

한국의 산림바이오매스에너지 중장기 수요-공급전망과 화석연료 대체효과 분석

이승록¹⁾ · 한 희²⁾ · 장윤성³⁾ · 정한섭⁴⁾ · 이수민⁵⁾ · 한규성⁶⁾*

Mid- and Long-term Forecast of Forest Biomass Energy in South Korea, and Analysis of the Alternative Effects of Fossil Fuel

Seung-Rok Lee¹⁾ · Hee Han²⁾ · Yoon-Seong Chang³⁾ · Hanseob Jeong⁴⁾ · Soo Min Lee⁵⁾ · Gyu-Seong Han⁶⁾*

Received 31 May 2022 Revised 21 June 2022 Accepted 22 June 2022 Published online 20 July 2022

ABSTRACT This study analyzed the anticipated supply-and-demand of forest biomass energy (through wood pellets) until 2050, in South Korea. Comparing the utilization rates of forest resources of five countries (United Kingdom, Germany, Finland, Japan, and S. Korea), it was found that S. Korea does not nearly utilize its forest resources for energy purposes. The total demand for wood pellets in S. Korea (based on a power generation efficiency of 38%) was predicted to be 3,629 and 4,371 thousand tons in 2034 and 2050, respectively. The anticipated total wood pellet power generation ratio to target power consumption is 1.13% (5,745 GWh), 1.17% (6,336 GWh), and 1.25% (7,631 GWh) in 2020, 2030, and 2050, respectively. Low value-added forest residues left unattended in forests are called “Unused Forest Biomass” in S. Korea. From the analysis, the total annual potential amount of raw material, sustainably collectible amount, and available amount of wood pellet in 2050 were estimated to be 6,877, 4,814, and 3,370 thousand tons, respectively. The rate of contribution to Nationally Determined Contributions was up to 0.64%. Through this study, the authors found that forest biomass energy will contribute to a carbon neutral society in the near future at the national level.

Key words Forest biomass(산림바이오매스), Wood pellet(목재펠릿), Energy transition(에너지 전환), Bioenergy(바이오에너지), Forest residues(산림부산물)

- 1) Ph.D Student, Graduate School of Energy and Environment (KU-KIST Green School), Korea University
- 2) Research Scientist, Forest Policy and Economics Division, National Institute of Forest Science, Assistant Professor, Department of Agriculture, Forestry and Bioresources, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University
- 3) Research Scientist, Forest Policy and Economics Division, National Institute of Forest Science
- 4) Research Scientist, Forest Industrial Materials Division, Forest Products and Industry Department, National Institute of Forest Science
- 5) Senior Researcher, Forest Industrial Materials Division, Forest Products and Industry Department, National Institute of Forest Science
- 6) 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

1. 서론

기후위기와 에너지 안보에 대한 공감대가 형성되면서, 화석연료를 직접 대체가능한 바이오에너지에 대한 관심이 증가세다. UN은 「산림전략 2017-2030」을 통해 지속가능하게 관리되는 산림의 비율과 그 영역을 확장하는 방법으로 ‘산림바이오매스의 활용’을 제시했다.^[1] 국제에너지기구(IEA)와 국제재생에너지기구(IRENA)는 저평가된 바이오에너지가 미래에는 에너지전환과 기후친화적 순환탄소경제를 구축하는데 필수적인 역할을 할 것이며, 기후변화 완화 조치로서 화석연료에서 지속가능한 산림바이오매스로의 전환을 통해 대기 중 CO₂를 줄여야 한다고 권고했다.^[2~5] 최

근 개최된 제15차 세계산림총회에서 채택된 ‘서울 산림선언문(The Seoul Forest Declaration)’에 “재생에너지로서 목재이용”이라는 어젠다가 포함되었음에 주목할 필요가 있다.^[6] 이 같은 세계적 논의 가운데 산림자원을 활용한 바이오에너지는 주요 기후 기술로서 IPCC, EU-Taxonomy, K-ESG 가이드라인 등 다양한 분류체계에 그 중요성이 반영되어 있다.^[7~12]

재생에너지 중 바이오에너지가 60% 이상을 차지하는 EU는^[13] 산림부산물 활용 에너지 체계에 지속적인 인센티브를 부여함으로써 EU 총 에너지소비 중 에너지공급산업 부문의 바이오연료 비중을 2019년 1,584 TWh(8.06%)에서 2050년 3,580 TWh(22.24%)로 대폭 확대할 계획이다.^[14~19] 산림자원을 활용한 재생에너지는 목재펠릿으로 대표되는데, 미국 농무부(United States Department of Agriculture, USDA)에 따르면,^[20] 전세계 목재펠릿 수요량의 약 75%가 EU에 집중된 것으로 추산했고(2020년 기준 약 30.4백만 톤), 이 중 미국산 목재펠릿의 對 유럽 수출량은 7.1백만 톤(무역가치 13.8억 달러)으로 집계되었다. 국제 수준에서 미래 수요를 예측한 Future Metrics에 따르면,^[21] 2027년까지 난방용 목재펠릿은 26백만 톤, 에너지(전력 등) 생산을 위한 소비량은 27백만 톤에서 최대 40백만 톤으로 추산되어 합계 최대 66백만 톤이 세계적으로 이용될 것으로 내다봤다. 기후위기 대응 수단이자 청정전력 생산을 위한 수요 폭이 크게 증가할 것임은 명확하다. 우리나라의 경우, 「제3차 에너지기본계획(2019~2040)」에서 최종에너지소비 중 전력 비중이 2017년 24.8%에서 2040년 29.3%로 확대될 것인바, 향후 청정전력 중심 사회로의 경로에서 산림바이오매스에너지 수요가 증가할 것임은 합리적으로 유추할 수 있다.

특히 산업계 수요층에서는 실현 가능성 있는 산림바이오매스 공급량에 대한 요구가 증가하고 있으나, 이를 뒷받침 할만한 국가 수준의 중장기 수요공급량 분석연구는 부족한 실정이다. 동시에 산림바이오매스에너지에 대한 일각의 우려도 존재한다. 이에 따라 본 연구에서는 에너지원으로서 산림자원 활용도를 국가 단위로 비교분석하고, 중장기 수요공급량을 추정함으로써 온실가스 감축 효과에 대한 분석을 수행했다. 이로써 주요국 대비 우리나라의 산림자원 이용수준을 평가하고, 미이용 산림바이오매스를 활용한 목재

펠릿 중심의 지속가능한 수요공급 변화를 정량화하여 그 효과를 분석 및 평가하고자 한다.

2. 연구방법론

2.1 주요국 산림바이오매스 활용도 분석

국가별 산림바이오매스 에너지 활용도를 비교하고자 주요 4개국(영국, 독일, 핀란드, 일본)을 선정했다. 인구수 데이터는 UN의 인구통계자료를 활용하고 산림면적, 국토면적대비 산림비율, 목재수확량(Timber harvest volume), 벌채량 대비 연료용 목재 비율, 총 입목축적량(Total forest growing stock), ha당 입목축적량, 에너지용 목재 총소비량, 원목 소비량 등은 UN ECE(United Nations Economic Commission for Europe)와 UN FAO(Food and Agriculture Organization of the United Nations)의 자료를 활용했다. 그리고 목재펠릿 소비량과 생산량은 미국 농무부와 핀란드 자연자원기구, 산림청 입업통계연보, 일본 재무성 등의 자료를 활용했다. 고품 바이오연료를 활용한 전력생산량과 열 생산량은 IEA 자료를 활용했다.

2.2 중장기 국내 목재펠릿 수요-공급량 추정

미래 수요량 추정을 위해 제9차 전력수급기본계획에 기반하되(중기), 2034년 이후는 선형값을 반영하여(장기) 미래 변화를 예상했다. 한국에너지공단의 연차별 신재생에너지 생산량을 살펴보면,^[22] 바이오에너지 중 목재펠릿 비율이 최근 5년(2015-2019) 평균 47.5%였으며, 2019년 목재펠릿 발전량이 4,959,229 MWh로 집계되었는바, 이를 바탕으로 발전효율과 투입 열에너지 변환 등을 반영하면 목재펠릿 1톤당 1.61 MWh(발전효율 35%)~1.75 MWh(발전효율 38%)로 산출되었다. 또한 목재펠릿의 1톤당 열량은 16.5 MJ/kg을 반영(고시 기준)했으며, 이를 바탕으로 목표전력소비량 대비 총 목재펠릿의 발전비율(발전량) 변화를 추정했다. 산림바이오매스를 에너지원으로 활용하는 형태는 목재펠릿과 목재칩이 있으나, 본 연구에서는 산업적으로 체계화된 목재펠릿을 중심으로 분석했다.

미래 공급량 추정을 위해 국립산림과학원의 산림탄소모

텔을 바탕으로 지상부 바이오매스 측정 및 바이오매스 확장계수 등 다양한 요소를 종합 반영했다. 이 과정에서 총 잠재량을 무게변환($m^3 \rightarrow$ 톤)하기 위한 별도의 전환계수를 적용했다. 과다 추정을 방지하기 위해 선행연구를^[23] 참조해 2050년 목표수집률에 70% 한계치를 적용했으며, 2020년 미이용 산림바이오매스 실제 증명량을 감안, 시작 시점의 수집 비율은 11%를 반영했다. 목재펠릿 제조시설의 연차별 설비 및 투자의향을 반영하여 시나리오별 접근 전략을 세분화하고자 2050년 목표수집률을 70%로 설정하되, 중간목표 수집률을 CASE 1에서 2030년 50%로 설정했고, CASE 2는 연평균 2%씩 증가하는 것으로 설정했다.

2.3 산림바이오매스의 화석연료 대체효과 분석

우리나라에서 에너지 분야는 「국가 온실가스 인벤토리 보고서」에서 Tier 2 수준으로 산정하고 있으며, 24개 연료에 대해 국가고유 배출계수를 적용하고 있으므로, 이를 참고하여 산출했다. 산림바이오매스의 화석연료 대체효과는 ‘온실가스(또는 이산화탄소 또는 탄소) 배출계수’와 ‘순발열량’을 이용하여 화석연료가 산림바이오매스 1 kg과 동일한 에너지를 발생시킬 때 배출되는 이산화탄소(CO_2)량을 계산해야 한다. 이 과정에서 산림바이오매스를 원료로 한 연료는 형상에 따라 목재펠릿(함수율 10%, 순발열량 16.5 MJ/kg)과 목재칩(함수율 25%, 13.3 MJ/kg)으로 구분하여 화석연료 대체효과를 산정했다. 비교분석을 위해 환경부의 「온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침」에 따라 「2006 IPCC 국가 인벤토리 가이드라인 연료별 기본발열량」을 기준으로 ‘고체 바이오연료’ 중 ‘목재/목재 폐기물’은 ‘에너지용으로 직접 연소되는 목재 및 목재 폐기물(목재 칩·펠릿·브리켓)이 포함’이라는 점을 감안, 목재/목재폐기물의 순발열량은 15.6 MJ/kg으로 적용했다.

유연탄과 목재펠릿에 대한 동일열량당 배출량 산출을 위해서는 「대기환경보전법 시행규칙(환경부령 제904호, 2021. 2. 5., 일부개정), 배출시설의 시간당 대기오염물질 발생량 산정방법(제43조 관련)」 [별표 10]과 「배출시설의 대기오염물질 배출계수 고시 적용(국립환경과학원고시 제2020-29호, 2020. 8. 31., 일부개정) [별표 3] 기타연료의 대기오염물질 배출계수」를 적용하고, 발열량 산출을 위해 연구 당시 기준인 「에너지법 시행규칙(2019)」에 따른 에너지열량

환산기준 및 각 품목별 국내 품질기준을 적용하여 산출했다.

온실가스 감축 기여도를 측정하기 위해서는 IPCC 2006 가이드라인 기준에 따라 CH_4 , N_2O 등 온실가스 발생 요소를 고려할 때, 목재펠릿 1톤으로 유연탄 0.62 톤을 대체하고, 이로써 CO_2 1.42 톤을 감축한다는 산출식을 적용했다. 이후 (1) NDC(Nationally Determined Contributions) 로드맵 수정안(2018년 대비 26.3% 감축, 목표배출량 536.1백만 톤 CO_2eq)에 적용, (2) 최근 마련된 NDC 상향안(2018년 대비 40% 감축, 목표배출량 436.6백만 톤 CO_2eq) 대비 기여도를 각각 추산했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 국가별 산림바이오매스에너지 활용도 비교

국토면적 대비 산림 비율의 경우 우리나라는 핀란드(73.7%), 일본(67.2%) 대비 약간 낮은 63.4%였으며, 영국(13.2%), 독일(32.7%) 대비 높았다. 목재수확량은 비교대상국 중 한국이 가장 낮은 5,457천 m^3 이었으며, 상대적으로 산림비율이 낮은 독일이 76,167천 m^3 이었다. 1인당 산림면적을 살펴보면 핀란드가 가장 높은 4.04 ha였으며, 독일과 일본 한국은 큰 차이가 없었다. 1인당 임목축적량을 상대 비교해보면 핀란드 441.97 m^3 로 가장 높았고, 독일 43.72 m^3 , 일본 33.2 m^3 , 한국 19.62 m^3 로 조사되었다. 1인당 원목 소비량을 상대 비교하면 핀란드가 가장 높은 10,978 m^3 로 조사되었으며, 그 뒤로 일본(652 m^3), 독일(622 m^3)로 조사되었다. 영국은(135 m^3) 한국(131 m^3)과 비슷하다. 1인당 제재목(Lumber) 소비량을 살펴보면 핀란드가 가장 높은 544 m^3 이며, 독일 241 m^3 , 일본 203 m^3 , 영국 151 m^3 로 조사되었고 한국은 가장 낮은 61 m^3 이다. 1인당 목재수확량의 경우 핀란드가 11.54 m^3 , 독일이 0.9 m^3 , 일본이 0.23 m^3 , 영국이 0.15 m^3 였으나, 한국은 0.1 m^3 였다.

1인당 에너지용 목재소비량의 경우 핀란드가 가장 높은 7,488 m^3 이며, 독일 712 m^3 , 영국 496 m^3 , 일본 71 m^3 이다. 한국은 3 m^3 로 에너지용 목재소비량이 사실상 없는 수준으로 나타났다. 벌채량 대비 연료용 목재 비율을 살펴

보면 독일이 29.86%로 가장 높았고, 영국이 22.99%, 일본이 20.68%, 핀란드가 12.53%였다. 한국은 가장 낮은 2.87%로 조사되었다. 목재펠릿 소비량의 경우 영국이 연간 9,400천 톤으로 가장 높았으며, 한국이 3,257천 톤, 일본이 2,027천 톤으로 조사되었고, 독일은 2,330천 톤이다. 전체 전력생산량 중 고품 바이오연료 비율이 가장 높은 국가는 핀란드(17.39%)이고, 영국은 7.92%, 일본은 1.74%, 독일은 1.70%이며, 한국은 1.18%이었다. 전체 열 생산량 중 고품 바이오연료 비율이 가장 높은 국가는 핀란드(39.06%)이며, 영국(5.98%)과 독일(5.40%)은 상대적으로 낮으며, 한국은 2.37% 수준이다(일본의 경우 관련 통계 부재로 반영하지 않음)(Table 1 참조). 분석 결과, 비교 대상 주요국 대비

우리나라는 산림자원 활용도가 극히 낮은 수준인바, 탈탄소사회 조성을 위해 산림바이오매스에너지의 역할론 제고를 위한 인프라 구축,^[24] 산림사업 순환체계의 고도화가 요구된다.

3.2 우리나라 목재펠릿 수요 변화량 추정

「제9차 전력수급기본계획(2019-2034)」은 바이오에너지 발전량이 지속 증가하여 2034년 14,305 GWh 수준으로 내다봤다.^[25] 2034년 이후 선형값을 추정한 결과, 2050년까지 16,064 GWh로 수준에 달할 것으로 추정되었다. 여기에 제2장에서 언급한 연구 방법을 적용한 결과 현재 발전 기술 수준(효율 35%)에서 2030년 3,941천 톤의 목재펠릿

Table 1. Comparison of forest biomass utilization by country

Category ^[26]	Year	UK	DE	FI	JP ^[27]	KR ^[28]
Forest area (thous. ha)	2020	3,190	11,419	22,409	(‘18) 25,048	(‘19) 6,299
Forest area as a proportion of total land area (%)		(13.2)	(32.7)	(73.7)	(67.2)	(63.4)
Wood removals (thous. m ³ /year)	2019	10,781	76,167	63,963	(‘18) 30,201	(‘20) 5,457
Share of wood fuel in the amount of wood removals (%)		(22.99)	(29.86)	(12.53)	(20.68)	(2.87)
Forest area per capita (ha/person)	2020	0.05	0.14	4.04	(‘15) 0.19	(‘15) 0.12
Forest growing stock per capita (m ³ /person)	2020	9.97	43.72	441.97	(‘15) 33.20	(‘15) 19.62
Industrial roundwood consumption per capita (thous. m ³ under bark per 1000 population)*	2019	135	622	10,978	(‘18) 652	(‘20) 131
Sawnwood consumption per capita (m ³ per 1000 population)	2019	151	241	544	(‘18) 203	(‘20) 61
Amount of wood removals per person (m ³ /person)	2020	0.15	0.90	11.54	0.23	0.10
Consumption of wood energy (1,000 m ³)**	2017	33,681	59,683	41,492	(‘18) 9,020 (Import 2,772) *Residues: 230	(‘20) 155 (For Biomass) *Residues: 398
Wood for energy consumption per capita (m ³)	2017	496	712	7,488	(‘18) 71	(‘20) 3
Wood pellets consumption (1,000 Ton) ^[20]	2020	9,400	2,330	(‘19) 36 ^[29]	2,027 ^[30]	3,257 ^[31]
Wood pellets production (1,000 Ton) ^[20]	2020	(‘18) 258 ^[32]	3,100	(‘18) 385 ^[32]	(‘19) 147	331 ^[31]
Electricity production using solid biofuel (GWh) ^[33]	2019	25,634	10,484	11,950	17,429	6,879
Percentage of solid biofuels in total electricity production (%)	2019	7.92	1.70	17.39	1.74	1.18
Heat production using solid biofuel (TJ) ^[33]	2019	3,970	24,417	71,950	n/a	5,397
Percentage of solid biofuels in total heat production (%)	2019	5.98	5.40	39.06	n/a	2.37

Note. (UK) United Kingdom, (DE) Germany, (FI) Finland, (JP) Japan, (KR) South Korea

Sources: ^[26-33]

* (UN ECE) The amount (i.e. domestic production plus imports, minus exports) of unprocessed wood (logs) consumed by manufacturing industries, to make processed products such as construction timber, wood pulp, plywood, furniture, wooden fencing. It is an indication of the size of the domestic wood-processing industry.^[26]

** (UN ECE) The amount of wood that is used for energy, which is often used directly as heat but may include wood to make electricity. In some rural regions, wood may be the primary source of heating and cooking.^[26]

Table 2. Estimation of changes in wood pellet demand based on the '9th Basic Plan for Electricity Supply and Demand'

Category	2020		2030		2050	
Power consumption target (GWh)	509,840		542,307		610,524	
Total renewable energy generation (GWh)	43,048		125,778		298,358	
Bio-energy power generation (GWh)	12,095		13,339		16,064	
Wood pellet power generation (GWh)	5,745		6,336		7,631	
Total wood pellet power generation ratio to target power consumption (%)	1.13		1.17		1.25	
Total wood pellet requirements by power generation efficiency (1,000 Ton)	35%	38%	35%	38%	35%	38%
	3,573	3,291	3,941	3,630	4,746	4,371

수요량이 존재할 것이며, 2050년 기준 4,746천 톤의 수요가 예상되었다.

발전효율 개선(35%→38%) 시 2030년 3,630천 톤의 수요와 2050년 4,371천 톤의 수요가 예상되었다. 이로써 목표 전력소비량 대비 총 목재펠릿의 발전비율(발전량)은 2020년 1.13%(5,745 GWh)에서 2030년 1.17%(6,336 GWh), 2050년 1.25%(7,631 GWh)로 추정되어 꾸준한 수요 폭이 존재했다(Table 2 참조).

3.3 국내 미이용 산림바이오매스 잠재량과 국산 목재펠릿 공급변화량 추정

국내에 잠재된 미이용 산림바이오매스 원재료 수량(연간 발생량)은 2030년 5,670천 톤, 2050년 6,877천 톤으로 산출되었다. 도전적 목표에 해당하는 CASE 1은 2030년 수집 가능한 미이용 산림바이오매스 원재료 2,835천 톤(펠릿 전환 시 1,985천 톤)으로 산출되었고, CASE 2는 2030년 수집 가능한 미이용 산림바이오매스 원재료 1,701천 톤(펠릿 전환 시 1,191천 톤)으로 산출되었다. 2050년은 수집 목표율 70%에 동일하게 수렴되는바, 미이용 산림바이

Table 3. The trend of unused forest biomass potential volume as raw material and wood pellet productive volume annually

Category (1,000 Ton, yearly)	2020	2030	2050
Total potential volume	4,543	5,670	6,877
Collectable volume	CASE 1	498	2,835
	CASE 2		1,701
Wood pelletization available volume	CASE 1	349	1,985
	CASE 2		1,191
			4,814
			3,370

오매스 총 잠재량은 6,877천 톤, 수집가능량 4,814천 톤, 펠릿 생산가능량 3,370천 톤으로 추산되었다.

특히 연간 생산 가능한 목재펠릿의 수량은 매년 발생하여 누적되는 미이용 산림바이오매스 잠재량 이하로 유지되는바, 충분히 지속가능한 수준으로 산업의 안정적 확장이 가능함을 함의한다(Table 3 참조). 다만 이 값은 향후 미이용 산림바이오매스 범주 조정 및 수집 인프라 구축 정도에 따라 가변적이다. 이 같은 분석값을 바탕으로 앞서 살펴본 미이용 산림바이오매스 활용 목재펠릿의 국산화율을 살펴보면, 2030년 최소 30%에서 최대 50%였으며, 2050년에는 71% 수준에 달할 것으로 추산되어 지속가능한 국산 재생에너지로서 역할이 확인되었다.

본 연구결과 값을 선행연구와 비교할 필요가 있는바, Yun, *et al.* (2022)의 미이용 산림바이오매스 원재료 공급 잠재량에 관한 연구에 따르면,^[34] 생산 및 수집 가능한 잠재자원량을 470만 톤/연간으로 추정하였는바, 본 연구의 2020년(454만 톤)과 유사하며, 2050년(687만 톤) 대비 다소 적은 수량이나, 이는 잠재자원량의 추정방법 차이에 따른 것이다. 또한, 국내 목재펠릿 공급가능량을 언급한 Kim and Lee(2018)는 2030년 기준 423만 톤/연간으로 추정했는데,^[35] 본 연구의 2030년(198만 톤/연간) 및 2050년(337만 톤/연간) 대비 다소 도전적 수치로 볼 수 있는데, 이는 이용 가능한 원재료 범주의 일부 차이에서 기인한다. 물론 본 연구가 산림바이오매스 중 목재펠릿에만 국한하여 향후 수요를 유추했다는 일부 지적이 있을 수 있다. 하지만 산림바이오매스를 활용한 에너지가 안정적 전력공급에 기여하는 기저 재생에너지원으로서 역할이 가능함을 중장기적 시각에서 정립했다는 점에 더 큰 의의가 있다. 본 연구에서 도출된 중장기 수요-공급량 예측이 속도감 있게 구현

되기 위해 현행 6중에 불과한 미이용 산림바이오매스 원재료 범주가 (1) 부처협의를 바탕으로 목질계 영농부산물에 추가될 필요가 있으며, (2) 각종 재해요소를 사전 예방하기 위해 지역 산림에 익숙한 지방자치단체의 장이나 지방산림청장의 판단에 따라 인정된 산물로 확대 개편되어야 한다. 아울러 국내 산림 현실을 감안한 ‘가치단계적 이용원칙(Cascading Principle, 부가가치가 높은 순서대로 활용)’을 권장하되, RPS 체계상 기구축된 벨류체인 투자 활성화를 위한 정책 수단 강화도 요구된다.

3.4 산림바이오매스의 화석연료 대체효과와 국가 온실가스 감축목표 기여도

국립산림과학원의 품질기준 고시를 기반으로 순발열량을 적용했을 때 목재펠릿 및 목재칩 1 kg은 각각 연료용 유연탄 0.7 kg, 0.56 kg을 대체할 수 있고, CO₂ 배출을 각각 1.57 kgCO₂, 1.27 kgCO₂ 줄이는 것으로 나타났다. 2006 IPCC 국가 인벤토리 가이드라인 연료별 기본발열량 적용했을 때는 목재펠릿 및 목재칩 1 kg은 연료용 유연탄 0.66 kg을 대체하고 CO₂ 배출은 1.48 kgCO₂ 저감할 수 있는 것으로 도출되었다. 이로써 목재펠릿 1 kg 활용 시 연료용 유연탄 0.66~0.7 kg 대체를 통해 CO₂ 배출은 1.48~1.57 kgCO₂를 저감할 수 있으며, 목재칩 1 kg 활용 시 연료용 유연탄 0.56~0.66 kg 대체로 CO₂ 배출은 1.27~1.48 kgCO₂를 저감할 수 있는 것으로 산출되었다. 동일열량당 배출량은 유연탄이 11.83 kg/Gcal, 목재펠릿이 0.85 kg/Gcal로 산출되어 현행법 및 제도 내에서 목재펠릿의 청정성과 화석연료 대체재로서 역할이 유효함을 도출했다.

이를 Table 3에서 산출된 사례별 목재펠릿 생산가능량에 적용하면, (CASE 1) 2030년 펠릿 1,985천 톤으로 유연탄 1,230천 톤을 대체하여 2.818 백만 톤 CO₂eq 감축 가능했으며, (CASE 2) 2030년 펠릿 1,191천 톤으로 유연탄 738천 톤을 대체하여 1.691백만 톤 CO₂eq 감축 가능한 것으로 산출되었다.

국내 목재펠릿 가용량을 전부 사용하였을 때(2050년 국산화율 71% 수준일 때), 펠릿 3,370천 톤으로 유연탄 2,089천 톤을 대체하여 4.785백만 tCO₂eq를 감축할 수 있는 것으로 도출되었다. 이 값을 국가 NDC(Nationally determined contributions) 로드맵 수정안(2018년 대비 26.3% 감축,

목표배출량 536.1백만 톤 CO₂eq)에 적용하면 0.54~0.89% 기여도를 보이며, 최근 마련된 NDC 상향안(2018년 대비 40% 감축, 목표배출량 436.6백만 톤 CO₂eq)에 적용하면 0.38~0.64% 기여율을 나타냈다.^[36]

이렇게 도출된 산림바이오매스에너지의 화석연료 대체재로서 역할론을 더욱 강화하기 위해 전과정평가(LCA, Life Cycle Assessment)가 필요하며, 국가 고유 순발열량 기준에 목질계가 적절히 반영됨으로써 국가 온실가스 감축 정책에 일조할 필요가 있다. 특히 우리나라 산림부산물 활용체계가 국제 시류보다 앞선 것으로 평가되는바,^[37] 이는 에너지 자립과 에너지 안보에 직간접적으로 연결될 수 있을 것이다. 이 부분에 대해서는 최근 IEA가 EU에 러시아산 천연가스 의존도를 줄이는 방안으로 바이오에너지 활용을 권고했다는 점도 참조할 필요가 있다.^[38]

4. 결론

본 연구를 통해 국가별 산림바이오매스에너지 활용도를 비교한 결과 우리나라는 에너지용도로 산림자원 활용성이 극히 미미한 수준임을 확인했으며, 1인당 목재수확량도 비교대상국 중 가장 낮은 수준이므로 탈탄소 사회 조성을 위해 역할론 제고가 필요함을 도출했다. 국내 목재펠릿 제조가능량은 미이용 산림바이오매스를 중심으로 2050년까지 총 잠재량 6,877천 톤, 수집가능량 4,814천 톤, 목재펠릿 생산가능량 3,370천 톤으로 추산되었다. 제9차 전력수급 기본계획을 반영하여 중장기 수요량 예측 결과, 발전효율 개선(35%→38%)을 전제로 2030년 3,630천 톤, 2050년 4,371천 톤의 총 목재펠릿 수요가 존재할 것으로 추산되었고, 목표전력소비량 대비 총 목재펠릿의 발전비율(발전량)은 2020년 1.13%(5,745 GWh)에서 2030년 1.17%(6,336 GWh), 2050년 1.25%(7,631 GWh)로 산출되었다. 지속가능한 공급 측면에서 국내 목재펠릿 가용량을 전부 사용하였을 때(2050년 국산화율 71% 수준일 때), 국가 NDC 기여율이 최대 0.64%로 분석되었다. 아울러 목재펠릿 1 kg 활용으로 연료용 유연탄 0.66~0.7 kg 대체로 CO₂ 배출은 1.48~1.57 kgCO₂를 저감 가능하고, 목재칩 1 kg 활용으로 연료용 유연탄 0.56~0.66 kg 대체로 CO₂ 배출은 1.27~

1.48 kgCO₂ 저감 가능한 것으로 도출되었다. 법령 기준에 따른 대기오염물질 배출량의 경우, 동일열량으로 환산 시 유연탄이 11.83 kg/Gcal, 목재펠릿이 0.85 kg/Gcal로 산출되었다. 산림바이오매스에너지의 활용은 국가단위 산림의 건강하고 탄력적인 산림순환경제 구축을 돕고, 산림전용(Deforestation)을 방지하면서, 목재산업 활성화와 에너지 안보, 지역경제 활력을 동시에 실현하는 데 도움을 준다. 따라서 우리나라는 미이용 산림바이오매스를 중심으로 산림과학 및 정책을 아우르는 도전적 이니셔티브 구축으로 전략적 자원화를 속도감 있게 추진해야 할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 산림청 정책연구 ‘산림바이오매스 활성화 세부 실시계획 수립을 위한 연구’와 2022년도 국립산림과학원 연구사업(FP0700-2022-01-2022)에 의해 이루어진 것입니다.

References

- [1] UN (United Nation), 2017, “United Nations strategic plan for forests 2030”, Accessed 1 Feb 2022, <https://www.un.org/esa/forests/documents/un-strategic-plan-for-forests-2030/index.html>.
- [2] IEA (International Energy Agency), 2021, “IEA bioenergy annual report 2020”, Accessed 21 Feb 2022, <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/new-publication-iea-bioenergy-annual-report-2020/>.
- [3] IRENA (International Renewable Energy Agency), 2020, “A report for the G20 energy sustainability working group”, Abu Dhabi.
- [4] IRENA, 2020, “Energy subsidies: Evolution in the global energy transformation to 2050”, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Apr/IRENA_Energy_subsidies_2020.pdf.
- [5] IRENA, 2019, “Solid biomass supply for heat and power: Technology brief”, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Jan/IRENA_Solid_biomass_supply_2019.pdf.
- [6] Korea Forest Service, 2022, “The seoul forest declaration”, Accessed 26 May 2022, https://www.forest.go.kr/kfsweb/cop/bbs/selectBoardArticle.do?bbsId=BBSMSTR_1036&mn=NKFS_04_02_01&nttId=3170456.
- [7] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007, “IPCC fourth assessment report: Climate change 2007”, Geneva.
- [8] EC (European Commission), 2021, “Commission staff working document (Impact assessment report)”, SWD (2021) 152 final, Brussels.
- [9] Green Technology Center, 2016, “A study on the classification of climate technology”, <https://doi.org/10.23000/TRKO201700001822>.
- [10] Ministry of Trade and Industry, 2019, “Common operating guidelines for industrial technology innovation projects”, Amended by Public Notification Ministry of Trade Industry and Energy 2020-232, <https://www.law.go.kr/LSW/admRulBylInfoP.do?admFlag=1&directYn=Y&bylSeq=2009392&admRulSeq=2100000181331>.
- [11] Ministry of Science and ICT, 2018, “National science and technology standard classification system”, Amended by Public Notification Ministry of Science and ICT 2018-10, <https://www.law.go.kr/LSW/admRulInfoP.do?admRulSeq=2100000112870>.
- [12] Ministry of Trade Industry and Energy, 2021, “K-ESG guideline”, Accessed 5 January 2022, http://www.motie.go.kr/motie/gov3.0/gov_openinfo/sajun/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=631&bbs_cd_n=30.
- [13] EC, 2022, “REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition”, Accessed 26 May, 2021, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_3131.
- [14] EC, 2013, “Communication on ‘a new EU forest strategy: for forests and the forest-based sector’”, Accessed 8 August 2021, <https://www.europeansources.info/record/communication-a-new-eu-forest-strategy-for-forests-and-the-forest-based-sector/>.
- [15] EC, 2021, “New EU forest strategy for 2030”, COM (2021) 572 final, Accessed 15 August 2021, <https://www.europeansources.info/record/new-eu-forest-strat>

- egy-for-2030/.
- [16] EC, 2018, “Staff working document SWD /2015/164: Multi-annual implementation plan of the new EU forest strategy”, Accessed 20 August 2021, https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/commission-staff-working-document-swd2015164-multi-annual-implementation-plan-new-eu_en.
- [17] EC, 2021, “Final commission staff working document communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions new EU forest strategy for 2030”, SWD (2021) 652, Brussels.
- [18] EU, 2021, “Establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 (‘European Climate Law’)”, Luxembourg.
- [19] EC, 2020, “Biodiversity strategy for 2030”, Accessed 13 Feb 2022, https://ec.europa.eu/environment/strategy/biodiversity-strategy-2030_en#the-business-case-for-biodiversity.
- [20] USDA (United States Department of Agriculture), 2021, “Biofuels annual”, Washington D.C.
- [21] Canadian Biomass, “2021 global wood pellet markets outlook”, 2021.2.16., Accessed 2 Feb 2022, <https://www.canadianbiomassmagazine.ca/2021-global-wood-pellet-markets-outlook/>.
- [22] Korea Energy Agency, 2021, “2020 Renewable energy white paper”, Ulsan.
- [23] Titus, B.D., Brown, K., Helmisaari, H.S., Vanguelova, E., Stupak, I., Evans, A., Clarke, N., Guidi, C., Brckman, V.J., and Varnagiryte-Kabasinskiene, I., *et al.*, 2021, “Sustainable forest biomass: a review of current residue harvesting guidelines”, *Energy Sustain Soc*, **11**(10), 1-32.
- [24] Korea Forest Service, “Forest road density in major countries”, Accessed 17 May 2022, https://www.forest.go.kr/kfswb/kfi/kfs/cms/cmsView.do?mn=NKFS_02_01_05_01&cmsId=FC_000812.
- [25] Ministry of Trade Industry and Energy, 2020, “9th Basic plan for electricity supply and demand”, Sejong.
- [26] UN ECE (United Nations Economic Commission for Europe), 2021, “The UNECE/FAO forestry and timber section (INForest), Accessed 30 June 2021, <https://forest-data.unece.org/>.
- [27] Japan Forestry Agency, 2021, “Annual report on forest and forestry in Japan (2018-2020)”, Tokyo.
- [28] Korea Forest Services, 2021, “Forestry Statistical Yearbook”, Accessed 17 May 2022, <https://kfss.forest.go.kr/stat/ptl/fyb/frstyYrBookList.do?curMenu=9854>.
- [29] Natural Resources Institute Finland, 2020, “Production of wood pellets decreased and imports increased in 2019”, Accessed 5 May 2021, <https://www.epressi.com/tiedotteet/tiede-ja-tutkimus/production-of-wood-pellets-decreased-and-imports-increased-in-2019.html>.
- [30] Ministry of Finance Japan, Quoted in Argus media, 2021, “Japan’s biomass imports jump in 2020”, Accessed 3 March 2021, <https://www.argusmedia.com/en/news/2182947-japans-biomass-imports-jump-in-2020>.
- [31] Korea Forest Biomass Energy Association, 2021, Accessed 7 May 2021, <http://www.biomassenergy.kr/>.
- [32] Bioenergy Europe, 2020, “Bioenergy Europe statistical report 2019”, Accessed 10 May 2021, <https://epc.bioenergyeurope.org/bioenergy-europe-pellet-report-2019/>.
- [33] IEA, 2021, “Fuels & technologies”, Accessed 15 May 2021, <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/renewables>.
- [34] Yoon, S.H., Choi, S.M., Park, S.M., Lee, and J.W., 2022, “Estimation of Korea’s unused forest biomass potential resources”, *Proc. 2022 Forest Science Joint Conference*, Korea Society of Forest Science, Accessed 27 May 2022, <http://www.tkfea.or.kr/re/board.do?menuIdx=99&bbsIdx=1148>.
- [35] Kim, S.S., and Lee, B.H., 2018, “Estimation of the production potential of domestic wood pellets using unused forest biomass by analyzing the potential volume of forest biomass and the growth of forest trees”, *Journal of the Korean Applied Science and Technology*, **35**(1), 247-253.
- [36] Ministry of Foreign Affairs, 2021, “The Republic of Korea’s enhanced update of its first nationally determined contribution”, <file:///C:/Users/KSNRE/Downloads/The%20Republic%20of%20Korea%E2%80%99s%20Enhanced%20Update%20of%20its%20First%20Nationally%20Determined%20Contributionits.pdf>.

- [37] 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.
- [38] IEA, 2022, “A 10-Point plan to reduce the European

Union’s reliance on Russian natural gas”, Accessed 14 April 2022, <https://www.iea.org/reports/a-10-point-plan-to-reduce-the-european-unions-reliance-on-russian-natural-gas>.