



미이용 산림바이오매스 연료를 활용한 분산형 열 공급시설의 열병합 발전 설비 종류별 경제성 비교·분석

조현민^{1)†} · 신유근^{2)†} · 이승재³⁾ · 한상균^{4)*}

Economic Analysis of Distributed Heat Supply Facility Using Unused Forest Biomass Fuel by Designated Combined Heat and Power Facilities

Hyun-Min Cho^{1)†} · You-Goon Shin^{2)†} · Seung-Jae Lee³⁾ · Sang-Kyun Han^{4)*}

Received 30 December 2024 Revised 16 April 2025 Accepted 13 May 2025 Published online 23 June 2025

ABSTRACT In South Korea, most rural households rely on individual heating systems that use kerosene, electricity, and firewood, leading to higher heating costs than those in urban areas. Distributed heat supply facilities consisting of Combined Heat and Power (CHP) systems and boilers that utilize unused forest biomass as fuel are being developed to reduce these costs. This study evaluated the economic feasibility of distributed heat supply facilities based on regional heat demand, particularly those consisting of gasification and Organic Rankine Cycle (ORC) systems. The results showed that the gasification and ORC systems achieved the highest internal rates of return of 11.3% and 9.2%, respectively, when the annual heat demand was 2 GWh (approximately 100 households). However, as the heat demand increases, the economic feasibility decreases, primarily because of the rising fixed costs associated with the expansion of the piping infrastructure. The gasification system was more economically viable for demands below 4 GWh (approximately 200 households), whereas the ORC system was better for higher demands. To ensure economic viability, it is crucial to establish heat supply systems in regions with large-scale heat demand facilities beyond individual households to secure a higher heat sales ratio for CHP facilities.

Key words Combined heat and power(열병합 발전), Distributed heat supply system(분산형 열 공급 시스템), Unused forest biomass(미이용 산림바이오매스), Economic analysis(경제성 분석)

1) Ph.D. Student, Department of Forest Management, Kangwon National University

2) Executive Director, Green Carbon Research Center

3) CEO, Namuenergy, Co. Ltd.

4) Professor, Division of Forest Sciences, College of Forest and Environmental Sciences, Kangwon National University

[†]These authors contributed equally to this work.

*Corresponding author: hsk@kangwon.ac.kr

Tel: +82-31-250-8336

Nomenclature

RC : required capacity (kW)

DC : designated capacity (kW)

MHL : monthly heat load (kWh/month)

MOH : monthly operating hours (hr/month)

YOH : yearly operating hours (hr/year)

HSR : heat sales ratio (%)

TR : total revenue (won/year)
 TCI : total capital investment cost (won)
 OI : ordinary income (won/year)
 MHS : monthly heat sales (kWh/month)
 MHP : monthly heat production (kWh/month)
 F : yearly fuel consumption (ton/year)
 CV_{net} : net calorific value (kcal/kg)
 e : energy efficiency of facilities (%)

Subscript

CHP : combined heat and power
 el, th : electricity, thermal
 b, p : base load, peak load

1. 서론

우리나라 농·산촌 지역은 가구 간 거리가 멀고, 단독주택이 많은 분산형 거주 특징을 가지고 있으며, 이러한 지역에서는 비용적·기술적 문제로 인해 중앙 집중형 난방방식을 적용하기가 어려운 실정이다. 그렇기 때문에 대부분의 농·산촌 가구에서는 도시가스(LNG)를 열원으로 사용하는 도심지역과는 다르게 등유, 프로판가스(LPG), 전기, 화목보일러 등과 같은 개별 난방방식을 이용하고 있는 것으로 나타났다.^[1]

일반적으로 개별 난방방식은 중앙 집중형보다 난방비용이 더 높으며, 특히 건축된 지 오래된 농·산촌의 주택에서는 낮은 단열 성능으로 인해 난방 효율이 떨어져 난방비용이 더욱 상승하게 된다.^[2] 또한, 농·산촌에는 저소득층 및 취약계층의 거주 비율이 높기 때문에 주민들의 난방비용 부담을 줄일 수 있는 다양한 방안이 제시되고 있는 실정이다.

특히, 산림청에서는 2010년부터 농·산촌 지역 에너지 비용의 절감 및 산림자원의 지역 내 순환을 촉진하기 위해 산림에너지자립마을 조성 사업을 지속적으로 추진하고 있다.^[3] 산림에너지자립마을은 지역 내에서 버려지고 있는 목질계 재생에너지인 미이용 산림바이오매스를 수집하여 에너지 연료로 활용하는 지산지소(地産地消) 형태의 분산형 열 공급사업으로, 일본, 유럽 등 국외에서는 널리 정착된 지역

자원 순환 모델이다.^[4]

미이용 산림바이오매스란 산림 경영활동으로 발생한 산물 중 원목 규격에 못 미치거나 수집이 어려워 이용이 원활하지 않은 산물로써 벌채 부산물, 숲가꾸기 산물, 병해충 피해목, 가로수 관리 산물, 산불 피해목 등으로 구분된다.^[5] 미이용 산림바이오매스는 2018년에 재생에너지로 규정되어 신재생에너지 공급인증서(REC, renewable energy certificate) 가중치를 부여받았으며, 이로 인해 신재생에너지 공급 의무화제도(RPS, renewable portfolio standard) 내에서 재생에너지 발전 연료로써 활발히 사용되고 있다.^[6] 따라서, 산림에너지자립마을은 미이용 산림 자원 이용을 통해 농·산촌 지역 난방문제 해결 뿐만 아니라, 국가 탄소중립 목표 달성에도 기여할 수 있는 사업이다.

현재까지 국내에서 산림에너지자립마을 조성을 위한 여러 차례의 시도가 있었지만, 에너지 공급시설의 경제성, 주민 편의성 등에 있어서 시행착오를 겪으며 아직 성공적으로 운영 중인 사례는 없는 상태이다.^[7] 특히, 분산형 열 공급시설의 도입에 있어서 농·산촌 지역은 가구 간 열 전달을 위한 배관 연결 거리가 길어 높은 고정비용과 열 손실이 발생하기 때문에 경제적으로 불리한 구조를 가지고 있다.^[8]

최근에는 분산형 열 공급시설의 경제성을 확보하기 위한 대안으로 열만을 생산하는 기존 보일러 설비와 다르게 전기 발전을 동시에 하는 바이오매스 열병합 발전(CHP, combined heat and power) 설비의 도입이 시도되고 있다.^[9] 열병합 발전 설비는 높은 고정비를 가진다는 단점이 있지만, 전소 발전 시 2.0의 높은 REC 가중치를 가지는 미이용 산림바이오매스 연료를 활용한다면 경제성 있는 운영이 가능하다. 나아가, 열병합 발전 설비에서 생산되는 열은 마을 주민에게 공급하고, 전기는 매전을 통하여 추가적인 수익을 얻을 수 있기 때문이다.^[10]

국외에서는 에너지 자립마을에 바이오매스 열병합 발전 설비 도입 시, 설비의 경제성을 확보하고자 가동시간을 최대한으로 하기 위해 설비 용량을 지역의 연간 기저부하를 기준으로 선정하고, 겨울철 변동 부하를 감당하기 위하여 보조 열원인 목재칩 보일러를 설치하여 필요할 때만 가동하는 방식으로 운영되고 있다.^[11,12]

소규모 분산형 산림바이오매스 열병합 발전 설비는 발전 방식에 따라 대표적으로 가스화 설비(gasification)와 ORC

설비(organic rankine cycle)가 있다. 가스화 설비는 바이오매스 연료를 고온에서 산소와 반응시켜 합성가스(syngas)로 변환하여 내연기관을 가동하여 전기와 열을 생산하며, ORC 설비는 바이오매스 연료의 연소로 발생한 열을 사용하여 유기 작동 유체를 증발시켜 기화된 고온·고압의 증기로 터빈을 구동하여 열과 전기를 생산하는 방식이다.^[13]

가스화 설비는 생산되는 합성가스 조성의 안정성을 위해 낮은 함수율과 회분을 가진 고품질의 연료가 요구되나, 높은 전기생산 효율을 가지고 있다. 반면, ORC 설비는 발전에 열원만을 필요로 하기 때문에 연료의 품질에 대한 제약 조건은 비교적 적으며 열 생산 효율이 높다. 하지만, 유기 작동 유체를 연속적으로 증발 및 응축하는 과정에서 열 에너지 손실이 발생할 수 있으며, 전기생산 효율이 비교적 낮다.^[14,15]

이렇듯 열병합 설비의 작동 방식에 따라 사용 연료, 에너지 효율, 고정비 등이 달라 열 공급시설 운영에서의 경제성 또한 다르게 나타나게 된다. 따라서, 분산형 열 공급시설이 안정적이고 경제적으로 지역에 난방열을 공급하기 위해서는 지역의 열 수요 규모에 맞는 적절한 설비의 종류 및 크기가 선정되어 도입되어야 한다.

본 연구에서는 열 추종 방식을 사용하여 분산형 열 공급 시설에서 지역 열 수요 규모에 따른 가스화 설비와 ORC 설비의 적정 도입 설비 규모를 도출하고, 각각의 경제성에 대한 비교를 하였다. 경제성 분석은 열 공급시설의 실제 운영이 아닌 가정을 통한 데이터를 기반으로 이루어졌으며, 향후 산림에너지자립마을 조성 시 사업의 경제적 타당성 검토에 참고가 될 수 있는 자료를 마련하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 분산형 열 공급 시스템의 경제성 분석

2.1.1 지역 열수요에 따른 적정 열 공급 설비 규모 산출 방법

산림에너지자립마을에 적용되는 분산형 열 공급 시스템은 열병합 발전 설비와 온수보일러 두 가지 설비로 구성된다. 열 공급 시스템의 경제성 있는 운영을 위해서는 도입되는 열병합 발전 설비의 가동률과 에너지 이용률이 최대로

되어야 한다. 본 연구에서는 설비의 가동률과 에너지 이용률을 최대로 하기 위해 열 추종 방식을 적용하여 열 공급 설비의 적정 도입 용량을 도출하였다(Fig. 1). 열 추종 방식은 지역의 연간 열 수요량 중 기저부하를 기준으로 열병합 발전 설비 용량을, 피크부하를 기준으로 온수보일러 용량을 선정하여 열병합 발전 설비를 연간 최대부하로 운전하며, 부족한 열을 보조 열원인 보일러에서 공급하는 방법이다.^[16]

열 공급 시스템 도입 지역의 난방 기저부하 및 피크부하를 산출하기 위해서 한국지역난방공사의 2021년 월별 가정용 열 판매 비율을 Table 1과 같이 적용하였다. 연간 총 열

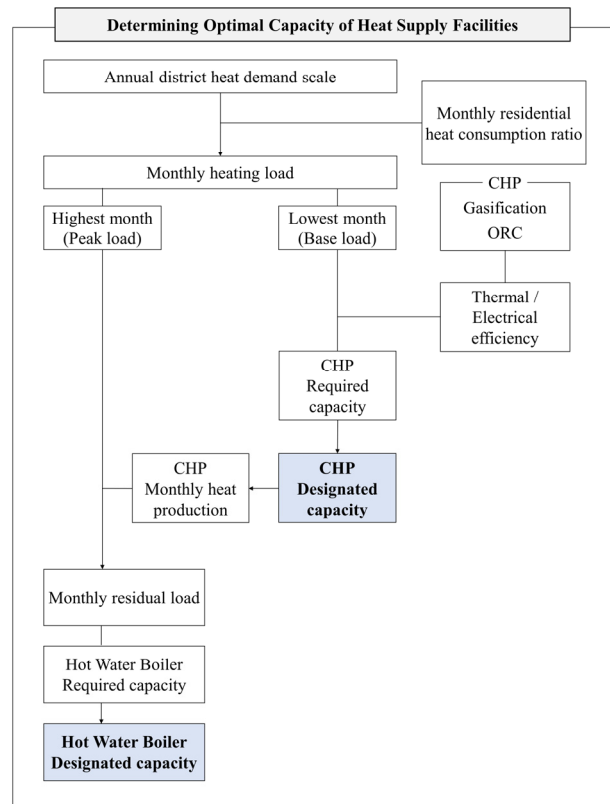


Fig. 1. Proposed method of determining optimal capacity of heat supply facilities

Table 1. Monthly residential heat consumption ratio

Category	Heat Consumption Ratio					
	1	2	3	4	5	6
Month	1	2	3	4	5	6
Ratio (%)	21.3	15.2	11.0	6.4	4.5	2.6
Month	7	8	9	10	11	12
Ratio (%)	1.8	1.5	2.1	5.1	10.5	18.0
Total (%)	100					

수요량 대비 난방 기저부하와 피크부하의 비율은 각각 약 1.5%(8월)와 약 21.3%(2월)이었다.

열병합 발전 설비의 적정 용량은 식 (1)과 같이 난방 기저 부하를 감당할 수 있는 전기용량을 산출하였다. 설비 가동 시간의 경우 유지보수에 필요한 시간을 제외하고 상시 가동하는 것으로 가정하여 월간 가동시간은 720시간/월, 연간 가동시간은 7,920시간/년으로 적용하였다.

온수보일러의 적정 설비 용량으로는 난방 피크부하에서 열병합 발전을 통해 생산되는 기저부하를 제외한 나머지 변동 부하를 감당할 수 있는 용량을 식 (2)와 같이 산출하였다.

열 추종 방식에 의해 열 공급 설비의 적정 용량 산출 후, 실제 도입되는 설비의 용량은 최소 50 kW부터 100 kW 단위의 설비 용량 중 적정 용량 이상의 최소 용량의 설비를 선정하였다.

$$RC_{CHP} = MHL_b \times MOH^{-1} \times \frac{e_{el, CHP}}{e_{th, CHP}} \quad (1)$$

- RC_{CHP} : 적정 열병합 설비 용량(kW)
- MHL_b : 월간 난방 기저부하(kWh/월)
- MOH : 월간 설비 가동시간(hr/월)
- $e_{el, CHP}$: 열병합 설비 전기생산 효율(%)
- $e_{th, CHP}$: 열병합 설비 열 생산효율(%)

$$RC_{boiler} = \frac{MHL_p - \left(\frac{DC_{el, CHP}}{e_{el, CHP}} \times e_{th, CHP} \times MOH \right)}{MOH} \times e_{boiler}^{-1} \quad (2)$$

- RC_{boiler} : 적정 보일러 설비 용량(kW)
- MHL_p : 난방 피크 부하(kWh/월)
- $DC_{el, CHP}$: 도입 열병합 설비 전기생산 용량(kW)
- e_{boiler} : 보일러 열 생산효율(%)

본 연구에서는 열 공급 설비의 적정 용량 산출과 경제성 분석에 필요한 각 설비별 에너지 생산 효율을 기존 연구 사례 및 업체 조사자료를 바탕으로 적용하였다(Table 2). 가스화 설비의 경우, Spanner Re² GmbH 社(Bayern, Germany)에서 제시한 전기 25%, 열 50%, 손실 25%로 적용하였으

Table 2. Energy efficiency of biomass heat supply facilities

Category	Gasification	ORC	Hot Water Boiler
Electrical efficiency	25%	10%	-
Thermal efficiency	50%	70%	90%
Energy loss	25%	20%	10%
Total	100%	100%	100%

며, ORC는 전기 70%, 열 10%, 손실 20%의 효율을, 목재 칩 온수보일러는 열 90%, 손실 10%로 가정하였다.^[13]

2.1.2 자본 투자 비용의 산출

분산형 열 공급 시스템의 자본 투자비용은 설비 비용과 부대비용으로 구성되며, 본 연구에서는 토지비를 고려하지 않았다(Table 3). 가스화와 ORC 열병합 발전 설비의 설비 가액은 각각 독일 Spanner社와 프랑스 ENOGIA社의 설비 가액을 참고하여 kW_{el}당 설비 단가를 적용하였으며, 보일러 설비가액의 단가는 국외 연구 자료를 참고하였다.^[17~19] 설비 비용은 열병합 발전 설비와 온수보일러 설비 가격의 합이며, ORC의 경우 설비 특성상 바이오매스 연소 및 작동 유체의 가열을 위한 별도의 보일러가 필요하기 때문에 추가적인 ORC 보일러 설비 비용이 포함되었다. ORC 보일러의 용량은 도입 ORC 설비의 열용량(kW_{th})과 동일하게 도입하는 것으로 가정하였다.^[20]

부대비용은 배관설비 비용과 열교환기 비용으로 구성된다. 열 공급을 위한 배관의 길이는 공급 가구당 67 m를 시설하며, 열교환기는 가구당 1대씩 설치하는 것으로 가정하였다. 공급 가구의 수는 지역 연간 열 수요를 가구당 연간 난방 수요량으로 나누어 산출하였으며, 가구당 연간 난방

Table 3. Specific cost of facility investment

Contents	Unit	Specific Cost
Gasification facilities	won/kW _{el}	6,600,000
ORC facilities		6,700,000
ORC boiler	won/kW _{th}	450,000
Hot water boiler		400,000
Piping	won/m	400,000
Heat exchanger	won/unit	3,640,000

수요량은 충청북도 괴산군의 산림에너지자립마을 선정 지역 대상으로 2022년에 실시된 전수조사 자료를 기반으로 19,812 kWh/가구/년을 사용하였다.^[21]

열 공급 시스템의 고정 투자비용의 자금 구성은 정부지원금, 자기자본금, 대출금으로 구성하였다. 정부지원금의 경우 산림청 산림에너지자립마을 조성 사업의 정부지원비율인 최대 20억원 또는 최대 총 자본투자비용의 50%를 적용하였으며, 자기자본금은 30%, 그 외 금액은 타인자본금으로 가정하였다. 이때 타인자본에 대한 대출금리는 4.0%의 고정금리를 적용하였으며, 10년 상환을 기준으로 하였다.

2.1.3 경제성 분석의 가정

열 공급 시스템에 대한 경제성 분석 시 필요한 가정은 Table 4와 같이 설비의 운전 기간(감가상각기간)은 20년으로 하였으며, 열병합 발전 설비의 연간 7,920시간 가동을 기준으로 하였다. 설비 운영을 위해 2명의 근로자를 고용하며 인당 인건비는 3천만 원/년으로 가정하였다.

연간 발생하는 매출의 종류는 CHP 발전을 통한 열 및 전기 판매 매출과 보일러 열 판매 매출이 있으며, 매출액 상정을 위한 SMP, REC, 열 판매가격은 각각 한국전력공사, 신재생 원스톱 사업정보 통합포털, 한국지역난방공사에서 공시하고 있는 2024년 평균 시장 가격을 적용하였다. REC 가중치는 무상지원금(정부지원금)을 받은 에너지공급자의

경우, 지원받은 금액의 비율을 제외한 만큼만의 REC 인증서를 발급받을 수 있기 때문에 기존 2.0에서 50%를 제외한 1.0으로 적용하였다.

연료 가격의 경우, 시장조사를 통해 미이용 산림바이오매스 인증을 받은 별채부산물로부터 자연 건조 후 파쇄 및 선별 작업을 거쳐 생산된 목재칩의 평균 거래 가격인 160,000 원/톤(함수율 30% 기준)을 적용하였다. 단, 가스화 설비의 경우 설비의 유지·관리를 위해 제조사에서 함수율 약 15% 미만의 연료를 투입하는 것을 권장하고 있기 때문에, 실제 운영 시에는 가스화 설비의 연료 비용이 더 높아질 수 있다.

그 외 변동비로 운영비, 유지보수비의 비율은 각각 연간 총매출의 5.8%, 자본 투자 비용의 2.0%로 적용하였으며, 법인세는 과세표준이 2억 이하일 경우 경상이익의 9.0%, 초과일 경우 19.0%를 적용하였다.^[22,23] 또한, 사업 기간 내 발생하는 모든 매출 및 변동비용에 대하여 연간 4.5%의 물가상승률을 적용하였다.

열 공급 시스템의 에너지 매출량에 있어서 열병합 발전으로 생산된 전기는 전력 계통연계를 통해 전량 매전되며, 온수보일러 또한 지역난방의 변동 부하를 감당할 만큼만 가동하여 열을 생산하기 때문에 생산량이 곧 판매량이라고 할 수 있다.

하지만, 열병합 발전 설비는 여름철의 월간 열 생산량이 그 수요를 초과할 수 있으며, 이 경우 열 판매 매출의 과대 추정이 발생할 수 있으므로 정확한 판매량의 산정이 필요하다. 따라서, 연간 총 열 판매량을 월별 열 판매량의 합을 통해 산출하였으며, 월별 열 판매량은 열 수요가 생산량보다 많은 달에는 그 생산량만큼을, 반대의 경우에는 해당 달의 열 수요량만큼으로 계산하였다. 식 (3)과 같이 열 판매량을 산출하여 경제성 분석에 활용하였으며, 열병합 설비 별로 열 생산량 대비 판매량인 열 판매 비율을 산출하여 지역 열 수요 규모에 따른 변화를 분석하였다.

Table 4. Assumptions for economic analysis

Factors	Unit	Description
Business year	yr	20
Annual operating hour	hr	7,920
Number of employees	man	2
Labour cost	won/yr/man	30,000,000
Electricity sale rate	%	100
SMP	won/kWh	127.76
REC price	won/kWh	76.18
REC weight	-	1.0
Heat sale price	won/kWh	182.37
Unused biomass fuel cost	won/ton	160,000
Corporation tax rate	% of OI	9.0 or 19.0
Operational cost rate	% of TR	5.8
Maintenance cost rate	% of TCI	2.0
Inflation rate	%	4.5

$$HSR_{CHP} = \frac{1}{12} \times \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{MHS_i}{MHP_i} \times 100 \right) \tag{3}$$

$$MHS_i = \begin{cases} MHP_i & \text{if } MHL_i \geq MHP_i \\ MHL_i & \text{if } MHL_i < MHP_i \end{cases}$$

HSR : 연평균 열 판매 비율(%)

MHS : 월간 열 판매량(kWh/월)

MHP : 월간 열 생산량(kWh/월)

열 공급시설의 변동비인 연간 연료소비량은 도입 설비별 연료소비량의 합(열병합 + 보일러)으로 계산하였다. 각 설비의 연료소비량은 식 (4)와 같이 단위 에너지 생산에 필요한 열량을 목재칩 연료의 저위발열량으로 나누어 산출하였으며, 목재칩의 저위발열량은 3,570 kcal/kg을 기준으로 하였다.^[24]

$$F = \frac{DC \times e_{cl}^{-1} \times 860.42}{CV_{net} \times 1,000} \times YOH \quad (4)$$

F : 연간 연료 소비량(ton/년)

CV_{net} : 목재칩 연료의 저위발열량(kcal/kg)

YOH : 연간 가동시간(hr/년)

위와 같이 열 공급시설의 운영에 필요한 자본 투자 비용, 운영비용과 연간 매출을 산정하여 Table 4의 가정 아래 사업의 경제성 분석을 실시하였다. 경제성 분석은 내부수익률(IRR, internal rate of return), 순현재가치(NPV, net present value), 자본회수기간(SPP, simple payback period) 총 3가지 경제성 지표의 산출 후 비교하였다.

2.2 경제성 인자에 따른 민감도 분석

열 공급시설의 사업 추진에 있어서 운영 주체가 경제성 예측에 어려움을 겪는 원인은 시장 상황에 따른 비용 및 매출 인자의 변동성이다. 본 연구에서는 현실적인 범위 내에서 경제성 인자들의 수치를 가정하였으나, 시장 또는 지역 여건에 따라 주요 인자들이 변화할 수 있기 때문에 그에 대한 영향을 파악하고자 민감도 분석을 실시하였다.

경제성에 대한 민감도 분석 인자로는 비용 인자에서 연료 가격, 매출 인자에서 열 판매가격, SMP, REC 가격, REC 가중치, 자본 투자 비용 인자에서 정부지원율을 선정하였다.

민감도 분석은 인자가 일정량 변화할 때마다의 순현재가치를 산출하였으며, 각 인자별로 독립적으로 시행되었다. 또한, 분석하고자 하는 인자를 제외한 나머지 인자들의 가정은 Table 4와 같이 고정된 상태로 진행되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 분산형 열 공급 시스템의 경제성 분석

3.1.1 열병합 발전 설비별 열 공급 시스템의 사업연도별 자금 흐름

분산형 열 공급 시스템을 도입하고자 하는 지역의 최소 연간 열 수요 규모를 1,000 MWh(약 50가구)로 가정하였으며, 여기서 50 kW_{el}급 가스화와 ORC 설비를 각각 도입하였을 때의 사업연도별 자금 흐름 및 경제성을 분석하였다.

가정한 경제성 분석 조건에서의 자본투자비용은 설비 비용과 부대비용을 포함하여 가스화와 ORC 열 공급 시스템이 각각 약 19.7억원, 20.1억원이 소요되는 것으로 나타났다(Table 5).

해당 지역의 겨울철 피크부하(213 MWh)를 감당하기 위해 가스화 열 공급 시스템은 300 kW_{th}급 온수보일러를 추가로 설치해야 하며, ORC 열 공급 시스템은 월간 열생산량이 피크부하를 초과하기 때문에 온수보일러를 설치하지 않아도 되는 것으로 나타났다. 또한, 지역의 월별 열수요 대비 50 kW_{el}급 가스화와 ORC 열병합 설비의 월간 열 생산량을 이용하여 연간 열 판매 비율을 산출한 결과, 각각 약 72.0%와 약 36.1%으로 나타났다.

지역 연간 열 수요 규모 1,000 MWh에서 가스화 시스템의 자금 흐름 분석 결과, 연간 수입 중 가스화 열병합 설비에서 생산된 전기와 열 판매 수입이 각각 약 30.7%, 39.5%를 차지하였으며, 보일러에서 생산된 열 판매 수입은 약 29.8%인 것으로 나타났다.

가스화 시스템의 경제성은 내부수익률 8.09%, NPV 약 403,401천 원으로 분석되었으며, 사업연도 1년 차부터 약

Table 5. Capital investment cost of heat supply system at 1,000 MWh heat demand

Investment Cost	Unit	Type of facilities	
		Gasification	ORC
Facility	K won	330,000	335,000
Hot Water Boiler		120,000	-
ORC Boiler		-	157,500
Piping		1,340,000	
Heat Exchanger		182,000	
Total Cost	M won	1,972	2,014.5

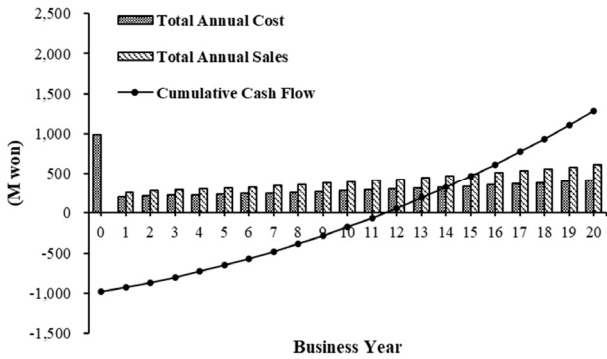


Fig. 2. Cash flow of Gasification system during the business years at the district of 1,000 MWh heat demand

56,159천 원의 양의 현금흐름을 나타내며 연차가 증가함에 따라 그 값이 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 2). 자본투자비용의 50%인 정부지원금 986백만 원을 제외한 초기투자비용은 986백만 원이었으며, 이에 대한 자본회수기간은 약 11.3년인 것으로 나타났다.

ORC 시스템의 경우, 연간 수입 중 ORC 열병합 설비에서 생산되는 전기 및 열 판매 수입의 비율이 각각 약 30.7%, 69.3%를 차지하는 것으로 나타났으며, 별도의 온수보일러를 설치하지 않는 것으로 가정하였기에 보일러 열 판매 수입은 없었다.

가스화 시스템과 ORC 시스템 모두 열병합 설비의 가동을 통한 전기생산 및 판매 수입이 연간 총수입의 상당 부분인 약 31%(약 80,760천 원)을 차지하고 있었다. 이와 같이, 열 추종 방식을 통해 열병합 발전 설비가 지역의 연간 기저 부하를 담당할 수 있을 만큼의 최적 설비 용량을 도입한다면, 약 90%의 높은 설비 가동률(연간 8,760시간 중 7,920시간)과 함께 사업의 수익성 제고에 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

ORC 시스템의 경제성은 내부수익률 -4.14%, NPV 약 -711,117 천 원으로 나타났으며, 내부수익률과 순현재가치가 마이너스임에 따라 경제성이 없는 것으로 나타났다(Fig. 3). 사업 1차 연도에서의 현금흐름은 약 -11,251 천 원으로, 자본투자비용에서 정부지원금 50%를 제외한 1,007 백만 원을 회수하는데 사업 기간인 20년을 초과할 것으로 분석되었다.

1,000 MWh 열수요 지역에서 열 공급 시스템의 경제성은 가스화가 ORC보다 더 높은 것으로 나타났으며, 이는

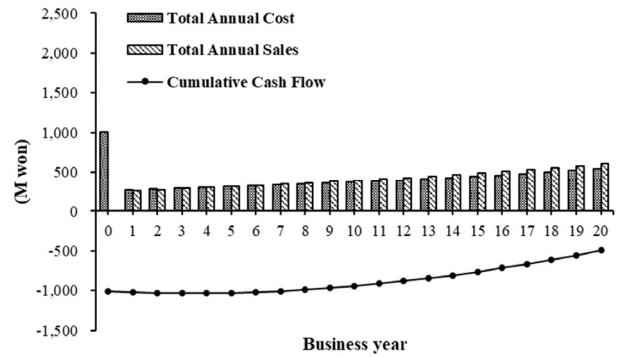


Fig. 3. Cash flow of ORC system during the business years at the district of 1,000 MWh heat demand

ORC에서의 높은 연간 연료비용이 가장 큰 원인인 것으로 분석되었다. 동일한 7,920시간을 가동하였을 때, ORC 열 공급시스템의 연료 소비량은 약 892톤/년으로 가스화 설비와 온수보일러의 연료 사용량인 465톤/년보다 약 1.9배 더 높았다. ORC 설비의 특성상 전기생산 효율(10%) 대비 열 생산 효율(70%)이 매우 높기 때문에 가스화 설비와 동일한 전기용량일지라도 연료 소비량이 많고, 그에 따른 열 생산량 또한 많아지게 된다. 따라서 ORC 열 공급 설비를 더 높은 열 수요를 가진 지역에 도입한다면 열 판매 비율이 높아짐에 따라 투입되는 연료 비용 대비 열 판매 매출이 증가하여 경제성을 제고할 수 있을 것으로 사료된다.

3.1.2 열병합 발전 설비별 열 공급 시스템의 지역 열수요 규모에 따른 경제성 분석

본 연구에서는 분산형 열 공급 시스템에 도입되는 적정 열병합 발전 설비와 온수보일러의 용량을 공급하고자 하는 지역의 열 수요 규모에 따라 열 추종 방식을 활용하여 도출하였다. 연간 지역 열 수요 규모는 1 GWh부터 10 GWh까지를 대상으로 하였으며, 에너지 생산 설비의 용량은 최소 50 kW, 100 kW 단위로 도입하는 것으로 가정하였다. 그 결과, 가스화 열 공급 시스템은 1-4 GWh에서는 50 kW, 5-8 GWh에서는 100 kW, 9-10 GWh에서는 200 kW 급의 가스화 설비가 적절한 것으로 나타났으며, 가스화 설비에서 생산되는 열이 피크부하 대비 적기 때문에 1GWh 규모에서부터 온수보일러 도입이 고려되었다(Table 6).

ORC 열 공급 시스템의 경우에는 1-10 GWh의 열수요 규모에서 모두 50 kW 급의 설비로 기저부하에 대한 열 공

Table 6. Designated facility capacity of heat supply systems by district heat demand

District Heat Demand (GWh)	Designated Capacity			
	Gasification		ORC	
	CHP (kWel)	Hot Water Boiler (kWth)	CHP (kWel)	Hot Water Boiler (kWth)
1	50	300	50	0
2	50	700	50	400
3	50	1,000	50	700
4	50	1,400	50	1,100
5	100	1,600	50	1,500
6	100	2,000	50	1,800
7	100	2,300	50	2,200
8	100	2,700	50	2,500
9	200	2,800	50	2,900
10	200	3,200	50	3,200

급이 가능한 것으로 나타나 열병합 설비 용량의 증가는 없는 것으로 나타났다. 하지만, 2 GWh 규모부터는 피크부하가 열병합 설비의 월간 열 생산량보다 높아지게 되어 온수 보일러가 도입되는 것으로 도출되었다.

1 GWh부터 10 GWh까지 각 열수요 규모에서 앞서 도출된 적정 열병합 발전 설비가 도입되었을 때의 발전 설비별 연간 열 판매 비율을 분석한 결과, 가스화와 ORC 설비 모두 열 수요 규모가 증가함에 따라 증가하는 경향으로 나타났다(Fig. 4). 이는 연간 열수요 규모가 증가할수록 기저부하가 증가하기 때문에 열병합 설비가 같은 용량일 경우 여름철에 판매되지 않는 잉여열의 양이 감소하기 때문이다. 또한, 가스화와 ORC 열 공급 시스템 모두 열수요 규모 1

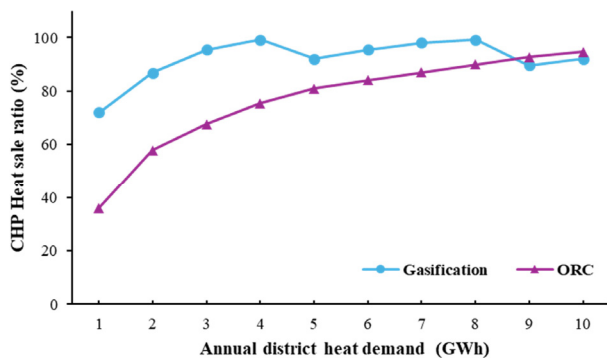


Fig. 4. Annual heat sale ratio of gasification and ORC by district heat demand

GWh에서 열판매 비율이 가장 낮았으며, 가스화 72%와 ORC 36%로 가장 큰 차이를 보였다. 본 분석에서 가정한 열병합 발전 설비의 최소 규모가 50 kWel임에 따라 열 생산효율이 높은 ORC는 낮은 열 수요 규모에서 열 판매 비율이 낮은 것으로 판단되며, 점차 증가하여 열 수요 규모가 4 GWh 일 때 75%로 안정적인 열 판매가 이루어지는 것으로 나타났다.

연간 지역 열수요에 따른 가스화와 ORC 열 공급 시스템의 경제성을 비교하기 위해 Table 6에서 도출된 각 설비의 규모에 대하여 Table 3과 Table 4의 가정을 동일하게 적용하여 가상의 운영 실적을 산출하였다(Table 7, 8). Table 7과 8은 지역 열수요 규모별로 열 공급 사업 1년차의 자세한 운영 실적을 나타낸 것이며, 운영 실적은 연간 에너지 판매량, 연료 소비량, 설비 가동시간, 전기 및 난방 판매 수입, 지출 비용으로 구성되어 있다. 이를 바탕으로 2년 차부터 20년 차까지의 자금흐름을 4.5%의 물가상승률 및 매출액에 따른 법인세의 변동을 고려하여 산출하였으며, 각 지역 열수요 규모별 열 공급 시스템의 내부수익률(IRR), 순현재가치(NPV), 투자회수기간(SPP)을 분석하였다.

내부수익률의 경우, 가스화는 지역 열수요 규모 2 GWh에서 10.6%, ORC는 3 GWh에서 8.5%로 가장 높았으며, 이후 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 6). 경제성 감소의 원인으로서는 열 수요 규모가 증가할수록 열 공급 시스템의 매출 증가율 대비 고정투자비용의 증가가 더 높기 때문인데, 특히 배관설비 및 열교환기 비용이 가장 큰 영향을 미친 것으로 파악되었다.

또한, 열 수요 규모가 3 GWh일 때까지는 가스화의 내부

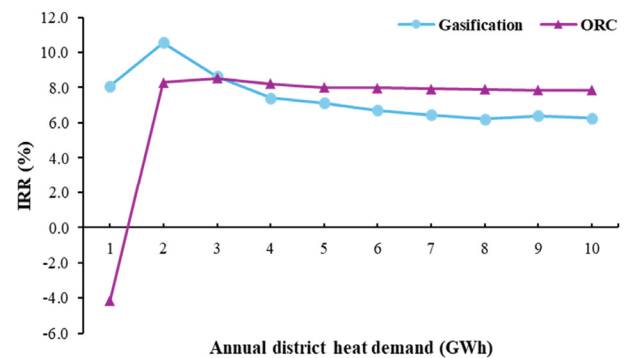


Fig. 5. IRR of heat supply systems using gasification and ORC by annual district heat demand

Table 7. Annual operational status of gasification heat supply system by district heat demand

Items	District heat demand (GWh/y)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Operational Performance										
- Energy sales volume (MWh/y)										
Electricity	396	396	396	396	792	792	792	792	1,584	1,584
Heat (CHP)	570	688	756	786	1,457	1,513	1,552	1,573	2,837	2,918
Heat (Boiler)	430	1,311	2,243	3,213	3,542	4,486	5,447	6,426	6,162	7,081
- Fuel consumption (ton/y)										
CHP	357	357	357	357	714	714	714	714	1,427	1,427
Boiler	108	328	562	804	887	1,123	1,363	1,608	1,542	1,772
- Operating hours (hr/y)										
CHP	7,920	7,920	7,920	7,920	7,920	7,920	7,920	7,920	7,920	7,920
Boiler	1,433	1,874	2,244	2,296	2,214	2,243	2,368	2,380	2,201	2,213
Annual Sales (M won/y)										
- CHP										
Electricity	80.8	80.8	80.8	80.8	161.5	161.5	161.5	161.5	323.0	323.0
Heat	104.0	125.5	137.9	143.4	265.8	276.1	283.2	286.9	517.5	532.3
- Boiler (heat)	78.4	239.2	409.2	586.1	646.1	818.2	993.4	1,172.1	1,123.9	1,291.4
Annual Expenses (M won/y)										
- Labour										
	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
- Woodchip fuel										
CHP	57.1	57.1	57.1	57.1	114.2	114.2	114.2	114.2	228.3	228.3
Boiler	17.2	52.5	89.8	128.7	141.9	179.6	218.1	257.4	246.8	283.6
- Operational	15.3	25.8	36.4	47.0	62.3	72.8	83.4	94.0	113.9	124.5
- Maintenance	39.4	73.1	106.5	140.2	179.4	213.1	245.9	279.5	324.1	357.7
- Depreciation	49.3	91.4	166.3	250.4	348.5	432.6	514.7	598.8	710.2	794.3
- Interest	15.8	29.2	69.1	116.2	171.2	218.3	264.3	311.4	373.7	420.8
- Tax	1.7	10.7	8.1	2.0	-	-	-	-	-	-

Table 8. Annual operational status of ORC heat supply system by district heat demand

Items	District heat demand (GWh/y)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Operational Performance										
- Energy sales volume (MWh/y)										
Electricity	396	396	396	396	396	396	396	396	396	396
Heat (CHP)	1,000	1,603	1,875	2,091	2,243	2,330	2,411	2,492	2,569	2,624
Heat (Boiler)	-	396	1,124	1,908	2,756	3,669	4,588	5,507	6,430	7,375
- Fuel consumption (ton/y)										
CHP	892	892	892	892	892	892	892	892	892	892
Boiler	-	99	281	478	690	918	1,148	1,378	1,609	1,846
- Operating hours (hr/y)										
CHP	7,920	7,920	7,920	7,920	7,920	7,920	7,920	7,920	7,920	7,920
Boiler	-	992	1,606	1,735	1,838	2,039	2,086	2,203	2,218	2,305
Annual Sales (M won/y)										
- CHP										
Electricity	80.8	80.8	80.8	80.8	80.8	80.8	80.8	80.8	80.8	80.8
Heat	182.4	292.4	342.1	381.4	409.2	425.0	439.7	454.5	468.6	478.6
- Boiler(heat)	-	72.4	205.1	348.1	502.7	669.3	836.9	1,004.5	1,172.8	1,345.1
Annual Expenses (M won/y)										
- Labour										
	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
- Woodchip fuel										
CHP	142.7	142.7	142.7	142.7	142.7	142.7	142.7	142.7	142.7	142.7
Boiler	-	15.9	45.0	76.4	110.4	147.0	183.8	220.6	257.5	295.4
- Operational	15.3	25.8	36.4	47.0	57.6	68.1	78.7	89.3	99.9	110.5
- Maintenance	40.3	73.9	107.4	141.0	175.3	208.1	241.7	274.6	308.8	341.7
- Depreciation	50.4	92.4	168.4	252.5	338.2	420.3	504.4	586.5	672.1	754.2
- Interest	16.1	29.6	70.3	117.4	165.4	211.4	258.4	304.4	352.4	398.3
- Tax	-	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-

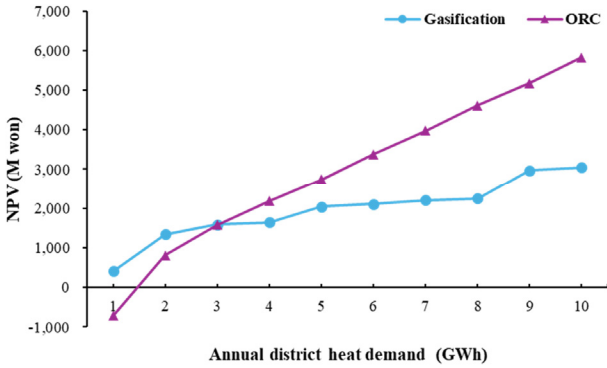


Fig. 6. NPV of heat supply systems using gasification and ORC by annual district heat demand

수익률이 더 높았으며, 그 이후부터는 ORC가 더 경제적인 것으로 나타났다. 특히, 1 GWh 미만의 열수요 규모에서는 ORC 설비의 열 판매율이 매우 낮기 때문에 열 공급 시스템의 경제성이 없는 것으로 분석되었다.

열 공급 시스템의 순현재가치는 가스화의 경우 1 GWh에서 약 403백만 원이었으며, 도입되는 열병합 발전 설비의 용량이 증가하는 열 수요 규모(5 GWh와 9 GWh)에서 순현재가치가 큰 폭으로 상승하는 것으로 나타났다(Fig. 7). ORC는 1 GWh에서 순현재가치가 약 -711백만 원으로 마이너스였지만 2 GWh에서는 약 811백만 원으로 상승하였고, 이후 지속적으로 증가하여 4 GWh 이상의 지역 열수요 규모에서부터는 가스화보다 경제성이 높아지는 것으로 나타났다.

열 공급 시스템의 투자회수기간은 내부수익률과 동일한 경향으로 나타났으며, 열수요 규모 2 GWh에서 가스화 약

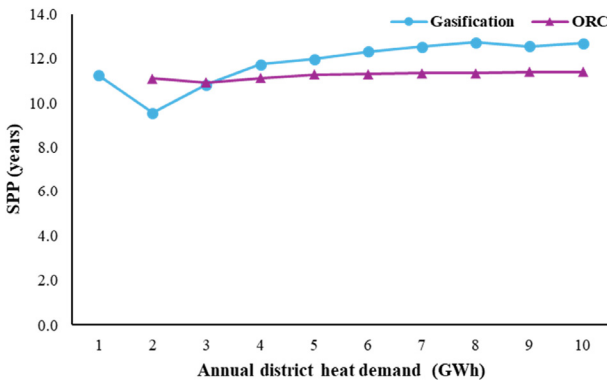


Fig. 7. SPP of heat supply systems using gasification and ORC by annual district heat demand

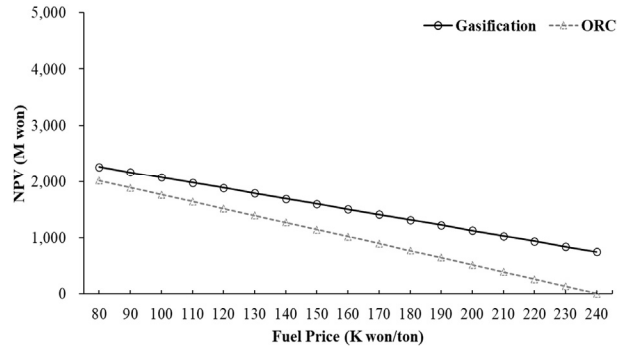


Fig. 8. Sensitivity on NPV of heat supply systems by fuel price change

9.6년, 3 GWh에서 ORC 약 10.9년으로 가장 짧은 것으로 나타났다(Fig. 8).

3.2 경제성 인자에 따른 민감도 분석

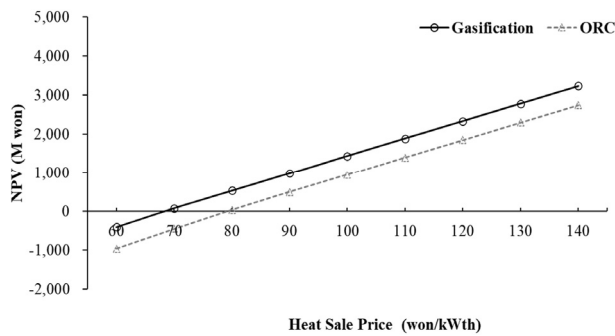
국내 에너지 시장에서는 수요와 공급에 의해 SMP, REC, 열 가격에 지속적인 변동이 발생한다. 열 공급 시스템의 연료인 목재칩 또한 수집 방법, 운송 거리, 연료 품질에 따라 그 가격이 달라지게 된다.^[25] 따라서, 본 연구에서는 수익인자 중 매출 인자인 열판매 가격, SMP, REC가격, REC가중치와 비용 인자인 연료 비용에 대한 열 공급 시스템의 경제성 변화를 분석하였다. 각 인자에 대한 민감도 분석 시, 지역 열수요 규모는 가스화와 ORC 열 공급 시스템 모두 경제성이 가장 높았던 2 GWh(약 100가구)를 기준으로 하였으며 그 외 다른 인자의 가정은 Table 4와 같이 고정하였다.

각각 동일한 50 kWel 규모의 가스화와 ORC 설비를 도입한 열 공급 시스템에서 연료 가격이 10,000원/톤 상승할 때마다 순현재가치는 가스화 약 95백만 원, ORC 약 124백만 원씩 감소하여 ORC가 가스화 열 공급 시스템보다 연료 가격에 의한 영향이 비교적 큰 것으로 나타났으며, 이는 ORC 열 공급 시스템의 연료 소비량이 더 크기 때문인 것으로 사료된다(Fig. 8).

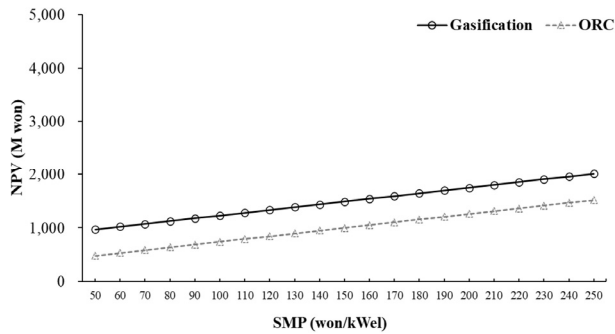
매출 인자에 따른 경제성 민감도 분석 결과, 열, SMP, REC 판매가격의 상승에 따른 열 공급 시스템의 순현재가치는 증가하는 것으로 나타났다. 열, SMP, REC의 판매가격이 각각 10원/kWh 증가할 때마다의 순현재가치 증가량은 가스화와 ORC가 동일한 것으로 나타났으며, 각각 열(약

499백만 원), REC(약 103백만 원), SMP(약 51백만 원)으로 나타났다(Fig. 9).

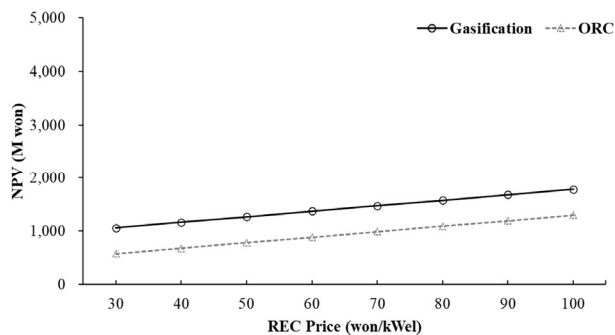
열 공급 시스템에서 열 판매가격 변화에 따른 경제성 변화가 가장 큰 것으로 나타났으며, 특히 가스화는 열 판매가격 70원/kWh_{th}, ORC는 80원/kWh_{th} 이하에서 순현재가치가 0보다 작아 경제성이 없는 것으로 나타났다. SMP의 경우 단위 kWh_{el}당 순현재가치 변화량이 매출 인자 중 가장 낮지만, 최근 3년(2020.01.~2023.01.) 동안의 가격 변화가 최소 49.8원/kWh_{el}, 최대 267.6원/kWh_{el}로 변동 폭



(a) Heat sale price



(b) SMP



(c) REC price

Fig. 9. Sensitivity on NPV of heat supply systems by (a) Heat sale price, (b) SMP, and (c) REC price change

이 가장 컸기 때문에 실제 열 공급 사업 추진에 있어서 주의 깊은 동향 파악이 필요할 것으로 사료된다.

현재 전소설비 기준 미이용 산림바이오매스의 REC 가중치는 2.0이며, 향후 1.5 또는 2.5로 조정될 경우에 대한 경제성 변화를 분석하였다. 열 공급시설의 순현재가치 변화율은 가스화와 ORC가 동일하게 약 189백만 원으로 나타났다(Fig. 10). REC 가중치는 전기 생산량 1 MWh마다 발급되는 REC의 가격(원/REC)에 곱해지기 때문에 매출 인자로서 열 공급 시스템의 경제성에 영향을 미치지만, 그 값이 시장에 의해 형성되는 것이 아니고 법령에 근거하고 있어 변화의 빈도 및 폭이 비교적 낮아 실제 사업의 수익성 예측에 있어 그 중요도는 낮은 것으로 사료된다.^[22]

국내 분산형 열 공급 시스템의 구축은 산림청 주관하에 산림에너지자립마을 조성 사업의 형태로 시행되고 있으며, 정부로부터 20억원 내에서 자본 투자 비용의 50%의 보조금 지원이 이루어지고 있다.

민감도 분석에서는 정부 보조금의 최대 지원가능금액을 고려하지 않고, 지역 열 수요 규모가 2 GWh(약 100가구) 일 때의 정부지원율에 따른 경제성 변화를 분석하였다. 그 결과, 정부지원율이 증가함에 따라 가스화와 ORC 모두 큰 폭으로 경제성이 증가하였으며, 높은 지원율에서 경제성 증가 폭이 더 커지는 것으로 나타났다(Table 9).

향후 산림에너지자립마을 조성 사업은 농·산촌 주민의 난방비 부담 경감, 지역 경제 활성화, 탄소중립 기여 등 다양한 경제적 가치를 창출할 수 있는 잠재력을 지니고 있다. 이러한 사업의 확산 및 지방자치단체의 참여를 촉진하기 위해서는 정부 지원율 상향 조정 정책의 수립을 통한 사업의 경제적 타당성 제고가 필요할 것으로 사료된다.

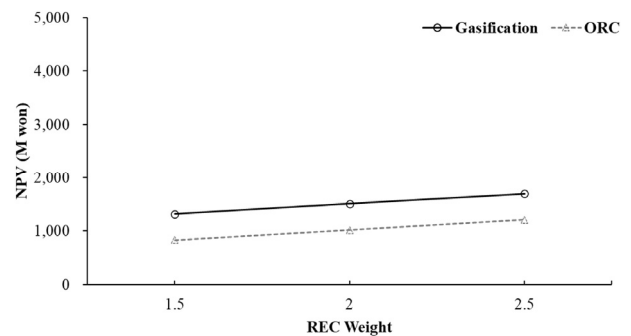


Fig. 10. Sensitivity on NPV of heat supply systems by REC weight change

Table 9. Sensitivity on IRR, NPV, and SPP of heat supply systems by government subsidy ratio change

Government Subsidy Ratio (% of TCI)	Profitability					
	Gasification			ORC		
	IRR (%)	NPV (M won)	SPP (yr)	IRR (%)	NPV (M won)	SPP (yr)
50	10.6	1,335	9.6	8.3	811	11.1
60	13.6	1,694	7.9	11.0	1,176	9.3
70	18.2	2,053	6.1	15.0	1,540	7.3
80	25.7	2,360	4.4	21.3	1,852	5.3

4. 결론

본 연구에서는 산림에너지자립마을 조성에 있어서 지역 열 수요에 맞춘 경제성 있는 분산형 열 공급시설의 구축을 위해 가스화와 ORC 열병합 설비를 도입한 열 공급 시스템의 경제적 타당성 비교 분석을 진행하였다.

열 공급 대상 지역의 연간 열 수요량이 1~3 GWh일 때는 가스화의 경제성이 더 높은 것으로 나타났으나, 4 GWh (약 200가구)이상의 열 수요 지역에서는 ORC 설비가 더 유리한 것으로 나타났다. 이는 ORC 설비의 열 생산 효율이 높아 충분한 열 수요처가 부족할 경우, 저조한 열 판매 비율로 인해 경제성이 낮아지는 것으로 판단되었다. 이를 통해 일반적으로 농·산촌 마을 단위의 가구 수가 50~100가구인 것을 고려한다면, 소규모 분산형 열 공급시설에는 50 kW급 가스화 설비의 도입이 경제적으로 타당할 것으로 분석되었다.

본 연구에서 실시한 경제적 타당성 분석의 가정에서는 자본투자비용에 토지와 시설 건축공사에 대한 비용을 포함하지 않았기에, 현실에서 열 공급시설의 조성에 필요한 투자비 및 운영 경제성과 차이가 있을 수 있다. 다만, 열 추종 방식을 통해 지역 열 수요 규모에 적합한 열병합 및 보일러 설비를 도입한다면 연간 적자를 보지 않는 수준에서 운영이 가능하다는 결과에 주목할 필요가 있다. 산림에너지자립마을은 20년간의 사업기간 동안에는 자본투자비용에 대한 회수가 어려울 수 있지만, 일반적으로 지자체에서 주체하는 사업인 만큼 산촌 주민 및 지역에 기여하는 가치를 복합적으로 고려하여 사업 추진 여부를 판단해야 할 것이다.

열 공급시설의 자본 투자 비용 중 가장 큰 비중을 차지한 항목은 배관설비 비용이었다. 이는 농·산촌 마을의 특성상

가구 간 거리가 멀어 에너지 자립마을 사업 참여 가구 수가 증가할수록 배관 매설 길이 또한 증가하기 때문이다. 본 연구에서는 지역 열 수요 규모를 가구 단위로 환산하였으나, 지역 내 목욕탕, 숙박시설과 같은 근거리 대형 열 수요처를 확보한다면 설비의 자본 투자 비용을 줄이고 열 판매 비율을 높임으로써 높은 열 수요 지역에서도 열 공급시설의 경제성을 제고할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 지방자치단체에서 난방 공급을 위한 열 배관을 사회기반시설(SOC, social overhead capital)로써 개설함으로써 정부 및 운영 주체의 부담을 줄이고 에너지 자립마을 설립을 촉진하는 접근 방식도 고려해 볼 필요가 있다.

열 공급시설의 경제성에 대한 민감도 분석 결과, 연료비용은 240천원/톤 미만에서는 가스화와 ORC 설비 모두 경제성이 있는 것으로 나타났다. 목재칩 연료의 가격은 운송 거리에 영향을 크게 받기 때문에, 열 공급시설의 계획 단계에서 지역 내 미이용 산림바이오매스를 사용한 목재칩 연료의 안정적인 근거리 공급 가능성에 대한 사전검토가 필수적이다. 아울러, 지역 인근에 목재자원화센터의 설립·운영 연계를 통해 연료 공급의 안정성을 확보할 수 있다.

열 판매가격, SMP, REC 가격, REC 가중치가 증가함에 따라 모두 경제성이 높아지는 것으로 나타났으며, 특히 열 판매가격의 영향이 가장 컸다. 가스화와 ORC 열 공급 시스템은 열 판매가격이 각각 70원/kWh, 80원/kWh 미만일 때 경제성이 없는 것으로 나타났다. 한편, SMP가 변동성이 가장 높은 인자이기 때문에, 사업 추진 전 SMP에 위험 요소가 없는지 검토가 필요할 것이다.

산촌 분산형 열 공급 사업의 추진에 있어서 가장 중요한 점 중 하나는 정부의 지원금이다. 본 연구의 결과와 같이 정부의 지원이 있어야만 사업의 경제성이 제고될 수 있으며, 현재 산림에너지자립마을 조성사업에 지원되는 수준을 향후에도 유지 또는 상향 조정할 필요가 있다. 정부의 지원이 계속해서 투입되기 위해서는 현재 조성된 산림에너지자립마을에 대하여 경제성 뿐만 아니라, 지역 산업유발효과, 탄소배출량 저감 효과, 산촌 주민 생활 환경 증진 효과 등 다양한 기능에 대한 평가를 통해 해당 사업의 가치를 제고할 필요가 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 열병합 발전 설비와 보일러를 함께 도입한 열공급 시설에 대하여 경제적 타당성을 분석하였으나,

향후 실제 사업의 추진 시에는 고비용의 열병합 설비 대신 비교적 열 생산 효율이 높은 보일러 설비만을 도입하여 난방을 공급하는 시스템을 함께 고려하여 보다 경제적으로 효율적이고 안정적인 운영이 가능한 방안으로 의사결정을 하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

산림에너지자립마을의 조성은 농·산촌 지역 주민들의 난방비 부담을 줄이고 에너지 자립을 이루는 데 중요한 역할을 할 수 있기 때문에, 향후 산림에너지자립마을 조성 사업의 안정적인 추진 및 확대를 위하여 지속 가능한 정책의 수립이 필요할 것으로 전망된다.

감사의 글

본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구 개발사업 ‘2021351B10-2323-AC03’의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

References

- [1] Korea Rural Economic Institute, 2022, “Agricultural outlook 2022”, <https://library.krei.re.kr/pyxis-api/1/digital-files/78a43b11-16cd-452c-ac44-33e7a3172fc4>.
- [2] Korea Rural Economic Institute, 2023, “Heating conditions of rural residents and policy implications”, <https://library.krei.re.kr/pyxis-api/1/digital-files/1c449259-86e4-4a5e-929e-49cf6aff3ab0>.
- [3] National Institute of Forest Science, 2019, “Strategies for revitalizing mountain villages through the utilization of forest biomass energy: A comparative study of Korea’s forest carbon cycle villages and Japan’s biomass towns”, https://book.nifos.go.kr/detailview.do?MASTER_ID=5814094&ART_ID=0&ART_TYPE=&CHECKIN_NO=0&schoolId=1063001&action=detailView&fix_material_type=&SELECTSORT=ENTRY_DATE&selSorting=DESC.
- [4] IEA Bioenergy, 2019, “Best practise report on decentralized biomass fired CHP plants and status of biomass fired small- and micro scale CHP technologies”, https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2019/05/T32_CHP_Report_01_2019.pdf.
- [5] Korea Forest Service, 2022, “Regulations on the promotion of utilization and dissemination of forest biomass energy”, Korea Forest Service.
- [6] Ministry of Trade, Industry and Energy, 2025, “Guidelines for the management and operation of the renewable energy portfolio standard (RPS) and the renewable fuel standard (RFS)”.
- [7] 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”, *J. Environ. Sci. Int.*, **29**(4), 339-349.
- [8] Vallios, I., Tsoutsos, T., and Papadakis, G., 2009, “Design of biomass district heating systems”, *Biomass and Bioenergy*, **33**, 659-678.
- [9] Korea Rural Economic Institute, 2020, “Policy tasks to use forest biomass as a local energy source”, <https://library.krei.re.kr/pyxis-api/1/digital-files/e49de222-a98b-44cd-8e4f-190d532f4ce3>.
- [10] Min, K., An, H., and Byun, S., 2022, “Economic feasibility of using forest biomass as a local energy source”, *J. Korean Soc. For. Sci.*, **111**(1), 177-185.
- [11] Rentizelas, A., Karellas, S., Kakaras, E., and Tatsiopoulos, I., 2007, “Biomass combustion with ORC for decentralized bioenergy applications: a techno-economic approach”, *Proceedings of the 4th European Conference on Economics and Management of Energy in Industry (ECEMEI)*.
- [12] Braimakis, K., Charalampidis, A., and Karellas, S., 2021, “Techno-economic assessment of a small-scale biomass ORC-CHP for district heating”, *Energy Convers. Manag.*, **247**, 114705.
- [13] Rentizelas, A., Karellas, S., Kakaras, E., and Tatsiopoulos, I., 2009, “Comparative techno-economic analysis of ORC and gasification for bioenergy applications”, *Energy Convers. Manag.*, **50**, 674-681.
- [14] Moon, J.H., Lee, J.W., and Lee, U.D., 2011, “Economic analysis of biomass power generation schemes under renewable energy initiative with Renewable Portfolio Standards (RPS) in Korea”, *Bioresour. Technol.*, **102**(20), 9550-9557.

- [15] Algeri, A., and Morrone, P., 2014, “Techno-economic analysis of biomass-fired ORC systems for single-family combined heat and power (CHP) applications”, *Energy Procedia*, **45**, 1285-1294.
- [16] Hyun, K.S., 2005, “Small-scale combined heat and power and community energy systems (CES) project implementation plan”, *Integrated Energy Industry*, **2**, 52-55. <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=JAKO200574553106481&oCn=JAKO200574553106481&dbt=JAKO&journal=NJOU00415805>.
- [17] National Institute of Forest Science, 2022, “Development of innovative and effective technologies for forest biomass production and supply with mechanized harvesting systems”, https://book.nifos.go.kr/detailview.do?MASTER_ID=5818082&ART_ID=0&ART_TYPE=&CHECKIN_NO=0&schoolId=1063001&action=detailView&csrfToken=.
- [18] Pantaleo, A.M., Camporeale, S., and Fortunato, B., 2015, “Small scale biomass CHP: techno-economic performance of steam vs gas turbines with bottoming ORC”, *Energy Procedia*, **82**, 825-832.
- [19] Pina, E.A., Lozano, M.A., Serra, L.M., Hernandez, A., and Lazaro, A., 2021, “Design and thermoeconomic analysis of a solar parabolic trough - ORC - Biomass cooling plant for a commercial center”, *Solar Energy*, **215**, 92-107.
- [20] Astolfi, M., 2014, “An innovative approach for the techno-economic optimization of organic rankine cycles”, Ph.D. thesis, Politecnico, Milano.
- [21] Korea Forest Service, 2022, “Development of an appropriate model for forest biomass power generation projects by region”, https://www.ntis.go.kr/outcomes/popup/srchTotlRschRpt.do?cmd=get_contents&rstId=REP-2023-01112976650&returnURI=aHR0cHM6Ly93d3cubnRpey5nby5rci9UaFNlYXJjaFJlc3VsdFJlc2VhcmNoUmVwb3J0TGldC5kbz9zb3J0PSZudGlzWW49JnNlYXJjaFdvcmQ9JUVCJUFJGJUI4JUVDJTIEJUI0JUVDTJIBJUE5KyVFQyU4MiVCMCVFQiVBNIQVQyVFQiVCMCU5NCVFQyU5RCVCNCVFQyU5OCVBNCVFQiVBNIQVBNQVQyU4QSVBNCZvcmlnaW5hbFNlYXJjaFdvcmQ9Jm9yaWdpbmFsU2VhcmNoR3VidW49&pageCode=TH_RSCHRPT_RST_DTL.
- [22] 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. Renew. Energy*, **8**(4), 21-29. <http://dx.doi.org/10.7849/ksnre.2012.8.4.021>.
- [23] IRENA, 2024, “Renewable power generation costs in 2023”, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023>.
- [24] Choi, Y.S., Cho, M.J., Mun, H.S., and Oh, J.H., 2022, “Production and fuel properties of wood chips from short-rotation coppice based on harvesting methods”, *J. Agric. Life Environ. Sci.*, **34**(3), 310-325.
- [25] Schnorf, V., Trutnevyte, E., Bowman, G., and Burg, V., 2021, “Biomass transport for energy: Cost, energy and CO₂ performance of forest wood and manure transport chains in Switzerland”, *J. Clean. Prod.*, **293**, 125971.