Introduction to the *Nature-Based Solutions* journal”, *NbS*, **1**, 100003.
- [84] Lee, S.H., Han, S.H., and An, N.H., 2022, “Cases and implications of response to climate crisis using ecosystem-based adaptation (EbA) approach”, *Environmental Law and Policy*, **29**, 1-20.
- [85] Choi, E.H., Kim, R., Lee, K.Y., Yang, A., Yang, H., Seo, H.Y., Chae, J.Y., and Na, G.J., 2023, “Nature-based solution research trends and forest”, Korea National Institute of Forest Science, ISBN: 9791160197990.
- [86] Seddon, N., Chausson, A., Berry, P., Girardin, C.A.J., Smith, A., and Turner, B., 2020, “Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges”, *Phil. Trans. R. Soc. B*, **375**(1794), 20190120.
- [87] Choi, E.H., Kim, R., Choi, S.S., Seo, H.Y., Gwak, D.H., and Choi, H.S., 2022, “Using nature-based Solutions in the forestry sector to respond to climate change”, Korea National Institute of Forest Science, ISBN: 9791160195811.
- [88] Ministry of Government Legislation, 2016, “Paris Agreement”, Article 5(1), Multilateral Treaty No.2315, November 10, 2023.
- [89] Janowiak, M., Connelly, W.J., Dante-Wood, K., Domke, G.M., Giardina, C., Kayler, Z., Marcinkowski, K., Ontl, T., Rodriguez-Franco, C., and Swanston, C., *et al.*, 2017, “Considering forest and grassland carbon in land management”, Gen. Tech. Rep. WO-95. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture, Forest Service. DOI: <https://doi.org/10.2737/WO-GTR-95>.
- [90] White House Council on Environmental Quality, White House Office of Science and Technology Policy, White House Domestic Climate Policy Office (White House), 2022, “Opportunities for accelerating Nature-based Solutions: A roadmap for climate progress, thriving nature, equity, and prosperity. report to the national climate task force”, <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/11/Nature-Based-Solutions-Roadmap.pdf>.
- [91] Ter-Mikaelian, M.T., Colombo, S.J., and Chen, J., 2008, “Fact and fantasy about forest carbon”, *For. Chron.*, **84**(2), 166-171.
- [92] Cut Carbon Not Forest, 2023, “Written evidence submitted by Cut Carbon Not Forests (CCNF) DEF0013”, UK Entailment Sustainable timber and deforestation, Accessed 3 December 2023, <https://committees.parliament.uk/writtenevidence/111258/html/>.
- [93] Korea Forest Service (KFS), 2023b, “Boiler application process”, Accessed 21 October 2023, https://www.forest.go.kr/kfsweb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?mn=NKFS_02_01_11_04_03&cmsId=FC_001041.
- [94] U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA), 2023, “Burn wise”, Accessed 10 October 2023, <https://www.epa.gov/burnwise>.
- [95] Lee, S.R. and Han, G.S., 2022, “A comparative study on the quality standards of wood pellet products and small-scale wood pellet boiler equipment in domestic and foreign”, *J. Agr. Sci. Chungbuk Nat'l Univ.*, **38**(2), 154-161.
- [96] UK Forest Research, 2023c, “Emissions”, Accessed 4 October 2023, <https://www.forestresearch.gov.uk/tools-and-resources/fthr/biomass-energy-resources/technical-and-regulatory/emissions/>.
- [97] IEA Bioenergy, 2023c, “How bioenergy contributes to a sustainable future”, *Bioenergy Review* 2023, Accessed 10 October 2023, <https://www.ieabioenergyreview.org/>.
- [98] Lee, S.R., Kang, S.B., and Han, G.S., 2023, “Reducing particulates and gaseous emissions through fuel switching from coal to wood pellets at power plants in South Korea during 2005 to 2022”, *BioRes.*, **18**(4), 8458-8472.
- [99] UK Department for Environment Food and Rural Affairs (DEFRA), 2023, “Emissions of air pollutants in the UK”, Accessed 10 October 2023, <https://www.gov.uk/government/statistics/emissions-of-air-pollutants/emissions-of-air-pollutants-in-the-uk-nitrogen-oxides-nox>.
- [100] Tomlin, A.S., 2021, “Air quality and climate impacts of biomass use as an energy source: A review”, *Energy Fuels*, **35**(18), 14213-14240.
- [101] Khan, A.A., de Jong, W., Jansens, P.J., and Spliethoff, H., 2009, “Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies”, *Fuel Process. Technol.*, **90**(1), 21-50.
- [102] Bracmort, K., 2016, “Biopower: Background and federal support”, U.S. Congressional Research Service, <https://>

- crsreports.congress.gov/product/details?prodcode=R41440.
- [103] UK Department for Energy Security and Net Zero (DESNZ), 2023b, “Powering up Britain: Energy security plan”, <https://www.gov.uk/government/publications/powering-up-britain/powering-up-britain-energy-security-plan>.
- [104] Bioenergy Insight, 2023, “Macron to convert France’s remaining coal-fired power plants to biomass”, 2023. 9.26., <https://www.bioenergy-news.com/news/macron-to-convert-frances-remaining-coal-fired-power-plants-to-biomass/>.
- [105] UK Climate Change Committee (CCC), 2023, “Progress in reducing UK emissions 2023 report to parliament”, <https://www.theccc.org.uk/publication/2023-progress-report-to-parliament/#downloads>.
- [106] Korea Forest Service (KFS), 2023c, “Forest Renaissance Strategy ('22-27)”, Accessed 3 October 2023, https://www.forest.go.kr/kfswb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?mn=NKFS_02_13_07&cmsId=FC_003622.
- [107] Lee, S.R., Park, S., Koh, M.H., and Han, G.S., 2022a, “S. Korea’s approach strategy through policy analysis of major countries to promote the use of forest biomass as renewable energy”, *New. Renew. Energy*, **18**(3), 10-22.
- [108] Mather-Gratton, Z.J., Larsen, S., and Bentsen, N.S., 2021, “Understanding the sustainability debate on forest biomass for energy in Europe: A discourse analysis”, *PLoS ONE*, **16**(2), e0246873.
- [109] Lee, Y.S., 2021, “A study on the measure of the construction for trade mechanism and market activation of eco-friendly distributed energy based on digital platform”, Korea Energy Economic Institute, ISBN: 9788955048469.
- [110] Ryu, S.H. and Kim S.H., 2020, “An analysis of residents’ perception on district heating in the village unit using forest biomass -Focused on the case of forest carbon circulation village in Hwacheon”, *Journal of Environmental Science International*, **29**(4), 339-349.
- [111] Fern (Making the EU work for people & forests), 2021, “NGOs: To protect nature and the climate, we must reform how bioenergy is treated in the EU’s renewable energy directive”, Accessed 3 December 2023, <https://www.fern.org/publications-insight/ngos-to-protect-nature-and-the-climate-we-must-reform-how-bioenergy-is-treated-in-the-eus-renewable-energy-directive-24-18/>.
- [112] Olsson, O., Roos, A., Guisson, R., Bruce, L., Lamers, P., Hektor, B., Thrän, B., Hartley, D., Ponitka, J., and Hildebrandt, J., 2018, “Time to tear down the pyramids? A critique of cascading hierarchies as a policy tool”, *WIREs Energy Environ.*, **7**(2), e279.
- [113] UN FAO, 2020, “Global forest resources assessment 2020 -Key findings”, DOI: <https://doi.org/10.4060/ca8753en>.
- [114] Malmshemer, R.W., Heffernan, P., Brink, S., Crandall, D., Deneke, F., Galik, C., Gee, E., Helms, J.A., McClure, N., and Mortimer, M., *et al.*, 2008, “Forest management solutions for mitigating climate change in the United States”, *Journal of Forestry*, **106**(3), 115-173.
- [115] IEA Bioenergy, 2016, “Cascading of woody biomass: definitions, policies and effects on international trade”, Accessed 13 October 2023, <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/cascading-of-woody-biomass-definitions-policies-and-effects-on-international-trade-2/>.
- [116] Olsson, O., 2017, “Cascading of woody biomass: The tricky path from principle to policy to practice”, Stockholm Environment Institute, Discussion brief, <https://www.sei.org/publications/cascading-of-woody-biomass-the-tricky-path-from-principle-to-policy-to-practice/>.
- [117] European Parliament (EP) and the Council of the European Union (EU), 2023, “Directive (EU) 2023/2413 of the European parliament and of the council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001”.
- [118] EU Commission (EC), 2016, “State aid: Commission authorises UK support to convert unit of Drax power plant from coal to biomass”, Accessed 11 October 2023, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_16_4462.
- [119] EU Commission (EC), 2023a, “Voluntary schemes”, Accessed 28 September 2023, https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/bioenergy/voluntary-schemes_en.

- [120] Booth, M.S., 2022, “Burning up the carbon sink: How the EU’s forest biomass policy undermines climate mitigation, and how it can be reformed”, Partnership for Policy Integrity (PFPI), Accessed 28 September 2023, <https://www.pfpi.net/reports/>.
- [121] IEA Bioenergy, 2023d, “Approaches to sustainability compliance and verification for forest biomass”, Accessed 4 October 2023, <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/approaches-to-sustainability-compliance-and-verification-for-forest-biomass/>.
- [122] Lee, S.R. and Han, G.S., 2021, “UK case study for sustainable forest biomass policy development of South Korea”, *New. Renew. Energy*, **17**(1), 50-60.
- [123] Japan Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), 2022b, “Biomass sustainability working group, 2nd interim report”, https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/biomass_sus_wg/20220414_report.html.
- [124] Japan Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), 2023b, “Biomass sustainability working group, 3rd interim report”, https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/biomass_sus_wg/20230706_report.html.
- [125] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019 “Risk management and decision making in relation to sustainable development”, In: *climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*, Cambridge University, pp.708, DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157988.009>.
- [126] Aguilar, F., Kittler, B., and Bager, S., 2016, “Environmental implications of increased reliance of the EU on biomass from the South East US : final report”, European Commission (Directorate - General for Environment), DOI: <https://data.europa.eu/doi/10.2779/30897>.
- [127] UK Department for Energy Security and Net Zero (DESNZ), 2023c, “Ability of bioenergy with carbon capture and storage to generate negative emissions”, <https://www.gov.uk/government/publications/ability-of-bioenergy-with-carbon-capture-and-storage-beccs-to-generate-negative-emissions>.
- [128] Galik, C.S., and Abt, R.C., 2016, “Sustainability guidelines and forest market response: an assessment of European Union pellet demand in the southeastern United States”, *Glob. Change Biol. Bioenergy*, **8**(3), 658-669.
- [129] Aguilar, F.X., Mirzaee, A., McGarvey, R.G., Shifley, S.R., and Burtraw, D., 2020, “Expansion of US wood pellet industry points to positive trends but the need for continued monitoring”, *Scientific Reports*, **10**(1), 18607.
- [130] Dale, V.H., Parish, E., Kline, K.L., and Tobin, E., 2017, “How is wood-based pellet production affecting forest conditions in the southeastern United States?”, *For. Ecol. Manag.*, **396**, 143-149.
- [131] Petrokofsky, G., Hooper, O., Petrokofsky, L., Gant, A.E., Harvey, W.J., and Willis, K.J., 2021, “What are the impacts of the wood pellet industry on biodiversity in Southeastern USA? A systematic evidence synthesis”, *For. Ecol. Manag.*, **483**, 118773.
- [132] Lippke, B., Oneil, E., Harrison, R., Skog, K., Gustavsson, L., and Sathre, R., 2011, “Life cycle impacts of forest management and wood utilization on carbon mitigation: Knowns and unknowns”, *Carbon Management*, **2**(3), 303-333.
- [133] Harrison, R.B., Footen, P.W., and Strahm, B.D., 2011, “Deep soil horizons: contribution and importance to soil carbon pools and in assessing whole-ecosystem response to management and global change”, *Forest Science*, **57**(1), 67-76.
- [134] Tidwell, T., 2016, “A sustainable bioenergy policy for the period after 2020: Stakeholder conference - Brussels, Belgium”, U.S. Forest Service (Speeches), Accessed 4 October 2023, <https://www.fs.usda.gov/speeches/recommendations-sustainable-bioenergy-policy>.
- [135] UN Environment programme (UNEP), 2022, “Spreading like wildfire - The rising threat of extraordinary landscape fires”, A UNEP Rapid Response Assessment, <https://www.unep.org/resources/report/spreading-wildfire-rising-threat-extraordinary-landscape-fires>.
- [136] International Monetary Fund (IMF), 2022, “Republic of Estonia”, IMF Country Report No. 2022/290, <https://www.imf.org/en/Publications/CR/Issues/2022/09/01/Republic-of-Estonia-Selected-Issues-522808>.

- [137] European Commission (EC), 2023b, “2023 Country report - Estonia”, Institutional Paper 230, https://economy-finance.ec.europa.eu/publications/2023-country-report-estonia_en.
- [138] Korea Forest Service (KFS), 2023d, “Forest forestry statics platform - Forest area and forest growing stock by year”, Accessed 11 October 2023, <https://kfss.forest.go.kr/stat/ptl/stat/statDtl.do?curMenu=3211&statSeq=6130>.
- [139] Korea Forest Service (KFS), 2023e, “Wood supply and demand statics”, Accessed 11 October 2023, https://www.forest.go.kr/kfsweb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?mn=NKFS_02_01_04_03_02&cmsId=FC_003649.
- [140] Korea Forest Service (KFS), 2023f, “Unused forest biomass statics”, Accessed 11 October 2023, https://www.forest.go.kr/kfsweb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?mn=NKFS_02_01_11_07_03&cmsId=FC_003565.
- [141] Lee, S.R., Han, H., Chang, Y.S., Jeong, H., Lee, S.M., and Han, G.S., 2022b, “Mid- and long-term forecast of forest biomass energy in South Korea, and analysis of the alternative effects of fossil fuel”, *New. Renew. Energy*, **18**(3), 1-9.
- [142] National Resources Institute Finland (LUKE), 2023a, “Removals decreased to 75 million cubic metres in 2022”, Accessed 11 October 2023, <https://www.luke.fi/en/news/removals-decreased-to-75-million-cubic-metres-in-2022>.
- [143] National Resources Institute Finland (LUKE), 2023b, “Wood in energy generation 2022 (provisional)”, Accessed 30 September 2023, <https://www.luke.fi/en/statistics/wood-consumption/wood-in-energy-generation-2022-provisional>.
- [144] European Commission (EC), 2023c, “Report on bio-energy sustainability under regulation EU/2018/1999”, Accessed 13 November 2023, https://energy.ec.europa.eu/publications/report-bioenergy-sustainability_en.
- [145] Partnership for Policy Integrity (PFPI), 2020, “Korean solar industry makes unprecedented legal challenge to “green” credentials of biomass energy”, Accessed 28 September 2023, <https://www.pfpi.net/korean-solar-industry-makes-unprecedented-legal-challenge-to-green-credentials-of-biomass-burning/>.
- [146] Stuart-Smith, R., Otto, F.E., and Wetzer, T., 2022, “Liability for climate change impacts: the role of climate attribution science”, *Corporate responsibility and liability in relation to climate change* (Intersentia 2022), DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4226257>.
- [147] Sabin Center for Climate Change Law, 2021, “Coöperatie mobilisation for the environment U.A and others v. executive board of province of North Holland (Vattenfall power generations Netherlands BV intervening)”, ECLI: NL:RBNHO:2021:4342, Accessed 15 November 2023, <https://climatecasechart.com/non-us-case/cooperatie-mobilisation-for-the-environment-ua-and-others-v-executive-board-of-province-of-north-holland-vattenfall-power-generations-netherlands-bv-intervening/>.
- [148] Sabin Center for Climate Change Law, 2019, “EU biomass plaintiffs v. European Union”, European Court of Justice, 14 January 2021, C-297/20 P, Accessed 16 November 2023, <https://climatecasechart.com/non-us-case/eu-biomass-plaintiffs-v-european-union/>.
- [149] Sabin Center for Climate Change Law, 2023, “In the Matter of the Application of Hawaii Electric Light Company, INC. - For approval of a Power Purchase Agreement for renewable dispatchable firm energy and capacity”, Supreme Court, SCOT-22-0000418, 13 March 2023, Accessed 17 November 2023, <https://climatecasechart.com/case/in-re-hawaii-electric-light-co-3/>.
- [150] IEA Bioenergy, 2021, “Campaigns questioning the use of woody biomass for energy are missing key facts”, Accessed 28 September 2023, <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/campaigns-questioning-the-use-of-woody-biomass-for-energy-are-missing-key-facts/>.
- [151] IEA Bioenergy, 2022a, “Facts, not fiction: Bioenergy from wood contributes to Europe’s energy security and is part of a sustainable energy mix”, Accessed 28 September 2023, <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/press-release-facts-not-fiction-bioenergy-from-wood-contributes-to-europes-energy-security-and-is-part-of-a-sustainable-energy-mix/>.
- [152] IEA Bioenergy, 2022b, “Facts, not fiction: Bioenergy from wood contributes to Europe’s energy security

- and is part of a sustainable energy mix”, Accessed 25 September 2023, <https://twitter.com/IEABioenergy/status/1568203854516199426>.
- [153] Norton, M., Baldi, A., Buda, V., Carli, B., Cudlin, P., B. Jones, M., Korhola, A., Michalski, R., Novo, F., and Oszlányi, J., *et al.*, 2019, “Serious mismatches continue between science and policy in forest bioenergy”, *Glob. Change Biol. Bioenergy*, **11**(11), 1256-1263.
- [154] IEA Bioenergy, 2019, “The use of forest biomass for climate change mitigation: response to statements by EASAC”, Accessed 11 October 2023, <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/the-use-of-forest-biomass-for-climate-change-mitigation-response-to-statements-by-easac/>.
- [155] European Academies' Science Advisory Council (EASAC), 2018, “EASAC’s correspondence with the President of the European Commission on the role of biomass energy”, Accessed 25 September 2023, <https://easac.eu/news/details/easacs-correspondence-with-the-president-of-the-european-commission-on-the-role-of-biomass-energy/>.
- [156] Brack, D., 2017, “Woody biomass for power and heat-impacts on the global climate”, Chatham House, <https://www.chathamhouse.org/2017/02/woody-biomass-power-and-heat>.
- [157] IEA Bioenergy, 2017, “IEA Bioenergy response to Chatham House report - Woody biomass for power and heat: Impacts on the global climate”, Accessed 18 October 2023, <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/iea-bioenergy-response>.
- [158] Partnership for Policy Integrity (PFPI), 2011a, “Carbon neutral? Think again.”, Accessed 6 October 2023, <https://www.pfpi.net/carbon-neutral-think-again/>.
- [159] Biofuelwatch, 2011a, “UK Renewables Obligation: Last chance to stop subsidies for destructive biomass and biofuel electricity(2011)”, Accessed 6 October 2023, <https://www.biofuelwatch.org.uk/2011/rocs-alert-1/>.
- [160] Solutions for Our Climate (SFOC), 2019, “Can biomass qualify as renewable energy? - The state of biomass policy in South Korea”, <https://forourclimate.org/sub/data/view.htmlidx13>.
- [161] Biofuelwatch, 2011b, “Big green lies”, Accessed 6 Oct 2023, <https://www.biofuelwatch.org.uk/2011/big-green-lies/>.
- [162] Partnership for Policy Integrity (PFPI), 2011b, “Carbon emissions from burning biomass for energy”, Accessed 6 October 2023, <https://www.pfpi.net/carbon-emissions/>.
- [163] Biofuelwatch, 2014, “Burning wood in power stations-public health impacts”, Accessed 6 October 2023, <https://www.biofuelwatch.org.uk/2014/biomass-aq-briefing/>.
- [164] Booth, M.S., 2014, “Trees, trash, and toxics: How biomass energy has become the new coal”, Partnership for Policy Integrity (PFPI), <https://www.biofuelwatch.org.uk/2014/trees-trash-and-toxics-how-biomass-energy-has-become-the-new-coal/>.
- [165] Ernsting, A., 2012, “Sustainable biomass: A modern myth - A review of standards, criteria and schemes certifying industrial biomass as ‘sustainable’, with particular emphasis on UK biomass electricity developments”, Biofuelwatch, https://www.biofuelwatch.org.uk/2012/biomass_myth_report/.
- [166] Stashwick, S., 2013, “Foxes guarding the henhouse; why “self-certification” in the biomass industry threatens our forests”, Natural Resources Defense Council (NRDC), Accessed 6 October 2023, <https://www.nrdc.org/bio/sasha-stashwick/foxes-guarding-henhouse-why-self-certification-biomass-industry-threatens-our>.
- [167] Climate and Ecological Crisis Respond Civil Solidarity (CECRCS), 2022, “Forests, ecological and bioenergy - Joint policy proposal for the 20th presidential election”, Accessed 7 October 2023, <https://forourclimate.org/sub/data/view.htmlidx68>.
- [168] World Wildlife Fund (WWF), 2019, “50 NGOs call for a science-based EU sustainable taxonomy”, Accessed 6 October 2023, https://wwf.panda.org/wwf_news/?353090/50-NGOs-call-for-a-science-based-EU-sustainable-taxonomy.
- [169] Biofuelwatch, 2020, “No over exploitation of forests for a wrong energy turn around”, Accessed 6 October 2023, <https://www.biofuelwatch.org.uk/2020/german-biomass-ngo-statement/>.
- [170] Natural Resources Defense Council (NRDC), 2010, “Establishing a sound framework for bioenergy in

- clean energy and climate protection legislation”, Issue Brief, https://www.nrdc.org/sites/default/files/ene_10042101a.pdf.
- [171] Solutions for Our Climate (SFOC), 2021a, “S.Korea forest policy is subsidizing forest cutting and accelerating climate change”, Accessed 6 October 2023, <https://forourclimate.org/sub/news/view.htmlidx67>.
- [172] Mongabay, “500+ experts call on world’s nations to not burn forests to make energy”, 2021.2.15.
- [173] Solutions for Our Climate (SFOC), 2021b, “Local and international scientists submit bioenergy statements to U.S., South Korea, and European leaders”, Accessed 7 October 2023, <https://forourclimate.org/sub/news/view.htmlidx49>.
- [174] EU Biomass Legal Case (EUBLC), 2019, “EU Renewable energy policy devastates forests and accelerates climate change, new lawsuit claims”, Accessed 6 October 2023, <https://eubiomasscase.org/eu-renewable-energy-policy-devastates-forests-and-accelerates-climate-change-new-lawsuit-claims/>.
- [175] Hankyoreh, “‘Biomass’ environmental issues will be cleared up by the Constitutional Court?”, 2020.9.29.
- [176] Solutions for Our Climate (SFOC), 2021c, “Administrative litigation to biomass subsidies policy more than solar”, Accessed 6 October 2023, <https://forourclimate.org/sub/news/view.htmlidx90>.
- [177] BBC, “Drax: The green energy scandal exposed”, 2022.10.3.
- [178] Korea Broad casting System (KBS), “The truth of the mountain with no trees: Only we didn’t know”, 2021.6.25.
- [179] CNN, “How marginalized communities in the South are paying the price for ‘green energy’ in Europe”, 2021.7.9.
- [180] Kim, S., Kim, H.L., Song, H., Chung, S.Y., and Cho, J., 2022, “Importing deforestation: Forest-risk commodity supply chains and due diligence legislation in South Korea”, Advocates for Public Interest Law (APIL), Solutions for Our Climate (SFOC), Korean Federation for Environmental Movement (KFEM), <https://forourclimate.org/sub/data/view.htmlidx74>.
- [181] Davis, S., 2023, “Wood pellets and environmental justice communities”, Dogwood Alliance, Accessed 6 October 2023, <https://dogwoodalliance.org/2023/02/wood-pellets-and-environmental-justice-communities/>.
- [182] Future Forest + Jobs, 2019, “Quick facts report: The Dogwood Alliance”, Accessed 30 September 2023, <https://futureforestsandjobs.com/quick-facts-report-the-dogwood-alliance/>.
- [183] Kim, S.T., and Lee, Y.H., 2006, “New functions of Internet mediated agenda-setting: Agenda-rippling and reversed agenda-setting”, *Korean Journal of Journalism & Communication Studies*, **50**(3), 175-204.
- [184] Zilberman, D., 2017, “Indirect land use change: much ado about (almost) nothing”, *Glob. Change Biol. Bioenergy*, **9**(3), 485-488.
- [185] Euractiv, “NGOs walk out of EU green finance group, citing political interference”, 2022.9.14.
- [186] Brown, K., 2019, “Anti-humanist environmentalism and the foundation for the carolinas”, Capital Research Center, Accessed 29 September 2023, <https://capitalresearch.org/article/anti-humanist-environmentalism-and-the-foundation-for-the-carolinas/>.
- [187] Sedjo, R.A., 2010, “Forest concerns in the United States: Then and now”, Resources, Accessed 5 December 2023, https://www.resources.org/common-resources/forest-concerns-in-the-united-states-then-and-now/?_gl=1*pcu4bf*_ga*MTE1Nzg0MzYyLjE3MDE3NzA5NDE.*_ga_HNHQWYFDLZ*MTcwMTc3MDk0MS4xLjEuMTcwMTc3MjM0MC4wLjAuMA.
- [188] Lyon, T., 2010, “The environmental movement: good cops and bad cops”, Resources, Accessed 5 December 2023, https://www.resources.org/common-resources/the-environmental-movement-good-cops-and-bad-cops/?_gl=1*394wbn*_ga*MTE1Nzg0MzYyLjE3MDE3NzA5NDE.*_ga_HNHQWYFDLZ*MTcwMTc3MDk0MS4xLjEuMTcwMTc3MTkzOS4wLjAuMA.
- [189] Quaranda. S., 2022, “Release: the nature conservancy exposed for promoting industrial logging and wood products”, Dogwood Alliance, Accessed 24 September 2023, <https://dogwoodalliance.org/2022/04/release-the-nature-conservancy-exposed-for-promoting-industrial-logging-and-wood-products/>.
- [190] Mendell, B.C., 2014, “Learning from mistakes in the

- media to improve the communication of wood bioenergy research”, *BioRes.*, **9**(1), 1-3.
- [191] Treen, K., Williams, H.T.P., and O'Neill, S.J., 2020, “Online misinformation about climate change”, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, **11**(5), e665.
- [192] Lewandowsky, S., 2021, “Climate change disinformation and how to combat it”, *Annual Review of Public Health*, **42**, 1-21.
- [193] More in Common, 2023, “Wie schaut die deutsche Gesellschaft derzeit auf die Klimabewegung?”, Accessed 29 September 2023, <https://www.moreincommon.de/klimabewegung/>.
- [194] National Centre for Social Research, 2023, “Role of biomass in achieving net zero: public dialogue”, UK Department for Energy Security and Net Zero (DESNZ), <https://www.gov.uk/government/publications/role-of-biomass-in-achieving-net-zero-public-dialogue>.
- [195] Korea Policy Briefing, 2023, “2023 National Survey on Forests”, Accessed 3 October 2023, <https://www.korea.kr/briefing/policyBriefingView.do?newsId=156572791>.