

산림바이오매스의 지역 에너지 이용의 경제성 분석

민경택^{ID*} · 안현진^{ID} · 변승연^{ID}

한국농촌경제연구원 산림정책연구부

Economic Feasibility of Using Forest Biomass as a Local Energy Source

Kyungtaek Min^{ID*}, Hyunjin An^{ID} and Seungyeon Byun^{ID}

¹Department of Forest Policy Research, Korea Rural Economic Institute, Naju 58217, Korea

요약: 이 연구의 목적은 산림바이오매스를 이용한 에너지 시설의 경제적 타당성을 검토한 것이다. 산림청 산림에너지자립마을 사업의 자료를 이용하여 에너지 시설의 운영 수지를 분석하였다. 에너지 시설은 열병합 발전기와 목재칩 보일러로 구성되며 목재칩을 연료로 사용한다. 목재칩은 목재펠릿보다 발열량이 낮지만 가격도 낮다. 시설 운영의 수입은 전기, 열, REC로 구성되며 추가로 화석연료 대체에 의한 탄소배출권을 고려하였다. 비용에는 연료비용과 고정비용이 포함되며, 초기 시설투자는 매몰비용으로 간주하였다. 가동률 55%, 목재칩 가격 95,000원/톤의 조건에서 에너지 시설의 연간 순수입은 양으로 나타났다. 시설 운영의 중요한 요소는 가동률과 연료비용이다. 두 요소를 조정하면서 시뮬레이션한 결과 가동률 50%, 목재칩 가격 100,000원/톤의 조건에서 연간순수입은 음으로 나타났다. 운영 수지를 개선하기 위해 가동률을 올리거나 연료 가격을 낮추는 노력이 필요하다. 탄소배출권을 판매한다면 시설 운영의 수익성을 개선한다. 또, 산림바이오매스의 에너지 이용을 촉진하기 위해 재생에너지로 공급한 열에 가격 보조를 할 필요가 있다.

Abstract: In this study, the economic feasibility of a local energy facility that uses forest biomass as an energy source was assessed. We analyzed profitability using data from the Forest Energy Self-sufficient Village Project financed by the Korea Forest Service. The energy facility has a cogeneration generator and wood chip boiler. Wood chip, which has lower heat value and is cheaper than wood pellets, is used as fuel. Revenue comes from the sale of electricity, heat, and renewable energy certificates. Additionally, we considered the sale of carbon credits as substitutes for fossil fuels. The expenditure consists of fuel costs and fixed costs, and the initial investment is treated as a sunk cost. Under the condition of a 55% operation rate and wood chip price of 95,000 KRW per ton, the annual net revenue is positive. Crucial factors for managing the facility sustainably are operation rate and fuel cost. A simulation in which two factors were changed showed that the annual net revenue is negative with a 50% operation rate and 100,000 KRW per ton of wood chip price. To improve net revenue, an increase in the operation rate or a decrease in the wood chip price is required. Additionally, selling carbon credits will make the operation of the facility more profitable. Furthermore, the payment required to procure wood chips could contribute to the rural economy. To foster the use of forest biomass for energy, the price for heat supplied from renewable energy sources should be subsidized.

Key words: economic feasibility, carbon neutral, cogeneration, forest biomass, local energy, thermal energy

서론

우리나라는 1970년대 대규모 조림을 시작하여 짧은 기

간에 산림녹화를 성공적으로 달성하였다. 임목축적은 10.4 m³/ha ('70)에서 165.1 m³/ha('20)으로 성장하였고, V영급(40~50년) 이상 산림 면적도 38.3%에 이른다(KFS, 2021). 산림자원은 성숙하였으나 임목의 경제 가치는 낮은데, 2020년 용재 생산액은 3,805억 원에 불과하다. 산림을 보전하여 환경자원으로 관리할 수도 있지만 임목이 노령화하면 생장이 정체하여 탄소흡수원 기능이 저하하고 병해충 대응력도 약해진다. 성숙한 임목을 수확하여 적절

* Corresponding author

E-mail: minkt@krei.re.kr

ORCID

Kyungtaek Min ^{ID} <https://orcid.org/0000-0003-2397-0782>

Hyunjin An ^{ID} <https://orcid.org/0000-0001-7697-5996>

Seungyeon Byun ^{ID} <https://orcid.org/0000-0003-3484-5899>

히 이용하면 탄소배출 물질·재료를 대체하는 효과도 있다. 따라서 산림자원을 적절히 이용하여 ‘심고-가꾸고-수확하고-이용하고-다시 심는’ 순환형 임업을 구축하는 것이 산림생태계의 건강성 유지와 기후변화 대응에서 중요하다. 순환형 임업 구축에서 중요한 것은 임목의 이용을 증진하는 것이다. 그러나 국산목재는 외국산 목재와 비교하여 품질과 가격 경쟁력이 낮고 고부가가치 목재제품으로 이용하는 것이 쉽지 않은 것도 현실이다. 게다가 목재생산 임업의 수익성이 매우 낮기 때문에 이를 실현하는 것은 사실 요원한 과제이다(Min, 2019).

물질 자원으로 이용하기 어려운 산림자원을 에너지로 이용하는 것은 하나의 대안이 된다. 산림관리에서 발생하는 임목 부산물 또는 적절한 수요처를 찾지 못한 임목을 농산촌 에너지로 이용하면 지역 순환형 임업의 실현과 나아가 저탄소 자원순환형 사회 구축에 기여할 수 있다. 또, 에너지 이용을 목적으로 한다면 우량재가 아니어도 되므로 활엽수림 이용과 천연경신을 적용하여 저비용 임업으로 전환하는 계기가 될 수 있다.

국내외 정책 여건도 산림바이오매스의 에너지 이용에 우호적이다. 석탄발전 감축, 원전의 안전성에 대한 우려, 온실가스 배출 감축의 필요 등 재생에너지 전환이 중요한 과제로 대두하였다. 정부의 『재생에너지 3020』은 재생에너지로 빠른 전환을 추구하는데, 그에 따라 농산촌의 재생에너지 정책도 많은 변화를 맞게 되었다. 또, 정부는 2020년 10월 『탄소중립 2050』을 선언하고, 같은해 12월 추진 전략을 발표하였다. 이 가운데 산업통상자원부의 ‘에너지 탄소중립 혁신 전략’, 환경부의 ‘자연·생태 기반 온실가스 감축·적용 전략’, 산림청의 ‘2050 탄소중립 산림부문 전략’, 환경부의 ‘지역사회 탄소중립 이행 및 지원 방안’ 등은 산림바이오매스의 지역 에너지 이용과 특히 관련성이 높다. 산림바이오매스의 에너지 이용이 환경과 에너지 문제에 기여하는 것으로 여겨지는 것은 이것이 ①재생가능 자원, ②화석연료 대체, ③저장 가능, ④풍부한 국내 부존량, ⑤탄소중립, ⑥농산촌 경제에 기여 등의 특징을 가지고 있기 때문이다.

그동안 산림바이오매스 에너지 이용은 목재펠릿의 산업화에 초점을 두었다. 2009년 녹색성장 정책 기조에 따라 숲가꾸기 산물을 수집해 목재펠릿으로 가공하여 시설원에 난방유류 20%와 농가주거용 에너지 7%를 대체하겠다고 하였다. 또, 2020년까지 숲가꾸기와 바이오순환림 조성 등을 통해 500만 톤(국내 100, 해외 400)의 목재펠릿을 공급하고 국내 신재생에너지 생산량의 12%를 공급한다는 계획을 발표하였다. 그러나 이러한 계획은 기대한 만큼의 성과를 내지는 못하였는데, 국산목재를 이용한 펠릿 제조에 높은 비용이 소요되기 때문이다. 한편, 신재생에너지

공급 의무화 제도(RPS, Renewable Portfolio Standard)에 힘입어 바이오매스 발전소는 꾸준히 확대되었다. 발전소는 기본 규모가 매우 크기 때문에 안정적이고 저렴한 연료의 대량 확보가 중요하다. 예를 들어 5,000 kW급 발전소의 목재칩 소비량은 연간 7만 톤에 이른다. 주별 수확의 미이용 바이오매스 발생량을 헥타르당 50톤으로 가정하면(KFS, 2018), 연간 1,400 ha의 벌채면적이 필요하다. 이처럼 대형 발전소에서 사용할 만큼 산림바이오매스를 대량 확보하는 것은 쉽지 않고 다른 목재산업과 원료 경합을 가져온다.

이러한 배경으로 산림바이오매스를 소규모 분산형 에너지로 이용하는 것을 검토할 필요가 있다. 산림바이오매스를 대형 발전소의 연료로 사용하는 것에는 ‘그린워싱’ 논란을 피하기 어렵지만 소규모 분산형 에너지로 이용하는 것에는 환경단체도 반대하지 않는다. 산림청은 미이용 산림자원화센터를 조성하여 미이용 산림바이오매스의 활용을 지원하고, ‘산림에너지자립마을’ 사업을 추진한다. 그러나 산림청은 기존에도 유사 사업(산림탄소순환마을)을 추진한 바 있으며, 막대한 예산의 투입에도 실패에 이른 경험이 있다. 기존 사업의 실패를 반복하지 않기 위하여 국내외 사례를 면밀히 분석할 필요가 있다.

산림바이오매스의 에너지 이용에 관한 연구는 가정용 보일러의 이용, 대형 열병합 발전 이용, 소규모 집단 에너지 이용으로 구분할 수 있다.

초기에는 가정용 보일러에서 산림바이오매스 이용을 연구하였다. KSOPF(2003)는 가정 난방용 칩보일러의 경제성을 분석하고 보급 전략을 제안하였다. 소경재를 활용하는 목재칩 보일러를 우선 보급하면서 펠릿과 검용 또는 호환하는 보일러 공급을 제안하였다. 또, 연료 비용에서 높은 비중을 차지하는 임목 반출비 절감을 위해 이를 산림 조합이 맡고 목재칩 공급의 중심기지로 활용할 것을 제안하였다. Seok et al.(2005)은 농산촌 가정용 보일러에서 단위 열량의 비용을 비교하면 목재칩 보일러가 연탄 보일러보다 높지만 등유 보일러보다 비용면에서 효율적이라 하였다.

산림바이오매스를 대형 열병합 발전에 이용하는 사례의 연구도 있다. Lee(2005)는 바이오매스를 지역난방 에너지 생산에 활용하는 데 기술적·경제적 타당성을 분석하였다. 하루 300톤의 임목폐기물 목재칩을 활용하는 지역난방 온수보일러 시스템을 수도권에 건설하는 경우, 투자 비용은 1 MW당 5.35억 원, 운전비용은 250일 가동 기준 18,285원/Gcal으로 산출하였다. MCIE(2007)은 목재칩 열병합발전의 경제성을 분석하였는데, 목재칩 가격 30,565~56,124원/m³에서 열병합발전이 경제성 없음을 밝히고 경제성 확보를 위해 발전차액지원이 필요하다고 하였다. Suh et al.

(2012)는 대형 목재칩 열병합발전(전기 3.0 MW, 열 14.5 Gcal/h)의 운영 사례를 분석하였는데, 연간 가동률 62%, 이용률 49%, 목재칩 가격 평균 55,153원/톤, 전기 판매가격 138.2원/kWh, 열 판매가격 80,830원/Gcal으로 산정하고, 이 조건에서 20년 운영할 경우 내부수익률은 6.34%, 투자회수기간은 약 15년으로 평가하였다. 목재칩 가격이 64,000원/톤 이하일 때 경제성을 확보할 수 있으며, 발전량 기준으로 연간 이용률은 최소 46.9% 이상이어야 한다고 평가하였다. 또, 안정된 열 수요처를 확보하지 못하면 경제성을 확보하기 어렵다고 지적하였다. 이 경우 연간 목재칩 소비량은 45,000톤에 이른다.

최근에는 산림바이오매스의 소규모 지역난방 이용에 주목한 연구가 있다. Kangwon Univ.(2009)는 ‘산림탄소순환마을’ 조성의 사전 타당성을 연구하였다. 산림바이오매스의 생산과 이용, 마을주민의 참여 의사, 다른 사업과 연계, 파급효과 등을 고려하여 후보지를 제시하였다. 그러나 실제 사업을 추진한 산림탄소순환마을(봉화군, 화천군)의 성과는 기대에 미치지 못하였다. Cho(2018)는 화천군 산림바이오매스센터의 운영 현황을 조사하였는데 필요한 연료량보다 2.3배 많이 사용하며 참여가구도 크게 줄었다고 보고하였다. 또, 운영 수익을 보면 적자가 누적되므로 연료비용을 절감하거나 에너지 이용률을 높이는 방안이 필요하다고 지적하였다. Yoo et al.(2019)는 일본 바이오매스타운과 비교하여 산림바이오매스 에너지 이용 확대를 위한 고려사항을 제안하는데, ①사업과 관련된 이해관계자들이 참여한 거버넌스 구축, ②공공기관 등 안정적인 열 수요처 확보와 지속적 수익 구조 마련, ③다양한 사업과 연계하여 다면적 사업을 추진할 수 있도록 시·군 단위 사업규모 확대, ④지역내 산림바이오매스 수집·가공·유통 시스템 구축이다. An et al.(2021)은 실물옵션법을 이용하여 산림바이오매스 에너지 시설의 옵션가치를 0보다 크게 만드는 열보조금 수준을 도출하였는데, 최소 0.0248원/kcal라고 하였다.

이 연구는 산림바이오매스를 소규모 분산형 에너지로

이용하는 것에 초점을 둔다. 이는 산림자원을 지산지소(地產地消)형 에너지원으로 이용함으로써 농산촌의 유지·활성화에 기여할 수 있다고 보기 때문이다. 에너지의 지산지소란 지역에서 발생하는 자원으로 에너지를 생산하여 한전에 계통접속을 하지 않고 지역에서 소비하는 형태를 말한다. 산림바이오매스를 지역 에너지로 활용함으로써 순환형 임업 실현과 농산촌 에너지 자립 및 비용 절감에 기여할 것으로 기대한다. 화석연료 대신 지역의 산림자원을 이용하면 그 비용이 외부로 유출되지 않고 지역에서 순환하므로 지역경제에도 기여할 것이다. 화석연료 대체 효과를 평가하여 탄소상쇄사업으로 활용하면 부가수익도 얻을 수 있다. 이미 유럽과 일본 등에는 산림바이오매스를 활용하는 지역 열 공급망을 갖추고 에너지 지산지소를 실현하는 사례가 다수 있다(Min et al., 2020).

이 연구는 산림바이오매스를 연료로 이용하는 소규모 분산형 열에너지 공급 시설의 수입-지출을 분석하여, 시설을 지속적으로 운영하기 위한 조건을 탐색하는 데 목적을 둔다.

재료 및 방법

1. 분석자료

산림청은 산림바이오매스를 활용한 지역의 에너지 자립 시스템 구축을 위하여 ‘산림에너지자립마을’ 사업을 추진하는데, 연 2개 지역을 선정하여 지원한다. 이 사업은 국비 50%, 지방비 50%로 진행한다. 이 연구는 이 사업의 계획을 바탕으로 분석한 것이다.

Table 1은 산림에너지자립마을 시설의 개요이다. 여기에서 제시한 발전 설비와 칩 보일러 사양을 기초로 물리적인 전기 및 열 효율을 가정하였다. 주요 설비는 목재칩 보일러(400 kW)와 발전 설비(70 kW)이다. 발전 설비를 가동하는 과정에서 부수적으로 발생하는 증기를 이용하여 열도 공급한다. 여기에 더하여 열공급 설비(열배관 2.5 km, 열교환기 50개, 배전설비 등)와 연료공급 설비(목재칩

Table 1. Facility specification of forest energy self-sufficient village.

Classification	Specification	Budget (million KRW)
Electric generator	70.0 kW	600
Wood chip boiler	400.0 kW	480
Fuel supply equipment	wood chip storage, drier, conveyor, chipper	1,400
Heat supply equipment	pipe(2.5 km), heat exchanger(50 pieces), power distributor and office	1,680

Note. Total project expenses is 4,426 million KRW(central government 50%, local authority 50%), but the costs of design, permission/authorization are not included.

Source: KFS(2020a)

저장고, 파쇄장비, 건조시설, 운송장비)로 구성된다. 보일러와 발전기가 생산하는 최대 열량은 시간당 404 Mcal(1 kWh=860 kcal)이다. RRI and KIE(2018)가 조사한 농촌 가구의 평균 열 수요량 4,069 kcal/h를 가정하면 약 100여 가구에 공급할 수 있다.

2. 연구방법

산림에너지자립마을은 조성 이후 마을기업의 형태로 20년 이상 운영하는 것을 기본 방향으로 설정한다. 마을기업이 참여하고 시설 운영을 지속하려면 수익까지는 아니더라도 적어도 비용을 감당하는 수준은 되어야 한다. 그리고 수익의 일부를 적립하여 운전기간 종료 이후의 갱신비용 일부(50%)를 확보할 수 있어야 한다. 그래야만 이 사업이 지속가능하다고 보기 때문이다. 이를 포함하여 수입에서 지출을 뺀 연간 순편익이 0 이상은 되어야 한다.

이 연구에서는 마을기업의 입장에서 연간 수입과 지출을 분석하였다. 단순하지만 시설 운영의 재무 상황을 쉽게 이해하는 방법이다. 또, 운영을 지속하려면 운영주체인 마을기업의 입장이 중요하기 때문이다. 분석의 기본 조건은 Table 2와 같다. 수입은 열과 전기, REC를 판매하여 얻는 금액이고 지출은 연료 구입비와 고정비용이다. 초기 시설 투자비는 국고(50%)와 지방비(50%) 보조로 확보하므로 매몰비용(sunk cost)으로 보았다.

연료에는 목재칩 이용을 가정하였다. 목재칩의 발열량은 함수율에 따라 다르지만 보통 품질을 기준으로 하여 2,700 kcal/kg으로 가정하였다. Eco Network(2018)의 조사에 따르면 연료용 목재칩의 거래 가격은 톤당 8만~9만 원이다. KFS(2020b)는 입목 매입에서 파쇄까지 톤당 72,000~78,700원의 비용이 소요되는 것으로 산정하였다. 여기에서는 기타 관리비용과 운송비용을 추가하여 목재칩의 가격을 톤당 95,000원으로 가정하였다. 이는 산림에너지자립 마을사업을 추진하는 지자체가 설정한 가격이기도 하다.

에너지 시설을 운영하는 데 고정비용이 소요되고 이는

시설의 경제성에 큰 영향을 미친다. 고정비용에는 갱신적립금, 유지·보수비, 보험료, 경상인건비를 포함하였다. 에너지 시설의 운전기간을 25년으로 하고 시설투자비의 50%를 갱신적립금으로 가정하였다. 운전기간 종료 후 시설 갱신비용의 50% 정도는 자체로 확보해야 한다고 보았기 때문이다. 기타 고정운영비는 선행연구(Suh and Kim, 2012; An, 2019)와 화천 산림바이오매스센터의 실태를 참고하였는데, 연간 유지·보수비는 시설투자비의 0.5%로 설정하고, 보험료는 시설투자비의 0.23%를 적용하였다. 여기에서 시설투자비는 Table 1의 발전설비 비용, 칩 보일러 비용, 연료공급 설비 비용을 말하며, 열배관, 열교환기, 배전 및 사무실 비용은 포함하지 않았다. 인건비는 1인 연 2,000만 원으로 가정하였다. 이렇게 하여도 연간 고정비용 지출은 약 8,770만 원이다.

열 판매가는 지역난방공사의 열 요금 정보(KDHC, 2022)에서 62.5 원/Mcal으로, 전기 판매가는 전력거래소(EPIS, 2022) 바이오 신재생에너지 거래 정산금액에서 151원/kwh으로 설정하였다. 탄소배출권 가격은 배출권시장 정보플랫폼(KRX ETS, 2022)의 외부사업 인증 실적의 거래 가격에서 35,000원/tCO₂으로, REC 가격은 신재생 원스톱 사업 정보 통합포털(ONENREC, 2022)의 비태양광 현물시장 정보에서 40,000원/Mcal를 적용하였다. 탄소배출권과 REC 가격은 시장동향에 따라 변동성이 크지만 2021년 하반기 가격을 기준으로 설정하였다. 미이용 바이오매스의 REC 가중치는 2.0이지만 여기에서는 1.0을 적용하였다. 국비 보조를 받은 사업에는 그만큼 줄이기 때문이다.

결과 및 고찰

1. 에너지 시설의 연간 수지 분석

이 연구에서는 에너지 시설 운영의 수입과 지출을 분석하여 시설을 지속적으로 운영하는 데 요구되는 조건을 검토하였다. 초기 시설비를 매몰비용으로 보고 연간 운영 수

Table 2. Basic data for economic analysis.

Classification	Description	Classification	Description
Electricity efficiency	20.0%	Electricity loss	20.0%
Heat efficiency	75.0%	Heat loss	4.0%
Operation rate (Boiler)	55.0%	Operation period (year)	25
Price of electricity (EPIS)	151.0 KRW/kwh	Carbon credit	35,000 KRW/t-CO ₂
Price of heat (KDHC)	65.2 KRW/Mcal	Annual maintenance	0.5% of initial investment
Price of wood chip	95,000 KRW/ton	Insurance etc	0.23% of initial investment
Wood chip heating value	2,700 kcal/kg	Initial investment	2,480 million KRW
Price of REC (ONENREC)	40.0 KRW/kwh	Labor cost (1 person, year)	20 million KRW

지가 (+)라면 운영을 지속할 수 있을 것으로 보았다. 여기에서 REC 판매는 수입으로 포함하지만, 탄소배출권은 변동성이 있어 포함하는 경우와 아닌 경우로 구분하였다. 다만, 탄소배출권은 보일러의 열 공급에만 적용하였다. 재생에너지원 발전에는 REC를 적용하기 때문이다.

Table 3은 가동률 55%, 목재칩 가격 95,000원/톤의 조건에서 에너지 시설의 운영 수지를 분석한 것이다. 하계 6개월에는 열 수요가 없다고 보기 때문이다. 여기에서도 발전기는 연중 가동으로 가정한다. 전기 공급을 중단할 수는 없기 때문이다. 전체로 보아 에너지 판매 수입이 연료비용과 고정비용을 초과하므로 시설가동을 지속할 수 있다고 판단된다. 가동률 55%를 가정하였을 때 보일러의 열 판매량은 1,591 Gcal이었다. 이 조건에서 목재칩 연간 소비량은 1,796톤(보일러 819톤, 발전기 977톤)인데, 이 정도의 규모는 농산촌 지자체의 산림사업에서 발생하는 임목으로 공급할 수 있다.

에너지 판매 수입을 구분하여 살펴보면, 전기 판매 27.9%, 열 판매 64.7%(보일러 열 39.1%, 발전기 잠열 25.6%), REC 판매 7.4%이다. 수익성에서 열 공급이 중요함을 알 수 있다.

산림에너지자립마을은 열병합 발전설비와 칩 보일러를

구분하여 가동하므로 각각의 운영 수지를 구분하였다. 발전기를 가동하여 전력과 REC 판매 수익을 얻을 수 있으며 부수적으로 발생하는 증기(잠열)를 이용하는 열 판매도 가능하다. 발전기 가동에 의한 전력과 REC 판매 수입은 9,370만 원인데 이는 연료비용 9,277만 원을 조금 넘는 수준이다. 산림바이오매스는 전력 생산에서 에너지 변환 효율이 낮기 때문이다. 전력 판매만으로는 수익성 확보가 어렵다는 것을 알 수 있다. 잠열 판매를 포함하면 수입은 1억 6,181만 원이 되고 연료비용보다 크다. 여기에서 발전기를 연중가동하지만 열 판매는 55%로 가정하였다. 여름에 폐기하는 열도 판매할 수 있다면 수익성을 더욱 개선할 수 있다.

보일러의 운영 수지에서 열 판매 수입은 1억 379만 원이며 연료비용 7,775만 원을 초과한다. 열 공급은 수요가 없을 때 보일러 가동을 중지하거나 조절할 수 있어 수요 변동에 유연하게 대처할 수 있다. 연료비용과 에너지 판매 수입을 비교하면 발전기의 수익성이 더 높다. 다만 이는 높은 전기 가격과 REC를 통한 정책 지원에 기인하는 바가 크다.

2. 목재칩과 목재펠릿 비교

동일한 조건에서 목재펠릿(32만 원/톤, 발열량 3,940 kcal/kg)을 사용한 경우와 비교하였다(Table 4). 목재펠릿

Table 3. Annual revenue-expenditure of energy facility operation.

Unit: 1000 KRW

		Revenue		Expenditure		
Electricity	Sales (MW)	490.6	Wood chip	Consumption(ton)	976.6	
	Price (KRW/kwh)	151.0		Price(KRW/t)	95,000.0	
	Revenue	74,074.6		Expenditure	92,774.9	
Power Generator	Latent heat	Sales (Gcal)	1,044.1			
		Price (KRW/Mcal)	65.2			
		Revenue	68,110			
REC		Price (1000 KRW/MW)	40.0			
		Revenue	19,622.4			
Heat	Sales (Gcal)	1,591.1	Wood chip	Consumption(ton)	818.5	
		Price (KRW/Mcal)	65.2		Expenditure	77,754.2
		Revenue	103,787.2			
Boiler	Carbon credit	Revenue	25,818.9			
		Price (KRW/tCO ₂)	35,000			
			Renewal deposit		49,600.0	
			Maintenance		12,400.0	
			Insurance		5,704.0	
			Labor		20,000.0	
Total (not including carbon credit)		265,594.5	Total		258,233.1	
(including carbon credit)		(283,345.1)				

Note. Assumed 55% of operation rate, 1 year = 8,760 hours, 1 kwh = 860 kcal

은 무게당 발열량이 높으므로 연료 사용량은 줄어들지만 단가가 비싸기 때문에 연료비용은 3억 9,363만 원으로 상승한다. 에너지 판매 수입으로 연료비용을 감당하지 못한다. 목재펠릿을 연료로 사용하면 에너지 시설의 가동은 중단되고 말 것이다. 이는 기존 산림탄소순환마을 사례에서도 나타났다. 산림바이오매스를 지역 에너지로 이용하는 데는 목재칩과 같은 저가공 연료가 바람직하다.

3. 가동률의 변동

에너지 시설 운영의 수지를 개선하는 데 중요한 조건은 가동률과 목재칩의 가격이다. 앞에서는 가동률 55%, 목재칩 가격 95,000원/톤을 가정하였다. 이 가정은 지역 여건에 따라 달라질 수 있다.

Table 5는 가동률과 목재칩 가격을 변동하면서 연간 순편익의 변화를 산출한 것이다. 이에 의하면 가동률이 50% 이하로 낮아지면 에너지 시설의 경제성을 확보하기 어렵다. 연간 순편익이 음(-)임에도 가동을 지속하려면 유지관리비와 인건비 등을 추가로 보조해야만 할 것이다. 농산촌 가구만을 대상으로 하면 가동률 50% 유지도 쉽지 않다. 봄과 가을에 열 수요가 낮아지는 점을 고려하면 가동률은 낮아질 수 있다. 얼마나 많은 가구들이 참여하는가도 중요하다. 분석에서는 100여 가구가 참여하는 것으로 가정하였으나 우리나라 농산촌에서 그 정도로 가구가 집적된 곳을 찾는 것도 쉽지 않다. 에너지 시설의 가동률을 높이기 위해 새로운 수요 개척이 필요하다.

4. 목재칩 가격 변동

에너지 시설의 경제성을 결정하는 데 중요한 또 하나의 요소는 연료비용이다. 목재칩 확보 방법과 입업 여건에 따

라 목재칩의 가격도 달라질 것이다. Table 5를 보면 목재칩 가격 15만 원에서는 가동률 70%이어도 에너지 시설 운영의 경제성을 확보하기 어렵다. 목재칩 가격을 낮추는 노력이 병행되어야 한다. 그러나 목재칩 가격을 낮추는 것은 산주에게 돌아가는 몫이 적어져 산림바이오매스 확보가 어려워질 수 있다.

목재칩 가격을 낮추려면 임목 수집·운반 시스템을 효율화해야 한다. 외지의 목재칩 가공업체에서 구입하는 형태로는 연료 비용을 절감할 수 없다. 지역의 산림에서 임도를 확충하고 운반 체계를 개선하여 수집·운반 비용을 절감하는 노력이 필요하다. 예를 들어 Cho(2018)는 산림바이오매스의 저비용 공급을 위해 단목수집보다 전목수집을, 임지에서 파쇄한 다음 운송하는 시스템을 제안하였다. 화천군 산림바이오매스센터는 인근 국유림의 도움을 받아 직접 벌채하여 연료를 확보하기도 한다.

다만, 여기에서 목재칩 비용은 지역 주민에 지급하는 금액이라는 것도 고려해야 한다. 지역의 원목생산업자에게 지불되고 노동자에게 지불되고 일부는 산림소유자에게 지불될 것이다. 화석연료와 달리 그만큼 돈이 지역에 머문다. 산림바이오매스 에너지 시설이 지역경제에 기여하려면 지역의 원목생산업자와 산림소유자 등의 참여가 중요하다. 산림소유자들이 직접 자기 산에서 임목을 생산하여 판매할 수 있도록 하면 에너지 비용이 직접 산주에게 지불될 수 있다. 지역 임업인과 산주의 참여로 에너지 시설을 안정적으로 가동할 수 있다면 화석연료 구입으로 지역 밖으로 빠져나가던 돈을 지역 안에 머물도록 할 수 있다. 그러한 점을 고려하면 목재칩 가격을 조금 인상할 수도 있을 것이다.

Table 4. The comparison of fuel cost in wood chips and wood pellets.

Unit: 1000 KRW

Heat		Electricity			Total revenue	Wood chips (2,700 kcal/kg)		
Sales (Gcal/year)	Revenue	Sales (MWh/year)	Revenue	REC revenue		Consumption (ton)	Price (KRW/ton)	Fuel cost
2,653	171,898	491	74,075	19,622	265,595	1,795	95,000	170,529
						Wood pellets (3,940 kcal/kg)		
						1,230	320,000	393,634

Note. Assumed 55% of operation rate

Table 5. The net revenue of energy facility with changing wood chip price and operation rate.

Unit: 1000 KRW

Wood chip price (KRW/ton)	Operation rate			
	40%	50%	60%	70%
60,000	36,700	59,025	81,351	103,676
80,000	5,263	24,613	43,962	63,311
100,000	-26,173	-9,800	6,573	22,946
150,000	-104,764	-95,832	-86,900	-77,967

5. 탄소배출권 반영

화석연료 대체 효과를 인정받아 탄소배출권을 판매하는 것도 수익성을 개선하는 데 필요하다. 탄소배출권은 2020년 40,000원/tCO₂까지 올랐으나 2021년 중반에 21,500원/tCO₂로 내려갔고, 2022년초에 35,000원/tCO₂으로 회복하였다(KRX ETS, 2022; Seon, 2022) 탄소배출권 가격은 정부의 탄소중립 선언을 계기로 오를 것으로 전망되는데, EU의 탄소배출권 가격은 이미 80유로/tCO₂에 이른다(Hankyung 2022.01.12.).

분석에서 다른 보일러 생산 열량과 동일한 열량을 생산하는 데 등유(화석연료)를 이용한다고 해 보자. 등유의 발열량은 8,170 kcal/l이고, 등유의 이산화탄소 배출량은 0.00250 tCO₂/l이다. 동일한 열량에서 등유의 사용량은 연간 202,863l이다. 등유 가격 943원/l을 적용하면 1억 9,130만 원이 소요된다. 등유는 모두 수입에 의존하므로 에너지 비용은 대부분 국외로 또는 도시로 빠져나간다. 산림바이오매스의 에너지 이용은 에너지 수입을 대체할 뿐만 아니라 에너지 비용의 대부분을 지역에 머물게 한다.

등유를 사용할 때 발생하는 이산화탄소 배출량은 507 tCO₂로 산정된다. 산림바이오매스의 에너지 이용은 등유 사용을 대체하여 이산화탄소 배출을 근본적으로 억제한다. 이것이 산림바이오매스 에너지 이용의 환경 편익이다. 그 효과를 탄소배출권으로 판매한다면 1,775만 원의 추가 수입을 얻을 수 있고 이는 운영 수지를 개선하는 데 기여할 수 있다. Table 6은 Table 5의 연간 순편익 분석에 탄소배출권 판매를 포함한 것이다. 화석연료를 대체한 만큼

탄소배출권을 판매할 수 있다면 연간 순편익은 크게 개선된다.

6. 열 가격 보조 효과

열 공급 가격을 올리는 방법도 있는데, 이는 다른 에너지 지원과 비교하여 결정되므로 쉬운 방법은 아니다. 분석에서는 지역난방공사의 열요금 가격을 사용하였는데, 농촌의 소규모 열공급 시설이 도시의 지역난방공사와 직접 가격 경쟁하는 것은 어려우므로 보조금으로써 어느 정도 가격을 지지할 필요가 있다. 우리나라 재생에너지 정책은 발전의 에너지원 믹스 전환에 초점을 두며 열 부분 지원에는 미흡하다(Park, 2019). 재생에너지원 전기에 적용되는 REC 개념을 재생에너지원 열에도 적용하여 그에 상응하는 보조금 지급을 검토할 수 있다. 참고로 영국의 RHI (Renewable Heat Incentive)는 신재생에너지 이용과 화석연료 이용의 비용 차이를 보상하는 열 차액지원제도이다.

Table 7은 목재칩 가격 톤당 10만 원의 조건에서 열 보조금을 추가한 경우의 연간 순편익을 분석한 것이다. 현재 전기에 적용하는 REC 가격을 동일 열량으로 환산하면 대략 50원/Mcal인데, 이를 열 판매가격에 추가하면 에너지 시설의 연간 순편익은 크게 개선된다. 또 다른 방법으로 지역난방공사의 열 요금과 등유 가격의 차액을 열 보조금으로 계산하면 42원/Mcal이다. 이 정도의 열 판매가격 지지에도 산림바이오매스 에너지 시설의 연간 순편익은 크게 개선된다.

Table 6. The net revenue of energy facility with carbon credit sales.

Unit: 1000 KRW

Wood chip price (KRW/ton)	Operation rate			
	40%	50%	60%	70%
60,000	49,609	75,162	105,715	126,268
80,000	18,173	40,749	63,326	85,902
100,000	-13,264	6,337	25,937	45,537
150,000	-91,855	-79,695	-67,536	-55,376

Note. The price of carbon credit is assumed 35,000 KRW/tCO₂.

Table 7. The net revenue change with heat subsidy level.

Unit: 1000 KRW

Heat subsidy (KRW/Mcal)	Operation rate			
	40%	50%	60%	70%
10	-14,602	4,664	23,930	43,196
Not included carbon credit.	-3,030	19,129	41,288	63,446
Wood chip price	8,542	33,593	58,645	83,687
100,000 KRW/ton	20,113	48,058	76,002	103,947
50	31,685	62,522	93,360	124,197

Note. Heat price is assumed 65.2 KRW/Mcal, which is the price of domestic heat supplied by Korea District Heat Corporation.

결 론

산림바이오매스는 재생가능자원이면서 화석연료를 대체할 수 있고 농산촌 경제에 기여한다는 점에서 탄소중립 시대에 어울리는 에너지원이다. 그러나 실제 이를 현실에 적용하는 데 극복해야 할 과제도 많다. 기존 산림탄소순환 마을의 사례를 살펴보면 안정된 에너지 수요 확보와 연료 비용의 경제성을 고려하지 않았기 때문에 실패한 것으로 판단된다. 당시 ‘녹색성장’이라는 정책 기조의 요구에 따라 값비싼 목재펠릿을 연료로 사용한 것이 시설 가동을 어렵게 한 요인이다. 이 연구는 ‘산림에너지자립마을’의 수입-지출을 분석한 것인데, 산림바이오매스 에너지 이용의 긍정적 요소를 살리면서 에너지 시설을 지속적으로 가동하기 위해서 다음을 고려할 것을 제안한다.

첫째, 안정적인 수요 확보의 노력이다. 에너지 시설의 경제성을 확보하는 데 가장 중요한 요소는 가동률이다. 화천의 산림탄소순환마을 사례는 가구만 에너지 공급 대상으로 하였기 때문에 유가(油價)가 낮아질 때 이탈 가구가 생기고 시설용량에 비하여 가동률이 낮아졌다. 가구집적도가 낮고 고령 인구가 많은 농산촌에서 가구만으로 안정된 수요를 확보하기에 충분하지 않다. 지자체 공공건물, 학교, 지역 복지시설 등을 열에너지 수요처로 확보할 필요가 있다. 그리고 농산물 건조시설 등 다양한 열 수요처를 개척해야 한다. 사계절이 뚜렷한 우리나라에서 여름과 겨울 난방 수요가 다르므로 여름철 가동을 중단하게 되는데, 이것도 에너지 시설 가동의 장애 요인이다. 목욕 시설 등 여름 열 수요도 개척해야 한다. 에너지 시설의 입지를 선정할 때도 가구집적도를 고려하여 수요가 밀집한 곳으로 해야 한다.

둘째, 연료비 절감 노력이 필요하다. 목재펠릿보다 목재칩 이용이 바람직하다. 목재펠릿은 소규모의 농산촌 에너지 시설에서 이용하기에 너무 비싸다. 또 지역 바깥에서 구입하면 운송비 때문에 가격이 높아진다. 지역의 산림자원을 최대한 이용하고 가공 비용을 낮추어 연료 비용을 낮추어야 한다. 함수율을 낮추어 연료 품질을 높이는 데도 비용이 소요되는데, 자연건조 방법도 있다. 임지잔재 수집 비용을 줄이기 위해 숲가꾸기 활동을 하는 시민단체 또는 주민과 연계하는 방안도 생각할 수 있다. 산림소유자가 직접 벌채하여 반출한다면 유통과정의 비용을 절감하고 그 차액을 가져올 수 있다. 이러한 방법에는 지역사회와 연계가 필요하고 에너지 시설 운영에서 올바른 거버넌스를 구축하는 것이 중요하다.

셋째, 저급(낮은 가격) 연료를 사용할 수 있는 보일러를 도입해야 한다. 연료 품질에 따라 발열량이 달라지고 재(灰) 발생량, 장치의 고장 빈도가 달라진다. 그렇다고 고품

질 연료(목재펠릿, 고급 목재칩)를 사용하면 연료가격이 비싸고 에너지 시설의 경제성 조건을 만족하지 못한다. 숲가꾸기 산물 등 미이용재와 임목 부산물을 사용한다는 점에서 나뭇가지, 수피 등 저급재를 원활히 활용할 수 있는 보일러를 선택해야 한다. 국내 여러 곳에서 사용하는 산림바이오매스 보일러에는 유럽 제품이 많은데, 저급 산림바이오매스를 사용하면 고장이 잦고 사후 서비스를 받기 어려운 문제가 있다.

넷째, 다양한 수익원을 확보해야 한다. 열병합 발전이라면 재생에너지원 전기의 REC 판매도 있고, 탄소배출권 거래도 추가 수입을 올리는 요소이다. 이러한 요소를 충분히 활용하여야 한다. 산림바이오매스 에너지를 이용하여 지역 농산물을 가공하거나 건조한다면 친환경 에너지를 이용하였음을 마케팅 요소로 활용하는 것도 방법이다.

다섯째, 재생에너지를 이용한 열 공급을 지원하는 정책이 필요하다. 특히 산림바이오매스의 이용은 열 공급에서 효율성이 높기 때문에 이를 지원해야 하는데, 가격을 지지하는 정책이 필요하다. 재생에너지원 발전을 촉진하는 신재생에너지 공급의무화제도(RPS)와 같은 형태의 지원을 재생에너지원 열 공급에도 적용할 필요가 있다. 이는 에너지 시설의 경제성을 개선하여 산림바이오매스 에너지 이용을 촉진할 것이다.

이상의 분석은 현재 입수 가능한 정보를 바탕으로 ‘산림에너지자립마을’ 사업의 소규모 열병합 발전 시설 운영의 수입과 지출을 분석한 것이다. 여기에는 여러 조건들을 가정하였다. 실제 운영에서 이 가정은 달라진다. 가격 정보도 달라질 수 있다. 향후 이러한 사업을 실제 추진하는 지자체는 지역 현실과 비교하여 가정들을 완화하고 가격 정보를 조정하여 분석하는 과정이 필요하다.

산림바이오매스를 지역 에너지로 이용하는 것은 여러 가지 편익을 제공함에도 현실에 적용하기에 어려움이 있다. 가장 큰 문제는 낮은 경제성인데, 농산촌의 낮은 에너지 수요와 높은 연료비용에서 비롯된다. 이러한 어려움을 극복하여 최적의 모델을 찾아가는 시행착오의 과정이 필요하다. 이 부분의 검토는 향후에도 지속적 연구 과제가 될 것이다.

References

- An, H.J. and Min, K.T. 2021. Economic feasibility of forest biomass thermal energy facility using real option approach. *Journal of Korean Society of Forest Science* 110(3): 453-461.
- An, Y.S. 2018. Economic feasibility analysis of an unused forest biomass-utilizing combined heat and power project: the case of Taebaek. (MS Thesis). Seoul. Seoul National University of

- Science and Technology.
- Cho, M.J. 2018. Forest biomass supply chain management for regional self-sufficient thermal energy utilization. (Dissertation). Chuncheon. Kangwon National University.
- Eco Network. 2018. Monitoring of domestic wood market with changing REC weight. Korea Forest Service. pp. 116.
- EPSIS (Electric Power Statistics Information System). 2020. <http://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/selectEkmaRegUpsGrid.do?menuId=050804> (2020.9.15.)
- Hankyung. 2022.01.12. <https://www.hankyung.com/economy/article/202201122273i> (2022.1.30.)
- Kangwon National Univ. 2009. The study on the creation of forest carbon circulation village. Korea Forest Service. pp. 320.
- KDHC (Korea District Heating Corporation) https://www.kdhc.co.kr/cyb/Cy_Content/CM2017.do (2022.2.1.)
- KFS (Korea Forest Service). 2018. The study on how to use the unused forest biomass to establish the nature circulative economy. Korea Forest Service. pp. 148.
- KFS (Korea Forest Service). 2020a. Workshop on forest energy self-sufficient village. Unpublished.
- KFS (Korea Forest Service). 2020b. The study on fostering the use of unused forest biomass. Korea Forest Service. pp. 190.
- KFS (Korea Forest Service). 2021. Statistical yearbook of forestry. Korea Forest Service
- KRX ETS. 2022. <https://ets.krx.co.kr> (2022.2.1.)
- KSOFP (Korea Society of Forest Policy). 2003. Economic use of forest biomass generated from forest tendering. Korea Forest Service. pp. 228.
- Lee, I.G. 2005. A basic feasibility study on the commercialization of biomass-fired district heating systems in Korea. Proceedings of Conference of the Society of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers of Korea. pp. 121-121.
- MCIE (Ministry of Commerce Industry and Energy). 2007. Policy tasks for utilization of woody biomass as energy source. Ministry of Commerce Industry and Energy. pp. 482.
- Min, K.T. 2019. Forestry profitability in Korea with evaluating stumpage. *Journal of Korean Society of Forest Science* 108(3): 405-417.
- Min, K.T., An, H.J. and Byeon, S.Y. 2020. Policy tasks to use forest biomass as a local energy sources. R911. Korea Rural Economic Institute. pp. 183.
- ONEREC. 2022. <http://onerec.kmos.kr> (2020.2.1.)
- Park, Y.S. 2019. Renewable energy policies and implications of EU heat supply. NARS Current Issues and Analysis No. 96. National Assemble Research Service. Korea.
- RRI (Rural Research Institute), KIER (Korea Institute of Energy Research). 2018. A Study on the Energy Conversion System of Rural Area Focusing on Renewable Energy Korea Rural Community Corporation. RRI and KIER. pp. 208.
- Seok, H.D., Min, K.T., Sohn, C.H. and Jang, W.W. 2005. Economic feasibility of woody biomass thermal energy use and sustainable collection method of forest residues. C2005-30 Korea Rural Economic Institute. pp. 102.
- Seon, J.N. 2022. The trend and outlook of forest carbon market. pp 395-426. In: National Forest Science Institute (Ed.) Forest and Forestry Outlook 2022.
- Suh, G.Y. and Kim, S.H. 2012. Case study and evaluation of economic feasibility of combined heat and power system using woodchip biomass. *New & Renewable Energy* 8(4): 21-29.
- Yoo, S.H., Lee, S.K., Kim, S.H. and Seo, J.W. 2019. Fostering mountain village through the forest biomass energy use. Forest Policy Issue No. 119. National Forest Science Institute. pp. 24.

Manuscript Received : January 11, 2022
 First Revision : February 7, 2022
 Second Revision : February 15, 2022
 Accepted : February 16, 2022