

재생에너지로서 산림바이오매스 활용 촉진을 위한 주요국의 정책분석을 통한 한국의 접근전략

이승록¹⁾ · 박세훈²⁾ · 고문현³⁾ · 한규성⁴⁾*

S. Korea's Approach Strategy through Policy Analysis of Major Countries to Promote the Use of Forest Biomass as Renewable Energy

Seung-Rok Lee¹⁾ · Sehun Park²⁾ · Moon-Hyun Koh³⁾ · Gyu-Seong Han⁴⁾*

Received 30 May 2022 Revised 5 July 2022 Accepted 18 July 2022 Published online 8 August 2022

ABSTRACT Forest biomass energy is based on scientific evidence in response to carbon neutrality and the climate crisis, international consensus, and environmental-geographic characteristics of each nation. In this study, the authors aimed to analyze macroscopic forest biomass energy policies for ten major countries. They categorized them into six detailed categories (Sustainable utilization, Cascading Utilization, Replacement of fossil fuel/Carbon intensive products, Utilization of forest by-products/residues as the source of energy, Contribution to carbon-neutral/climate change, and Biomass combined with CCS/CCUS). In addition, the surveyed nations have developed a policy consensus on the active use of forest biomass with sustainable forest management except for the cascading utilization category. Furthermore, the authors evaluated the mid to long-term plans of the Korean government for improvements in the policy and legal aspects. As a result, the authors derived four major directions that South Korea should approach strategically in the future (1) secure financial resources for sustainable forest management and stimulating investment in the timber industry, (2) promote unified policies to establish a bio-economy, (3) enhancement of the forest biomass energy system, and (4) reorganization and promotion of strategy centered on the opinions of field experts in internal and external instability.

Key words 산림바이오매스(Forest Biomass), 기후변화(Climate Change), 목재펠릿(Wood Pellet), 바이오에너지(Bioenergy), 바이오경제(Bioeconomy)

1. 서론

최근 국제적으로 에너지 공급망 이슈가 부각됨에 따라 바이오매스(생물유기체)의 일종인 산림자원을 활용한 에너지, 즉 산림바이오매스를 기반으로 한 고밀화 연료인 '목재펠릿(Wood Pellet)'에 대한 관심이 커지고 있다. 에너지원으로서 목재펠릿은 고온·고압에서 압축한 균질한 형상을 바탕으로 국가 간 무역이 가능한 재생에너지원이자, 시간과 계절에 상관없이 청정전력을 생산 가능한 탄소중립(Carbon-

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

2) Senior Research Fellow, Department of Legislative Research, Korea Legislation Research Institute

3) Professor, College of Law, Soongsil University

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

*Corresponding author: wood@chungbuk.ac.kr

Tel: +82-43-261-2540

Fax: +82-43-273-2241

neutral) 에너지원으로 주목받는다.^[1,2] IRENA(International Renewable Energy Agency)는 일부 이해관계자들 사이에 바이오매스에 대한 부정적 인식이 있지만, 에너지 목적으로서의 바이오매스는 전체 수명주기를 고려할 때 CO₂ 배출을 방지하여 긍정적 효과를 생성한다고 밝혔다.^[3]

IEA(International Energy Agency)의 주요 논의를 살펴보면, 에너지 부문에서 산림부산물과 같은 잔류물은 부피가 크고 장거리 수집과 운송에 큰 비용이 소요되므로 대부분 자국 내에서 사용될 것이라고 언급했으며, 국제적 수준에서 볼 때 최종에너지 수요와 관련, 현대적 바이오에너지¹⁾가 2015년 2.5%에서 2060년 17%로 확대됨으로써 2060년 연간 총 이산화탄소 감축량이 5.7 GtCO₂에 달할 것이라 분석했다. 여기서의 현대적 바이오에너지는 “농업 및 산업의 유기 폐기물 흐름과 산림 수확 및 목재 가공에서 발생하는 목질 잔류물을 포함하며, 이는 토양 비옥도 또는 생물다양성에 영향을 최소화하여 사용가능하다”는 의견이다. IEA는 향후 바이오에너지가 열 부문에서는 다른 저탄소 기술(히트펌프 등)과의 경쟁으로 성장이 제한적일 것이나, 전력 부문에서 향후 BECCS(Bioenergy with Carbon Capture and Storage)와 결합해 강력한 증가폭을 나타낼 것이라고 예측했다.^[6~8] McKinsey 글로벌연구소도 전기 부문의 광범위한 탈탄소화를 위해 바이오에너지 사용 확대가 중요하다고 밝힌 바 있다.^[9]

2022년 개최된 EU 에너지-환경장관 회의에서 기후·환경 및 에너지 정책의 성공에 산림과 목재 부문의 핵심적 역할을 재확인함과 동시에 목재 사용 촉진을 강조했다.^[10] 그런 점에서 EU 지역 내 목재 흐름을 살펴볼 필요가 있는데, Sankey 다이어그램 분석보고서(EU 27개국, 영국제외)에 따르면, 에너지로 직접 투입되는 목질계 바이오매스는 2009년 305백만 m³에서 2017년 382백만 m³로 증가했으며, EU에서 목재펠릿으로 가공되어 에너지로 투입된 수량은 2009년 19백만 m³에서 2017년 40백만 m³로 증가했다.^[11,12] Bioenergy Europe은 유럽의 에너지용 목재연료 대비 산업용 원목(제재용, 펄프용 등)의 비율이 2000년

19:81에서 2020년 23:77로 소폭 변화했으며, 유럽 산림은 최근 30년간 매년 262천 ha가 성장함에 따라 ha당 임목 축적량도 1990년 133 m³/ha에서 2020년 173 m³/ha로 증가하여 EU-27개국 총 임목축적량은 28 십억 m³에 달한다고 밝혔다.^[13]

이러한 국제적 추세에 힘입어 2008년 산림바이오매스 에너지가 최초 국내에 도입되었고, 제도적 고도화가 꾸준히 추진되었지만, 관계기관의 유관 정책과 주요국 정책을 종합적으로 분석하고 중장기 발전 방향을 모색한 연구는 전무한 실정이다. 이에 본 연구를 통해 각국이 어떠한 산림바이오매스에너지 정책 기조를 가지고 시책을 추진하는지 연구함으로써 향후 전략적 접근성을 모색할 필요가 있다.

이러한 문제의식을 바탕으로 저자들은 본 연구를 다음과 같이 구조화하여 수행했다. 제2장에서는 산림바이오매스 에너지의 탄소중립성에 대한 메커니즘과 이를 정책에 담고 있는 사례를 소개했다. 아울러 (1) 주요 국가에서 유엔기후변화사무국에 제출한 LEADS(Long-term low greenhouse gas Emission Development, 2050년 장기저탄소 발전전략, 이하 ‘LEADS’), (2) 유럽연합 소속 개별 국가가 EU 집행위원회에 제출한 2030년까지의 에너지 및 기후대응 계획에 해당하는 NECPs(National Energy and Climate Plans, 이하 ‘NECPs’), (3) IEA의 국가별 보고서를 참조하여 주요 정책을 6가지 항목으로 구조화했다. 해당 항목에 해당하지 않는 개별 국가 정책이나 동향은 별도로 논하였다. 제3장에서는 우리나라의 다양향 정책을 분석하고, 중장기 방향성과 법령체계에 대한 면밀한 검토를 기반으로 시사점을 도출했으며, 산림재해에 대응하는 기제로 접근 가능성도 살펴보았다.

2. 주요국 산림바이오매스에너지 정책

2.1 산림바이오매스에너지와 탄소중립 논의

IEA는 화석연료에서 바이오매스로 전환할 때 대기 중 온실가스 농도에 미치는 영향은 단순히 연소 시점에서의 CO₂ 배출량만으로 상호 비교함은 적절치 않다는 의견이다. 산림자원이 일반적으로 바이오에너지만을 위해 수확되는 것도 아니며, 임산업을 유지하고 지속적으로 목재를 공급하

1) 전통적 바이오에너지는 목재나 폐기물 등을 숯과 같은 형태로 비상업적(요리 등) 부문에서 연소·활용하는 체계. 현대적 바이오에너지는 농업·산림부산물·고형폐기물을 기반으로 발전, 열, 운송연료를 포함(액체 바이오연료, 바이오가스, 목재펠릿 등의 활용 기술).^[4,5]

고자 서로 다른 시점에서 목재는 수확되는데, 이는 산림의 성장단계에 따른 탄소격리 기능을 유지하도록 하고, 수확에 따른 일부 탄소 손실은 재생장으로 균형을 이뤄 전체 탄소 재고량은 안정적이라고 설명한다. 결국, 에너지로서 바이오매스의 생산 및 사용과 기후 영향성은 개별 입목(立木, Stand)단위가 아닌, 산림의 경관단위(Landscape)에서 거시적으로 평가되어야 하며, 수확량 및 고사율과 관련된 손실량이 전체 산림의 성장량을 초과하지 않는다면, 산림탄소 재고량의 순감소는 없다고 간주한다. 특히 IEA는 바이오에너지 등 목재제품 수요 증가로 인해 산림녹화와 같은 산림관리 개선과 산림 성장을 촉진하여 산림탄소 재고량이 증가할 것인바, 이로써 기후변화로 인한 산림재해 대응을 가능하게 한다는 의견이다. 따라서 화석연료로부터의 연료 전환을 지원하는 전략적 역할을 산림바이오매스에너지가 수행하므로, 지속가능한 관리 기반의 활용이 중요하다고 밝혔다.^[14]

EU는 이러한 입장을 잘 반영하여 폐기물이나 부산물은 최종제품으로 변환되기 전에 중간제품으로 변환 여부와 상관없이 수명주기 온실가스 배출량을 0으로 본다^[15] 「EU 2030 Climate and Energy Framework」에서 토지사용 및 임업 부문 온실가스 선정과 관련된 규정을 살펴보면, “국제적으로 합의된 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 지침에 근거해 바이오매스 연소로 인한 배출은 LULUCF(Land Use, Land Use Change and Forestry, 토지이용·토지전용·산림분야, 이하 ‘LULUCF’) 부문에서 고려된다는 조건으로 에너지 부문에서 영(0, Zero)으로 간주되고 있으므로, EU에서 바이오매스 연소로 인한 배출도 영(0, Zero)으로 간주한다”고 명시했다.^[16] 이에 대한 주요국 입장도 동일인데, **미국**은 IPCC 방법론에 따라 산림바이오매스 연료 소비로 인한 CO₂ 배출량은 에너지 부문에서 별도로 집계하지 않는다고 미국 환경보호청(U.S. Environmental Protection Agency)이 밝혔으며,^[17] **핀란드**는 부산물이나 잔류물을 기반으로 하는 산림바이오매스에너지가 LULUCF 부문 GHG(Greenhouse Gas) 배출에 미치는 영향도 적다고 언급했다.^[18] **독일**은 LEDS에 산림바이오매스를 활용한 에너지 생산으로 2014년 기준 3,100만 CO₂톤을 감축했다는 사례와 산림바이오매스에너지의 탄소회계(Carbon Audit)에 따른 탄소중립성에 대하여 구체적으로 언급했다.^[19] **일**

본은 2021년 「종합자원에너지조사회 자원·연료분과회 보고서」를 통해 바이오 연료를 ‘연소해도 대기 중의 CO₂를 증가시키지 않는 연료’로 규정했다.^[20]

2.2 주요국 정책의 범주화(LEDs, EU NECPs, IEA 중심)

본 항에서는 산림바이오매스에너지 관련 국가별 주요 보고서를 범주화하고, 이를 Table 1에 나타냈다. 항목별로 살펴보면, 가장 큰 범주에서 모든 국가는 산림바이오매스의 지속가능한 이용이라는 거시적 명제를 추구한다. 국가 단위에서 이를 실현하고자 화석연료와 탄소집약적 제품을 대체한다는 정책적 공감대를 바탕으로 한다. 이는 다시 에너지로서 고부가가치 목재 이용보다는 산림부산물과 목재 산업 부산물을 에너지원으로 활용한다는 정책 수단으로 구체화된다. 특히 산림바이오매스의 에너지로서 활용은 탄소 중립과 기후변화에 기여한다는 대명제에 모든 국가가 동의하고 있음은 주목할만하다. 최근에는 발전소에서 발생하는 탄소 포집 저장(Carbon Capture and Storage, CCS)과 이용(Utilization)을 추가하여 기술 도전과 연결하고 있는데, 이는 탄소 중립을 넘어서는 탄소 음(-)의 감축과 연계된다. 다만, 산림자원의 부가가치에 따른 활용체계, 즉 ‘가치단계적 이용원칙(Cascading Principle)’을 도입한 국가는 5개국이다. 이 원칙의 구현을 위해서는 목재 가공산업 벨류체인, 흙·돌 등 불순물 함량이 높은(경제성이 낮은) 산림부산물의 정책적 활용체계 및 가공기술력이 동시에 필요하다. 각국이 이를 구현할 수 있는 특수 여건을 갖췄는지, 산림자원의 고유한 특색과 정도가 어떠한지에 따라 정책적 구현도가 다르게 나타남을 함의한다. 다만, 위 3종 보고서에 해당 내용을 직접 언급하지 않았으나, 연계된 보고서 혹은 별도 정책적 수단을 확인 가능한 부분은 괄호로 표기했다(Table 1 참조).

2.3 국가별 정책 현안 검토

본 항은 Table 1 분류체계에 포함되지 않으나, 유의미한 개별 국가 정책 현안을 별도로 소개하고, 주요사항은 Table 2에 명시했다.

Table 1. National strategies and attitudes of forest biomass/bioenergy through three reports; LEDS, EU NECPs and IEA

	Sustainable Utilization	Cascading Utilization	Replaces fossil fuel / Carbon intensive products	Utilization of forest by-products / residues as energy sources	Contributes to carbon neutral / climate change	Biomass combined with CCS/CCUS
UK	●		●	●	●	●
NL	●	●	●	●	●	●
DK	●		●	●	●	●
FI	●		●	●	●	●
DE	●	●	●	●	●	●
AU	●		●	(●)*	●	●
CA	●	●	●	●	●	●
US	●		●	(●)*	●	●
JP	●	●	●	●	●	●
KR	●	(●)*	●	(●)*	●	●

Note 1. (UK) United Kingdom, (NL) Netherlands, (DK) Denmark, (FI) Finland, (DE) Germany, (AU) Australia, (CA) Canada, (US) United States of America, (JP) Japan, and (KR) South Korea

Note 2. In the case of “(●)”, each domestic policy has been identified, but it was not mentioned in the three above reports. (AU) Australia’s Bioenergy Roadmap, (US) US EIA Monthly Densified Biomass Fuel Report, and (KR) Regulations on Promotion of Use and Distribution of Forest Biomass Energy.

Table 2. Key point of major country’s forest biomass policy efforts

UK	<ul style="list-style-type: none"> • Coal power plants are being converted into biomass power plants. • The actual generation ratio of bioenergy among the renewable energy is 31% (2019). • CHP is mainly for industrial using.
NL	<ul style="list-style-type: none"> • Forest biomass for power plant, ‘Sustainable Energy Transition Subsidy Scheme (SDE ++)’ policy is being operated at the national level. • CHP is mainly for agricultural using.
DK	<ul style="list-style-type: none"> • Requires third-party certification to report sustainability when using forest biomass for energy sources. • Among the renewable energy consumption ratio, forest biomass accounts for 48% (2018).
FI	<ul style="list-style-type: none"> • Biofuels that can’t meet sustainability are subject to the same separate tax as fossil fuels. • By 2030, the amount of forest biomass used in heat and electricity production will increase to approximately 12 million m³ per year.
DE	<ul style="list-style-type: none"> • Through ‘Charter for Wood 2.0’, use of wood based on the cascading principle, and emphasize that wood for energy sources will replace fossil fuel.
AU	<ul style="list-style-type: none"> • Through ‘Bioenergy Roadmap (2021)’, emphasizes the role of energy transition and GHG emission reduction, and seeks to create jobs and enhance fuel security. • Among the Australia’s renewable energy production, bioenergy accounts for 47% (3% of total energy consumption).
CA	<ul style="list-style-type: none"> • Biofuels offer diversification of market opportunities, growth of Canadian forests (improved competitiveness), energy independence, and local investment with employment opportunities. • About 3.8 million tons of wood pellets were produced in 2021.
US	<ul style="list-style-type: none"> • Biomass, as a ‘Decarbonization tool’ that replaces fossil fuels in many parts of the economy without major infrastructure changes, and a ‘Core component’ of decarbonization efforts in the energy sector. • The total production capacity of wood pellets in the U.S. is 13.07 million tons as of 2021. • In 2022, the proportion of wood-based electricity generation among the biomass is predicted to be 10.8 billion kWh (41%).
JP	<ul style="list-style-type: none"> • The total consumption of wood pellets in Japan in 2020 is 2,156 thousand tons, and there are a total of 193 biomass power plants (7,394 MW) approved by March 2021. • Japan plans to significantly expand its domestic forest biomass supply as a fuel for power plants.

Note 1. (UK) United Kingdom, (NL) Netherlands, (DK) Denmark, (FI) Finland, (DE) Germany, (AU) Australia, (CA) Canada, (US) United States of America, and (JP) Japan

2.3.1 영국

바이오에너지가 이미 전기 시스템의 탈탄소화에 중요한 역할 수행하고 있다고 강조하고 있으며, 석탄발전소를 바이오매스 발전소로 연료전환 중이라 밝혔다.^[21~23] 2019년 기준 재생에너지원별 비중을 살펴보면 육상풍력이 29.9%, 태양광이 28.3%, 해상풍력이 21.1%, 바이오에너지가 16.6% 등이었으나, 실제 발전량은 바이오에너지가 31.0%, 해상 풍력 및 육상풍력이 각각 26.7%, 태양광이 10.7% 등이었다.^[24] CHP(Combined Heat & Power)의 경우 2019년 기준 전기 생산량은 23,461 GWh로 전년 대비 2.2% 증가했으나, 열 공급은 2019년 기준 41,697 GWh로 전년 대비 2.7% 감소했는데, 원인은 당시 주 수요처(화학산업)의 불안정성으로 지목되었다.^[24]

2.3.2 네덜란드

자국산 바이오매스 가용성을 증진하고, 바이오에너지의 지속가능성에 대해 열린 태도가 필요하다고 강조한다. 지속가능성 인증제도인 SDE ++(Sustainable Energy Transition Subsidy Scheme)를 바탕으로 발전용 바이오매스를 공급하고 있으며, 주택 부문에서 산림바이오매스 대신 히트펌프 이용이 활발하고, CHP는 주로 농업 부문 수요 충족을 위해 활용된다고 밝혔다.^[25~28]

2.3.3 덴마크

산림에 있는 목재에 대해서만(농지, 도시 제외) 전체 사용량의 90%에 대해 제3자 검증을 통해 지속가능성을 연례 보고하도록 하고 있으며, 산림바이오매스로 인한 전기 생산 시 고정 보조금을 지원한다. 2018년 기준 덴마크의 재생에너지 소비량 중 산림바이오매스가 차지하는 비중은 48%에 달하였으며(풍력 20%), 에너지 목적으로 사용되는 목재의 57%가 전기 및 지역난방에 활용된다고 밝혔다. 덴마크에서 수입하는 산림바이오매스의 60%는 유럽지역 밖에서 수입된다.^[29~31]

2.3.4 핀란드

산림부문 소득이 국가 GDP의 약 20%에 달하며, 특정 효율 이상으로 열을 생산하는 목질계 발전형태에 열원 인센

티브를 지급하되, 지속가능성을 충족하지 못하는 바이오연료는 화석연료와 동일한 별도의 세금을 부과한다. 즉, 농업 기원 1세대 지속가능한 바이오연료는 화석연료 대비 50% 수준, 2세대 폐기물이나 목질계와 같은 지속가능한 바이오연료는 면세다. 2030년까지 열 및 전기 생산에 사용되는 바이오매스의 양은 현재 수준의 약 1.5배인 연간 약 1,200만 m³에 달할 것으로 예측했다.^[18,32~33]

2.3.5 독일

타 국가와 달리 LEDS에 바이오매스 발전 때 미립자 배출을 최소화하기 위해 소형 또는 중형 연소시설은 별도의 기준을 충족하도록 한다고 명시하고 있으며, EU RED II²⁾의 지속가능성 기준을 자국뿐만 아니라 수입국(제3국)에도 확대 적용할 필요가 있다고 강조했다.^[35~37] 독일은 ‘기후보호-가치 창출-자원 효율성’이라는 목표를 바탕으로 「목재 현장 2.0」을 통해 에너지 전환의 중요한 요소로서 목재의 부가가치 순서에 따른 사용을 존중하고, 에너지원으로 활용 시 화석에너지원을 대체하게 되어 기후 면에서 긍정적이라고 밝혔다.^[38]

2.3.6 호주

재생에너지의 계절성 극복을 위해 바이오매스의 중요성을 강조했고, 국가의 탄소중립 목표 도달을 위한 정책 일환으로 「Bioenergy Roadmap(2021)」을 언급했다. 이 정책은 호주의 에너지 전환과 GHG 배출량 감소를 위해 바이오에너지 부문의 역할론을 담은 2030년까지의 로드맵으로서, 향후 10년간 약 2.6만 개 이상의 일자리 창출과 “연료안보 강화”를 견인할 것이라고 명시했다. 바이오에너지는 호주 재생에너지 생산량의 47%(총 에너지소비 중 3%)를 차지하고 있으며, 2050년까지 총 에너지소비의 20%까지 대체 가능할 것으로 예측했다.^[39~41]

2.3.7 캐나다

캐나다는 LEDS를 통해 바이오연료가 시장기회의 다양

2) (Renewable energy directive II, 2018) EU가 바이오매스를 활용한 연료의 친환경성을 담보하고자 지속가능성 기준을 설정한 것이며, 식량 경합성이나 토지용도 변경 정도가 낮은 차세대 원료(임업 및 산림기반 산업에서 발생하는 부산물 등) 활용을 장려함.^[34]

화와 함께 캐나다 산림 성장과 경쟁력 향상, 에너지 자립성, 지역투자 및 고용기회를 제공한다고 밝혔다.^[42] 최근 캐나다 원주민 밀집 지역(Saskatchewan)에 건립된 발전소(8.3 MW)는 인근 제재소에서 발생하는 연간 약 5.6만 톤의 부산물을 활용해 인근 약 5천 가구를 대상으로 열과 전력을 공급한다. 발전소 운영 과정에서 캐나다 원주민에 대한 주택, 의료, 교육지원 등 지역경제에 다양한 이익을 제공하면서 동시에 발전소에 대한 원주민의 지분소유권을 인정하는 등의 시도가 추진 중이다.^[43] 캐나다는 주요 목재펠릿 생산국이자 수출국으로서 2021년 약 380만 톤 규모다.^[44]

2.3.8 미국

바이오매스가 다양한 형태로 활용됨으로써 대규모 인프라 변경 없이 경제의 많은 부분에서 화석연료를 대체하는 “다재다능한 탈탄소화 도구”이자 에너지 부문 탈탄소화 노력의 “핵심 구성요소”라고 강조한다.^[45,46] 미국은 전세계에서 가장 큰 목재펠릿 생산국으로서 전체 생산용량이 2021년 기준 1,307만 톤에 달한다.^[47] U.S. Energy Information Administration(U.S. EIA)의 에너지 단기 전망에 따르면, 미국은 2022년 바이오매스를 활용해 총 262억 kWh의 전력을 생산할 것으로 예측했고, 이 중 목질계가 108억 kWh로 41%를 차지할 것으로 내다봤다.^[48]

2.3.9 일본

일본 내 바이오매스를 활용하여 생산하는 전력은 증가 추세인바, 2020년 FIT(Feed-in Tariff) 지원액은 4,800억 엔(1,810만 MWh)으로 2017년 이후 매년 증가세라고 밝혔고, 2020년 일본의 목재펠릿 총 소비량은 2,156천 톤이었으며, 2021년 3월까지 승인된 바이오매스 발전소는 총 193개소(7,394 MW)에 달한다.^[49] 일본은 바이오매스 발전 확대 차원에서 임야청과 에너지청 공동으로 산림자원의 지속적 활용의 중요성을 상호 확인하고, 자국 내 안정적 원료 조달을 위해 자국내 연료재 수급을 2030년까지 900만 m³으로 확대하고,^[50] 제대로 이용되지 못한 연간 약 2015년 9% 수준인 산림 잔존목재 이용률을 2025년 30% 이상으로 향상시킨다는 계획이다.^[51] 특히 2021년 일본 정부는 탄소중립이라는 특성을 가진 목질계 바이오매스 이용과 목재

이용과 관련한 기업에 ESG 투자 연계될 수 있도록 할 것이라고 밝혔다.^[52]

3. 우리나라 정책적 발전 방향 검토

3.1 산림바이오매스 정책 발전방안

범부처 차원에서 마련된 「탄소중립 추진전략」, 「제6차 산림기본계획(2018-2037)」 등 16개 중장기 정부정책과 각 부처에서 수행된 연구과제 등을 다각적으로 검토했다. 그 결과 화석연료를 대체하여 대기오염 개선 효과가 존재하는 탄소중립 청정에너지원으로서 산림바이오매스의 역할과 중요성을 정부가 잘 인식하고 있었다. 특히 바이오에너지의 전력피크 기여도가 높다는 점, 미래에는 국민생활 여건의 변화로 전력 소비 비중이 지속 확대될 것이라는 점 등에 미뤄보아 향후 산림바이오매스를 활용한 에너지가 안정적 전력공급을 위한 기저 재생에너지로서 일정한 역할이 더욱 강조될 필요가 있다는 점이 도출되었다. 다만, 산림부산물과 같은 저부가가치 산림자원이 중심인 ‘미이용 산림바이오매스’의 경제성 확보 차원에서 수집 인프라 구축, 수집비 지원 등 정책적 지원 대책이 미비한 점은 한계로 도출되었고, 산림바이오매스를 활용한 에너지가 실질적인 온실가스 감축과 산림순환에 이바지할 수 있도록 전주기분석 등 관련 정책이 지속해서 고도화될 필요가 있다. 과학기술 연계와 관련하여, 「탄소중립 기술혁신 추진전략(2021)」 등 9개 중장기 정부정책을 검토한 결과, 국가적 차원에서 탄소흡수원으로서 CCUS 등 첨단 기후기술이 산림바이오매스와 연계하여 탄소감축 부문에 활용 가능성이 열려있는바, 가격경쟁력 확보를 위해 임업 기계화 등 지속적인 R&D 추진이 필요하다.

3.2 법령체계 발전방안

「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(법률 제18469호, 2021. 9. 24., 제정)」 등 다수의 입법례와 유관 현행 법령체계 전반에 대한 검토를 통해 미이용 산림바이오매스 산업의 발전과 지원체계를 확인하여 제도의 신뢰성을 도모하고 법령체계 정비방안을 도출하기 위해 면밀히 검토하였다. 그 결과 관련 증명절차와 통계구축 등 개별 주체가

준수하도록 실효성 있는 제도와 정책체계가 수준 높게 구축된 것으로 평가되었다. 다만, 실질적인 실행력 담보를 더욱 강화하고, 분산된 관리체계를 일원화함으로써 체계적인 관리 운영을 영위할 수 있도록 총괄조직 및 실시기관 신설방안을 담은 제도적 근거 마련이 필요한 것으로 도출되었다. 아울러 관련 규정 체계를 세밀하게 정비하여 주무관청의 행정추진 근거를 더욱 명확하고 확고히 제시할 필요성이 있으며, 향후 「산림바이오매스에너지의 이용·보급 촉진에 관한 규정」을 상위입법 형태로 해결하여 체계 정합성을 확보함으로써 행정가와 법률 수인자간의 이해도를 높여 산림바이오매스 산업의 조기 안착을 지원할 수 있도록 해야한다.

3.3 산림재해 대응 기제로서 접근방안

「제4차 지속가능발전 기본계획(2021-2040)」, 「제2차 기후변화대응 기본계획(2020-2040)」, 「한국 기후변화 평가 보고서(2020)」 등의 내용을 종합하면, 국내 건조 일수 증가로 산불 발생 가능성이 커지고, 산림발달로 산림 내 연료가 증가함에 따라, 산불 발생 시 수관화 확대 가능성 또한 증대되고 있음을 확인할 수 있다. 산불 발생의 강도와 빈도를 분석하였을 때, 최근 빈도보다는 강도에서 더 군집된 형태의 결과 발생하고 있다.^[53] 산불확산에 관여하는 여러 인자 중 지형과 기상인자는 산불 행동 특성을 결정하는 데 중요한 역할을 하지만, 인위적 관리가 불가능한바, 산불의 연료는 산림 시업이 가능하여 인간의 노력으로 통제할 수 있는 유일한 인자로 평가된다.^[54] 특히 산불은 온실가스 배출과도 직결되는데, 중량 50 g 연료 기준에 대한 나무의 부위별 연소에 따른 CO₂ 평균 배출량을 살펴보면, 생엽 72.10 g, 가지 101.88 g, 수피 86.46 g 값을 보여 나뭇가지 부위가 가장 많은 CO₂를 배출하는 것으로 조사되었고,^[55] 산불 후 방치하면 부패할 때 더 많은 CO₂를 방출하게 되므로 산불 예방은 온실가스 배출을 가장 줄이고 지구온난화에 대응할 수 있는 중요한 조치로 평가된다.^[56] 지난 2021년 「National Wildlife Fire Risk Reduction Program Act」 수정안이 미국 하원의 관련 상임위원회에서 승인되었는데, 관련 보도에 따르면, 이 법안은 산불 완화 및 산불 지역에서 수집한 바이오매스를 에너지로 활용토록 함으로써 경제

적 가치를 창출한다는 취지라고 밝혔다.^[57] 선행 연구에 따르면, 2090년대 이후에는 강원도 일부를 제외한 전국으로 재선충 피해가 확산될 것으로 분석된 바 있다.^[58] 특히, 2020년 최장기간 흉수로 인해 전국에서 수거한 부유 쓰레기 10만 5천 톤은 2019년(4만 8천 톤) 대비 두 배 이상인 바, 수거된 부유 쓰레기의 80% 이상이 나무 등 초목류로 구성되었다고 보도되었다.^[59] 결국 기후변화가 산림환경 다방면에 영향을 미치므로, 지속가능하고 건강한 산림경영 과정에서 발생하는 ‘미이용 산림바이오매스’와 같은 저부가 가치 산림자원을 선제적으로 적절히 수집하여 에너지원으로 활용한다면, 이 또한 기후변화와 기후적응 대응 기제로 작용할 수 있음을 함의한다.

3.4 분산형 에너지로서 산림바이오매스 접근가능성 검토

산림바이오매스 활용 소규모 분산에너지체계 구축을 위해 다양한 시도가 있었지만, 긍정적 결과가 도출되지 않아^[60,61] 국내 적합성을 찾기 위한 노력이 지속 추진 중이다. 합리적 대안을 모색하기 위해 「제3차 녹색성장 5개년 계획(2019-2023)」, 「제3차 에너지기본계획(2019-2040)」, 「분산에너지 활성화 추진전략(2021)」, 「지역주도의 분산에너지 활성화 대책(2021)」을 검토한 결과, 우선순위로 추진되어야 하는 정책은 수요처 특성에 따른 수요공급 패턴분석을 바탕으로 별도(열원) 인센티브 부여 및 지원법령체계 정비가 우선 필요한 것으로 조사되었다. 계절적 수요 편중성보다는 상시수요가 존재하는 산업단지 등 전력수요 집중 지역에 정부의 분산형 에너지 정책이 검토될 예정임에 유념하고, 국내 산림자원의 고유 특성을 고려해 신중히 접근할 필요가 있다. 분산에너지로서 산림바이오매스는 공급되는 위치에서 활용하는 것도 의미 있다. 하지만 우리나라의 경우, 의미 있는 주요 수요처인 발전소가 해안가에 있으며, 여기에 공급 가능한 내륙산지 공급선이 국제적 수준에서 볼 때 현저히 짧다. 그러므로 어느 의미에서는 이 또한 분산형 에너지로서 활용체계라 할 수 있다. 따라서 산림바이오매스에너지 부문에서 분산형이라는 개념접근에 좀 더 신중할 필요가 있다.

4. 시사점 및 토론

IPCC는 지구온난화를 1.5°C 또는 2°C 이하로 제한하는 대부분의 경로에서 산림전용(Deforestation)을 줄이고자 재조림과 바이오에너지의 조합을 강조한다.^[62] 본 연구에 언급되지 않은 다양한 국가들도 LEDS를 통해 국산목재 이용 확대와 함께 바이오매스 이용 확대로 전력을 생산하여 화석연료를 대체토록 하고, 이를 위한 지원정책과 시설기반 확충에 나설 것을 밝힌 바 있다.^[63] 본 연구는 3가지 주요 보고서에만 기반해 정책적 범주화를 시도했다는 점에서 일부 한계가 있지만, 국제 수준의 정책 현안을 살필 수 있었다는 거시적 명제는 충분히 유지된다고 판단된다. 일각의 우려와 달리, 국제적으로 산림바이오매스의 에너지 활용 및 탄소중립성에 대한 과학적 인식은 명확했다. 이에 국내 산림바이오매스에너지의 적절한 성장방향과 전략을 모색하기 위한 논의를 이어가고자 한다.

첫째, 지속가능하고 적절한 산림관리를 위해 국가는 재원 확보를 통한 임도 등 산림 인프라 개선을 수행하고, 민간 자본투자를 유도해 목재산업을 활성화한다면, 산림 순환과 지역경제 활성화 효과를 동시에 누릴 수 있을 것이다. 독일은 산림기후기금을 통해 산림의 소유 비율에 따라 개별 프로젝트를 지원하고 있으며,^[64] 일본은 산림의 공익적 혜택 증진을 위해 산림환경세를 도입하여 산림 정비와 목재이용 촉진 등을 도모한다.^[65] 미국은 2017년 목재 혁신 법안과 함께 관련 기금을 조성하여 목조건축, 연구개발 등을 지원하고 기존 시설의 개보수를 장려함으로써 민간부문의 투자를 촉진시켜 농촌 지역의 제조 및 일자리 창출을 목표로 한다.^[66] 이러한 정부의 재원 투입은 향후 BECCS나 그린수소와 같은 첨단기술 R&D로 확대되어야 한다.

둘째, 현재 각 부처별 파편화된 다양한 바이오매스에 대하여 일원화된 관리체계 마련과 함께, 국가 단위의 '바이오경제(혹은 바이오에너지) 통합전략체계 수립'이 시급하다. EU는 순환 기반의 지속가능한 바이오 경제를 탄소중립의 핵심 도구이자 UN이 설정한 지속가능발전목표(SDGs)와 파리 협정의 기후 목표를 충족하게 하는 등 글로벌 당면과제 해결의 가능성을 지닌다고 보았다.^[67] 특히 EU는 바이오 경제가 지역경제 회복의 요소이자 탄소흡수원 증진의 기회 요인으로 인식하면서, 사용되지 않는 잔여 바이오매

스(Unused Residual Biomass)를 활용하기 위한 인센티브와 지속가능성을 강조한다.^[68] EU, 호주, 일본, 영국은 개별 국가 특수성을 반영한 국가 단위 바이오매스 부문 발전전략이 수립되어 투자를 촉진하고 있음도 참조할 필요가 있다.

셋째, 2018년 마련된 우리나라 '미이용 산림바이오매스' 제도의 고도화와 내실 있는 확충이 필요하다. 본 연구에서 밝힌 바와 같이 각국은 저부가가치 산림부산물에 대한 정책적 구체화 단계지만, 한국은 이미 상용화 단계를 넘어 안정화 및 체계고도화 단계를 바라보고 있다. 국립산림과학원 발표에 따르면, 미이용 산림바이오매스를 활용한 목재펠릿 생산량을 2021년 약 50만 톤 규모로 추산했으며, 이를 위한 원재료 공급량도 약 82만 톤으로 확대된 것으로 분석되었다.^[69] 다만, 현장 의견에 따르면 높은 원재료 수집비를 극복하기 위한 지원책이 아직 요원한바, 이는 유럽을 비롯한 각국의 현안 과제와 맥을 같이 하므로 수급 안정성과 원활한 산업체계 경영 여건 조성을 동시에 도모할 수 있도록 국가 수준의 관심과 배려가 필요하다. 재생에너지로서 산림바이오매스에너지 사용량 증가도 예측되므로, 이를 위한 원재료 범주도 현실성 있게 확대 개편될 필요가 있다. 즉, 현행 6종에 불과한 항목에 대하여, 지역 산림 여건과 산림재해 현안에 익숙한 지자체에 재량권을 부여하여 탄력적으로 공급량 확대를 구현하고, 부처간 합의를 기반으로 과수 전정목 등 다양한 목질계 자원을 활용토록 유연한 제도운영이 요구된다. 아울러 최근 산림바이오매스 활용의 중요 변수 중 하나는 기업의 ESG 역량과의 상관성 강화일 것인바, 이는 현재 "K-ESG 가이드라인"에 반영되어 있다.^[70] 다만 최근 기업들은 산림과 관련한 ESG 접근 전략으로 나무 심기(조림)에 집중하는 경향을 보이니, 산림순환적 가치를 증진하는 차원에서 한 단계 더 나아가 목재이용과 산림바이오매스의 지속가능한 활용을 도모할 필요가 있다. 이를 위해서는 연관된 평가체계를 마련하여 제도적 내실화를 기할 필요도 있다.

넷째, 현실로 다가온 에너지 공급망 불확실성과 재생에너지원의 간헐성, 그리고 청정 전력체계 구축, 가치단계적 이용원칙(Cascading Principle)이라는 복합적 과제에 접근하기 위해 현장 전문가 중심으로 접근 전략이 모색되어야 한다. 지속가능한 산림관리를 기반으로 산림전용을 줄이는

방편은 자국의 바이오 에너지를 중심으로 적절히 활용하는 것이라는 정책적 통찰은 국제적 수준에서 광범위하게 인식되고 있다. 이에 우리나라도 자국 내 방치된 미이용 산림바이오매스가 효과적으로 활용되도록 RPS와 같은 제도적 정책 수단을 포함, 벨류체인 전반의 생산성 강화를 위해 수집-운반 유류대 지원, 차량구매비 지원, 시설 첨단화 사업, 원재료 집하장 건설 등 산림인프라 사업을 추진함으로써 지역 산림산업 활력 증진과 자국내 공급력 강화 중심 정책이 실시되어야 한다. 이는 결국 에너지 안보와 연계될 것이기 때문이다. 최근 유럽은 산림전용을 유발하지 않고, 원산지 법령 기준상 합법성을 준수함과 동시에 추적 가능성을 구비한 목재 제품만을 유럽 내에 진입할 수 있도록 허용하고자 하는 움직임이 있는 등(부산물 활용시 또는 전과정 평가 시 예외 인정) 대륙별 블록화 현상이 목재산업 부문에도 점차 짙어지는바, 결국 우리나라도 산림바이오매스와 이를 활용한 에너지를 경제 및 자원 안보의 핵심 요소로 바라보고 내실을 기해야 하는 시점에 도달했음을 시사한다.

5. 결론

최근 재생에너지원으로서 산림자원에 관한 논의는 지속 가능한 산림경영(Sustainable Forest Management)을 기반으로 탄소중립과 연계해 진행 중이다. 이 논의는 기후변화 측면에서 거시적이고 과학적 가치를 기반으로 수행되어야 하며, 목재 수확량(고사목 포함)이 전체 산림 성장량을 초과하지 않도록 하는 것이 산림탄소 재고량 측면에서 '지속가능한 관리기반의 활용체계'로 간주된다. 특히 이는 국제적 수준의 광범위한 합의를 바탕으로 하는바, 각국은 2050년까지 산림바이오매스에너지 비중을 확대 추진하고 있음을 본 연구를 통해 확인했다.

그런 측면에서 저자들은 주요국이 어떠한 정책적 수단을 활용하는지 확인하고자 LEDS, EU NECPs, IEA 3중 보고서 분석을 통해 6가지 정책 항목화를 수행했다. 국제 수준에서 살펴본 결과, 조사 대상 국가들은 (1) 산림바이오매스의 지속가능한 이용, (2) 화석연료 및 탄소집약제품 대체, (3) 산림부산물의 에너지 활용, (4) 탄소중립과 기후변화에 기여, (5) 그리고 바이오에너지와 이산화탄소 포집·저장·

활용 결합체계 구축과 관련한 정책 명제를 공통적으로 추진하는 것으로 나타났다. 하지만 (6) 산림바이오매스의 가치단계적 이용(Cascading Principle)에 관련된 정책은 국가별 차이가 존재하였는바, 이는 국가별 산림 특색 혹은 목재산업 벨류체인의 자국내 구축 여부에 따라 다르게 발현되고 있음을 추정해볼 수 있다.

이렇게 분석된 국제 수준의 정책분석을 바탕으로 한국이 어떠한 전략을 가지고 나아가야 하는지 정책적 측면과 법령체계 개선방안, 산림재해 대응 기제로서 접근방안, 국내 지리적 여건상 산림바이오매스에너지 부문과 분산형 전원 역할 개념접근 가능성까지 종합 검토했다. 그 결과 네 가지 접근 방향이 도출되었는바, 이는 (1) 지속가능한 산림경영을 위한 자원 확보 및 목재산업 투자 활성화, (2) 일원화된 정책 추진을 통한 바이오 경제체계 구현, (3) 산림바이오매스에너지 체계의 고도화, (4) 현장 전문가 중심의 대내외적 리스크 대응전략체계 구축이 필요하다는 명제로 구체화되었다. 이러한 중장기 미래전략은 산업계에 투자 확실성을 제공하고, 기업의 ESG 경영에 연계될 수 있는 구체성을 제공할 것이다.

산림바이오매스에너지를 향한 건강한 사회적 발전 방향을 찾기 위해 산림이라는 복잡한 메커니즘과 산림을 기반으로 업을 영위하는 실제적 현실을 고려해, 건전하고 객관적인 과학기술 기반의 접근이 중요한 때다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 산림청 정책연구 '산림바이오매스 활성화 세부 실시계획 수립을 위한 연구'와, 산림청(한국 임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업 '(2021353D10-2223-AC03)'의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

References

- [1] IEA (International Energy Agency) Bioenergy, 2018, "Is energy from woody biomass positive for the climate?", Accessed 21 Feb 2022, <https://www.ieabioenergy.com/iea-publications/faq/woodybiomass/>.

- [2] Han, G.S., 2006, “Pellet fuel from wood biomass”, Proc. Korean society for new and renewable energy Fall Conference, pp. 521-524.
- [3] IRENA (International Renewable Energy Agency), 2020, “A report for the G20 energy sustainability working group”, Abu Dhabi.
- [4] IRENA, 2022, “Bioenergy”, Accessed 1 July 2022, <https://www.irena.org/bioenergy>.
- [5] Goldemberg, J., and Coelho, S.T., 2004, “Renewable energy—traditional biomass vs. modern biomass”, *Energy Policy*, **32**(6), 711-714.
- [6] IEA (International Energy Agency), 2012, “Technology roadmap - bioenergy for heat and power”, Accessed 15 Feb 2022, <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-bioenergy-for-heat-and-power>.
- [7] IEA, 2017, “Technology roadmap: Delivering sustainable bioenergy”, Accessed 13 Feb 2022, <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/technology-roadmap-delivering-sustainable-bioenergy/>.
- [8] IEA, 2021, “Net zero by 2050”, Accessed 20 Feb 2022, <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
- [9] Henderson, K., Pinner, D., Rogers, M., Smeets, B., Tryggstad, C., and Vargas, D., 2020, “Climate math: what a 1.5-degree pathway would take”, *McKinsey Quarterly*, Accessed 20 Feb 2022, <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/climate-math-what-a-1-point-5-degree-pathway-would-take>.
- [10] French presidency of the council of the European Union, 2022, “Significant progress made at the informal meetings of the ministers for the environment”, Accessed 1 April 2022, <https://presidence-francaise.consilium.europa.eu/en/news/press-release-significant-progress-made-at-the-informal-meetings-of-the-ministers-for-the-environment/>.
- [11] Cazzaniga, N., Jonsson, K., Palermo, D., and Camia, A., 2019, “Sankey diagrams of woody biomass flows in the EU-28”, doi:10.2760/719710, JRC115777.
- [12] Cazzaniga, N., Jasinevičius, G., and Mubareka, S., 2022, “Sankey diagrams of woody biomass flows in the EU – 2021”, Accessed 5 April 2022, <https://ec.europa.eu/knowledge4policy/publication/forestry-sankey>.
- [13] Bioenergy Europe, 2021, “Sustainable bioenergy use and Europe’s growing forests”, Accessed 23 Feb 2022, <https://bioenergyeurope.org/articles/331-sustainable-bioenergy-use-and-europe-s-growing-forests.html>.
- [14] IEA Bioenergy, 2021, “IEA bioenergy annual report 2020”, Accessed 25 Feb 2022, <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/new-publication-iea-bioenergy-annual-report-2020/>.
- [15] EC (European Commission), 2021, “Proposal for a directive of the European parliament and of the council”, Accessed 15 June 2022, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0557>.
- [16] European Parliament, “Regulation (EU) 2018/841 of the European parliament and of the council of 30 May 2018 on the inclusion of greenhouse gas emissions and removals from land use, land use change and forestry in the 2030 climate and energy framework, and amending regulation (EU) No 525/2013 and decision No 529/2013/EU (text with EEA relevance)”, Accessed 15 June 2022, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.156.01.0001.01.ENG.
- [17] US EPA (United States Environmental Protection Agency), 2021, “Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2019”, Accessed 5 July 2022, <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks-1990-2019>.
- [18] EC, 2019, “(Finland)Integrated national energy and climate plan”, Brussels.
- [19] Germany, 2017, “Climate action plan 2050 principles and goals of the German government’s climate policy”, UNFCCC, Bonn.
- [20] Japan Ministry of Economy Trade and Industry, 2020, “Report of the resources and fuels subcommittee of the agency for natural resources and energy”, Accessed 7 April 2022, https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shigen_nenryo/20210512_report.html.
- [21] United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland, 2018, “The clean growth strategy leading the way to a low carbon future”, UNFCCC, Bonn.
- [22] United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland, 2021, “UK Net zero strategy: Build back greener”, UK.
- [23] IEA, 2019, “Energy policies of IEA countries: United Kingdom 2019 review”, Accessed 17 April 2022, <https://www.iea.org/reports/energy-policies-of-iea-countries-united-kingdom-2019-review>.

- www.iea.org/reports/energy-policies-of-iea-countries-united-kingdom-2019-review.
- [24] UK Department for Business, Energy & Industrial Strategy, 2021, “Digest of UK Energy Statistics (DUKES): renewable sources of energy”, Chapter 6: statistics on energy from renewable sources, Accessed 15 August 2021, <https://www.gov.uk/government/statistics/renewable-sources-of-energy-chapter-6-digest-of-united-kingdom-energy-statistics-dukes#full-publication-update-history>.
- [25] Netherlands, 2019, “Long term strategy on climate mitigation”, UNFCCC, Bonn.
- [26] IEA, 2020, “The Netherlands 2020”, Accessed 20 June 2021, <https://www.iea.org/reports/the-netherlands-2020>.
- [27] IEA Bioenergy, 2021, “Expectation and implementation of flexible bioenergy in different countries”, Task 44, Accessed 20 June 2021, <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/new-publication-expectation-and-implementation-of-flexible-bioenergy-in-different-countries/>.
- [28] EC, 2019, “(Netherlands)Integrated national energy and climate plan 2021-2030”, Brussels.
- [29] Denmark, 2020, “Climate programme 2020 Denmark’s mid-century, long-term low greenhouse gas emission development strategy”, UNFCCC, Bonn.
- [30] EC, 2019, “(Denmark)Integrated national energy and climate plan under the regulation of the European parliament and of the council on the governance of the energy union and climate action”, Brussels.
- [31] Danish Energy Agency, 2020, “Biomass analysis”, Accessed 10 October 2021, <https://ens.dk/en/press/biomass-analysis-has-been-translated-english>.
- [32] Finland, 2020, “Finland’s long-term low greenhouse gas emission development strategy”, UNFCCC, Bonn.
- [33] IEA, 2018, “Energy policies of IEA countries: Finland 2018 review”, Accessed 23 October 2021, <https://www.iea.org/reports/energy-policies-of-iea-countries-finland-2018-review>.
- [34] EC, 2018, “Directive (EU) 2018/2001 of the European parliament and of the council of 11 december 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources”, Accessed 25 October 2021, <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/2018-12-21>.
- [35] Germany, 2017, “Climate action plan 2050 principles and goals of the German government’s climate policy”, UNFCCC, Bonn.
- [36] IEA, 2020, “Germany 2020”, Accessed 25 October 2021, <https://www.iea.org/reports/germany-2020>.
- [37] EC, 2019, “(Germany)Integrated National Energy and Climate Plan”, Brussels.
- [38] Germany Federal Ministry of Food and Agriculture, 2018, “Mitigating climate change. Creating value. Utilising resources efficiently”, Charter for wood 2.0, Accessed 17 March 2022, <https://www.charta-fuer-holz.de/index.php?id=11869>.
- [39] Australia, 2021, “Australia’s long-term emissions reduction plan: A whole-of-economy plan to achieve net zero emissions by 2050”, UNFCCC, Bonn.
- [40] Australian Renewable Energy Agency, 2021, “Australia’s bioenergy roadmap report”, Accessed 18 April 2022, <https://arena.gov.au/knowledge-bank/australias-bioenergy-roadmap-report/>.
- [41] Australian Government (Department of Agriculture Fisheries and Forestry), 2022, “Bioenergy from wood waste”, Accessed 18 April 2022, <https://www.agriculture.gov.au/agriculture-land/forestry/industries/bioenergy-from-wood-waste>.
- [42] Canada, 2016, “Canada’s mid-century long-term low-greenhouse gas development strategy”, UNFCCC, Bonn.
- [43] Canadian Biomass, “A first for Saskatchewan: Inside MLTC’s new bioenergy centre”, 2022.02.03., Accessed 3 March 2022, <https://www.canadianbiomassmagazine.ca/a-first-for-saskatchewan-inside-mltcs-new-bioenergy-centre/>.
- [44] Biomass Magazine, “Canadian wood pellet production to reach 3.8M metric tons in 2021”, 2021.07.13., Accessed 1 July 2022, <https://biomassmagazine.com/articles/18147/canadian-wood-pellet-production-to-reach-3-8m-metric-tons-in-2021>.
- [45] United States of America, 2016, “United States mid-century strategy for deep decarbonization”, UNFCCC, Bonn.
- [46] United States of America, 2021, “The long-term strategy of the United States pathways to net-zero greenhouse gas emissions by 2050”, UNFCCC, Bonn.

- [47] U.S. Energy Information Administration, 2022, “Monthly densified biomass fuel report”, Accessed 5 May 2022, <https://www.eia.gov/biofuels/biomass/>.
- [48] U.S. Energy Information Administration, 2022, “Short-Term energy outlook”, p.50, https://www.eia.gov/outlooks/steo/pdf/steo_full.pdf.
- [49] United States department of Agriculture, 2021, “Japan: biofuels annual”, https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_Tokyo_Japan_11-01-2021.pdf.
- [50] Korea Energy Economics Institute, 2021, “World energy market insight”, **21-3**, Ulsan.
- [51] Japan Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (Biomass Policy Division Food Industry Affairs Bureau), 2017, “Circumstances surrounding the utilization of biomass”, Tokyo.
- [52] Japan Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, 2021, “Ministry of agriculture, forestry and fisheries global warming countermeasure plan”, Tokyo.
- [53] Kim, S.J., Lim, C.H., Kim, G.S., Lee, J.Y., Geiger, T., Rahmati, O., Son, Y.H., and Lee, W.K., 2019, “Multi-temporal analysis of forest fire probability using socio-economic and environmental variables”, *Remote Sensing*, **11**(1), 86.
- [54] Lee, S., Kim, S., Lee, B., and Lee, Y.J., 2019, “A dynamic growth model for predicting forest fire fuel loads for *Pinus koraiensis* stands in South Korea”, *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, **19**(3), 121-130.
- [55] Park, Y.J., Lee, H.P., Kim, M.J., and Kim, H.R., 2011, “A study on analysis of carbon dioxide emission by forest fire-quercuss species”, *Proc. The Korea Institute of Fire Science and Engineering Conference*, pp. 436-440.
- [56] Bonnicksen, T.M., 2008, “Greenhouse gas emissions from four California wildfires: Opportunities to prevent and reverse environmental and climate impacts”, *FCEM Report No. 2*
- [57] Biomass, “Feenstra amendment bolsters use of woody biomass for bioenergy”, 2021.11.17., Accessed 3 March, 2022, <http://www.biomassmagazine.com/articles/18490/feenstra-amendment-bolsters-use-of-woody-biomass-for-bioenergy>.
- [58] An, H.J., Lee, S.M., and Cho, S.J., 2019, “The effects of climate change on pine wilt disease in South Korea: Challenges and prospects”, *Forests*, **10**(6), 486.
- [59] Ministry of Environment, 2020, “Completion of collection of 100,000 tons of floating garbage brought in due to torrential rain”, Accessed 28 April 2022, <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=1400750&menuId=286>.
- [60] Korea Rural Economic Institute, 2020, “Policy tasks to use forest biomass as a local energy source”, Naju.
- [61] National Institute of Forest Science, 2019, “Mountain village revitalization plan using forest biomass energy: Focusing on comparison of forest carbon cycle village and Japanese biomass town”, *Forest Policy Issues* **119**, Seoul.
- [62] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2019, “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”, Accessed 28 March 2022, <https://www.ipcc.ch/srccl/>.
- [63] Korea National Institute of Forest Science, 2021, “Current status and implications of carbon-neutral, long-term low-carbon development strategies and nature-based solutions”, *International Forest Policy Topics* **102**, pp.22-24. Seoul.
- [64] Federal Ministry of Food and Agriculture, 2021, “Forest Climate Fund”, Accessed Feb 15 2022, <https://www.bmel.de/EN/topics/forests/forests-in-germany/forest-climate-fund.html>.
- [65] National Institute of Forest Science, 2020, “Japan forest environment (concession) tax trend and policy implications”, *International Forest Policy Topics* **95**, Seoul.
- [66] Korea forest service, 2017, “Information on the wood industry in major countries (2017-3)”, pp. 106-108, Daejeon.
- [67] Fritsche, U., Brunori, G., Chiamonti, D., Galanakis, C., Matthews, R. and Panoutsou, C., 2021, “Future transitions for the Bioeconomy towards sustainable development and a climate-neutral economy - Foresight scenarios for the EU bioeconomy in 2050”, doi:10.2760/469550, JRC123532.
- [68] Fritsche, U., Brunori, G., Chiamonti, D., Galanakis,

- C., Hellweg, S., Matthews, R. and Panoutsou, C., 2020, “Future transitions for the bioeconomy towards sustainable development and a climate-neutral economy - Knowledge synthesis final report”, doi:10.2760/667966, JRC121212.
- [69] Lee, S.M., 2022, “Wood pellet supply and demand trend and outlook (Korea)”, 2022 Forest-Forestry Outlook, Seoul. pp. 258-282.
- [70] Ministry of Trade, Industry and Energy, 2021, “K-ESG Guideline”, Accessed 1 July 2022, http://www.motie.go.kr/motie/gov3.0/gov_openinfo/sajun/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=631&bbs_cd_n=30.