

친환경에너지타운 내 신재생열에너지 시스템 운영결과 분석

김득원¹ · 허재혁² · 김민휘³ · 이동원^{2†}

¹한국에너지기술연구원 재생에너지연구소 신재생열융합연구실, 기술원

²한국에너지기술연구원 재생에너지연구소 신재생열융합연구실, 책임연구원

³한국에너지기술연구원 재생에너지연구소 신재생열융합연구실, 선임연구원

Operational Result Analysis of Renewable Heat Energy System in Eco-friendly Energy Town

Kim Deukwon¹ · Heo Jaehyuk² · Kim Minwhi³ · Lee Dongwon^{2†}

¹Engineer, Renewable Heat Integration Laboratory, Korea Institute of Energy Research

²Principal Researcher, Renewable Heat Integration Laboratory, Korea Institute of Energy Research

³Senior Researcher, Renewable Heat Integration Laboratory, Korea Institute of Energy Research

†Corresponding author: dwlee@kier.re.kr

Abstract

The eco-friendly energy town of Jincheon is Korea's first renewable energy-based energy self-sufficient town that utilizes multiple renewable energy sources, such as PV, solar thermal, geothermal, and sewage heat to achieve power and thermal energy independence in the unit region. In this study, the thermal energy system of Jincheon, which has been operating since 2017, was analyzed. The thermal energy system consists of a seasonal thermal energy storage connected to approximately 1,600 m² of solar thermal collectors and a midnight thermal energy storage connected to approximately 150 RT heat pumps. Based on data from 2017 to 2020, the heat supply status, expected profits, and greenhouse gas reduction effects of the thermal energy system were analyzed. During the target period, 483 MWh of heating heat, 167 MWh of hot water, and 113 MWh of cooling heat were supplied on an annual average for the last three years. These findings confirmed expected profits of 95.6 million won/yr for hot heat and 1.3 million won/yr for cold heat. In addition, the renewable heat supply resulted in reduction of 156.7 tons of CO₂ eq./yr greenhouse gas.

Keywords: 태양열(Solar thermal), 지열(Geothermal), 하수열(Sewage Heat), 냉난방(Heating and Cooling), 신재생에너지(Renewable Energy), 온실가스(Greenhouse Gas), 계간축열조(Seasonal Thermal Energy Storage)

1. 연구배경

에너지안보와 기후변화는 국가의 에너지 정책을 결정하는 가장 중요한 이슈이며, 오늘날 인류가 직면한 가장 큰 문제 중 하나이기도 한다. 이를 해결하기 위해 주요 국가 간의 다양한 합의가 이루어져 왔으며, 최종에너지소비 중 신재생에너지의 비중확대는 피할 수

OPEN ACCESS



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.41, No.2, pp.51-62, April 2021
<https://doi.org/10.7836/kjes.2021.41.2.051>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 9 March 2021

Accepted: 9 April 2021

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

없는 시대의 흐름이 되었다. 신재생에너지의 보급확대를 위한 노력이 유럽의 선진국을 중심으로 다양한 정책들이 시행되고 있으며, 태양광, 풍력 뿐만 아니라 고체바이오연료, 태양열에너지, 미활용에너지 등의 공급확대로 신재생에너지의 비중이 비약적으로 늘어나고 있다.

2018년을 기준으로 최종에너지공급량 중 54.7%가 열에너지로 활용되고 있고, 이중 상당량은 냉난방에너지 형태로 활용되고 있다¹⁾. 이는 열에너지의 탈탄소화는 기후변화 및 에너지안보를 위한 중요한 바탕이 될 수 있음을 의미한다. 이미 유럽에서는 독일의 RHO제도, 영국의 RHI제도, 프랑스의 Heat fund 등의 신재생열에너지 의무화제도를 도입하여 신재생열에너지의 보급을 확대하고 있고, 독일, 오스트리아, 덴마크 등 유럽의 선진국을 중심으로 태양열, 지열, 폐열 등을 활용한 지역난방시스템이 에 보급되어 다양한 신재생열 에너지를 활용하여 온실가스 저감을 위해 노력을 하고 있다. 또한, 이미 여러 연구에서 다양한 신재생열원이 적용된 열에너지 시스템의 열성능을 확인하였다. Xu et al.²⁾는 공장의 미활용열원과 태양열과 결합된 BTES 시스템의 열성능을 분석하였으며, Shah et al.³⁾는 태양열집열기, 지열원 히트펌프가 결합된 BTES 시스템의 구조적 특성에 따른 열성능을 분석하였다. Besagni et al.⁴⁾는 태양열과 공기열원 등 이중열원을 사용하는 히트펌프시스템의 운전결과를 분석하였고, Chen et al.⁵⁾는 PVT와 지열원 히트펌프 결합시스템을 통한 온실가스절감효과와 운영비용 절감효과를 분석하였으며, Dong et al.⁶⁾는 태양열, 바이오매스 에너지와 결합된 히트펌프 시스템의 열성능을 분석하였다. 이처럼 신재생열에너지원은 주로 태양열 집열기 및 히트펌프 등의 열원설비를 통해 에너지를 생산하여 축열조에 에너지를 저장하는 방식으로 에너지시스템이 구성된다.

국내에서도 신재생열 에너지를 활용한 지역난방공급의 몇몇 사례들이 존재하며, 그중 대표적인 성공사례로 진천 친환경에너지타운이 있다. 진천 친환경에너지타운은 국내 최초로 시행된 태양광, 태양열, 지열, 수열 등 다양한 신재생에너지가 융복합 된 에너지 자립마을이다. 이전 연구⁷⁾에서 진천 친환경에너지타운의 태양광발전시스템의 운영결과에 대해서 분석하였다. 연구결과 진천 친환경에너지타운 내 850 kW 급 태양광 발전시스템을 통해 연평균 494.7 톤(CO₂ eq.)의 이산화탄소가 저감되고 있음을 확인하였다. 전기에너지 뿐만 아니라 열에너지도 2017년부터 친환경에너지타운 인근의 공공건물에 냉열(냉방) 및 온열(난방, 급탕)을 공급해주고 있다. 본 연구에서는 2017년부터 운영 중인 진천 친환경에너지타운 내 신재생열에너지시스템의 4년간 운영데이터를 기반으로 열공급 현황, 기대수익, 온실가스저감효과를 분석하고자 한다.

2. 시스템 개요

진천 친환경에너지타운 내 열원설비는 두가지 축열조를 중심으로 구성되어있는데, 태양열 집열기와 결합된 계간축열조와 지열, 하수열, 계간축열조의 잔열을 열원으로한 히트펌프와 연계된 심야축열조로 구성되어 있다. 계간축열조는 4,000 톤 규모로 진공관형 집열기 808 m², 평판형집열기 798 m² 등과 결합되어 봄부터 여름까지 남는 열에너지를 계간축열조에 저장해 겨울철 난방열 및 급탕열을 공급하고 있다. 심야축열조는 난방기간 계간축열조의 보조열원으로 활용되어 계간축열조에서 난방으로 공급될 수 있는 열이 소진되었을 경

우 난방열을 공급해주고 있으며, 여름철 일부 공공건물에 냉방열을 공급하고 있다. 심야축열조는 약 200 톤 규모이며, 50 RT 히트펌프 3대가 직렬로 연결되어 있고, 상대적으로 전력요금이 저렴한 심야시간에 히트펌프를 통해 축열된 열을 주간시간대에 공급하고 있다. 주요설비에 대한 제원 및 시스템 개념도는 각각 Table 1, Fig. 1과 같다.

Table 1 Specification of thermal system

Category	Specification
Geothermal/Water source Heat pump	Geothermal HP : 175 kW × 1 (R410a) Water source HP : 181 kW × 2 (R134a) Geothermal hole : 150 m × 24 hole
Solar thermal collector	Flat plate : 399 ea (798 m ²) Evacuated tube : 198 ea (808 m ²)
Seasonal thermal energy storage	Double wall structure, Stainless lining 4,000 m ³ (24.7 m × 16.7 m × 10.3 m)
Block heating system	Circulation pump 13 ea, Heat exchanger 5 ea, Expansion tank 3 ea, Header 2 ea, Piping
Midnight thermal energy storage	Located in management center wall area, 200 m ³

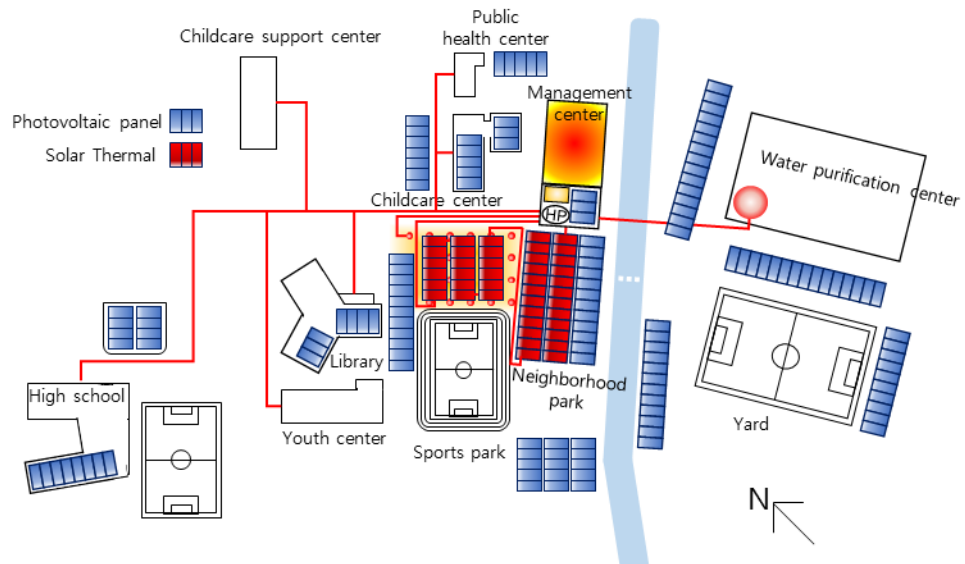









Fig. 1 Schematic diagram of Jincheon eco-friendly energy town

각각의 축열조에 저장된 열은 인근에 있는 7개의 공공건물로 열에너지를 공급하고 있으며, 공공건물의 주요 제원은 Table 2와 같다.

Table 2 Specification of public building in Jincheon eco-friendly energy town

Category							
	Highschool	Library	Public health center	Childcare center	Management center	Youth center	Childcare support center
Gross area (m ²)	10,432	1,986	598	916	387	1,460	998
Floor	1 st basement 4 th floor	1 st basement 1 st floor	2 nd floor	1 st floor	1 st basement 1 st floor	2 nd floor	2 nd floor
Building area (m ²)	3,872	1,565	279	916	319	730	499

3. 연구방법

진천 친환경에너지타운의 열공급 현황분석을 위해 주요 열원설비들의 입출구 배관에 온도, 압력, 유량센서 등을 설치하였고, 외기환경측정을 위해 일사계 및 외기온습도센서를 설치하여 30 초 단위로 데이터를 측정하고 있다. 측정센서에 대한 제원은 Table 3과 같으며, 측정센서도는 Fig. 2와 같다.

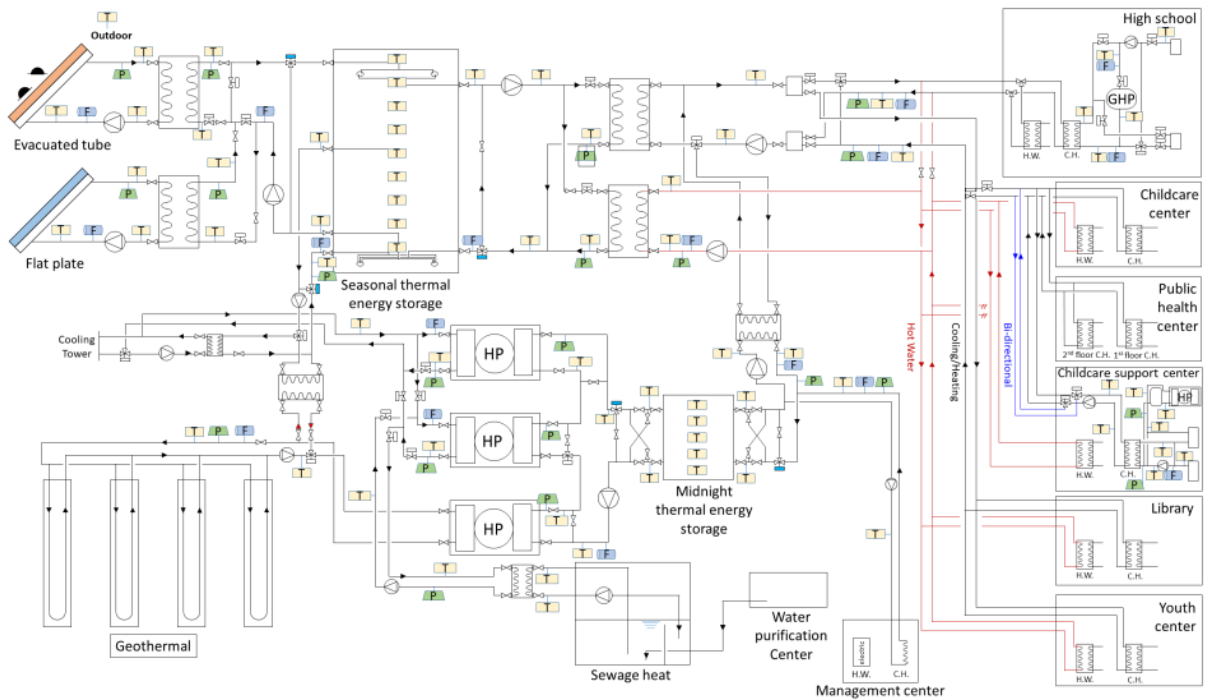


Fig. 2 Measurement sensor diagram

Table 3 Specification of measurement sensor

Category	Model	Specification	Quantity
Temperature	RTD pt100 transmitter	(-10 ~ 100) °C	57
	RTD 3wire		11
	RTD pt1000		5
Pressure	Sensys PSCH0006K	(0 ~ 6) bar accuracy ±0.25% FS	21
Solar radiation	Kippen & Zonen	CMP11	2
Flow	Toshiba LF620	accuracy	17
		Vs > 0.5 m/s ±0.3% of rate Vs < 0.5 m/s ±0.4% of rate	
Outdoor Temperature	GOTH-1420/pt1000	(-35 ~ 80) °C	1

4. 성능측정결과 및 분석

친환경에너지타운 내 설치된 측정센서로 연간 외기환경, 열생산 및 공급량, 축열조 내부온도 등을 측정하였으며, 이를 통해 주요 열설비들의 성능 및 열공급 현황 등을 확인하였다. 월별 외기환경데이터, 태양열 시스템의 운영현황, 열공급 현황 등은 부록에 표기하였으며, 주요 내용은 다음과 같다.

4.1 외기환경

진천 친환경에너지타운의 수평면일사량, 경사면일사량, 외기온도 등을 측정하여 외기조건을 확인하였다. Table 4는 분석대상기간의 계절별 외기환경데이터로, 진천 친환경에너지타운의 여름철(6월 ~ 8월) 외기온도는 연평균 28.6°C로 분석대상기간 표준편차 0.8°C로 측정되어 연도별 측정온도가 비슷한 수준으로 유지되었으나, 겨울철(11월 ~ 2월) 평균 외기온도는 2017년 2.4°C, 2018년 2.1°C, 2019년 4.1°C, 2020년 4.8°C로 측정되어 평균기온은 증가하였다.

Table 4 Seasonal outdoor temperature in Jincheon eco-friendly energy town

(Unit : °C)

	Spring (3 ~ 5)	Summer (6 ~ 8)	Fall (9 ~ 10)	Winter (11 ~ 2)
2017	15.5	28.1	20.3	2.4
2018	15.9	29.8	19.0	2.1
2019	15.0	28.3	21.5	4.1
2020	14.7	28.3	19.9	4.8

수평면일사량과 태양열집열기와 동일한 각도인 30°로 기울어진 경사면 일사량으로 일사조건을 확인하였다. 수평면일사량 및 경사면 일사량 의 연평균 총량은 각각 1,596.8 kWh/m², 1,714.2 kWh/m²로 측정되었다. 수평면 일사량과 경사면 일사량 값은 각각의 표준편차는 38.3 kWh/m², 35.5 kWh/m²로 계산되었으며, 일사량은

분석대상기간 중 낮은 편차로 유지되었다.

4.2 태양열시스템 운영현황

(1) 태양열 집열기

진천 친환경에너지타운 내 태양열 집열시스템은 두 가지 종류의 집열기로 구성된 이중집열구조⁸⁾로 이루어져 있는데, 이는 평판형집열기로 1차적으로 승온한 뒤 진공관형 집열기로 2차로 승온하여 계간축열조를 축열하는 구조이다. 태양열집열기는 열교환기로 계통이 분리되어있으며 열교환기 1차측을 집열부, 2차측을 생산부로 나누어 데이터를 측정하고 있다.

태양열 집열기의 월평균 생산효율은 Fig. 3과 같다. 생산효율은 열교환기 2차측의 생산부분의 열량을 경사면 일사량 값으로 나뉜 비율을 의미하며, 동일한 집열기일 경우 집열기의 입구온도가 낮을수록 높은 일사조건에서 정상상태로 운전되는 시간이 길수록 생산효율은 상승한다. 즉, 계간축열조 하부의 온도가 낮고, 날씨가 청명할수록 집열기의 생산효율은 상승하게 된다. 봄철은 집열기 평균입구온도가 50.2°C로 가장 낮으며, 일사량도 월평균 171.5 kWh/m²로 가장 높아 태양열 집열기의 평균생산효율이 33.8%로 가장 높게 측정되었다. 가을철의 경우 겨울철보다 일사조건이 좋음에도 불구하고 계간축열조의 온도상승으로 인해 집열기 평균입구온도가 80.0°C로 측정되어 생산효율은 연중 가장 낮은 21.9%로 측정되었다.

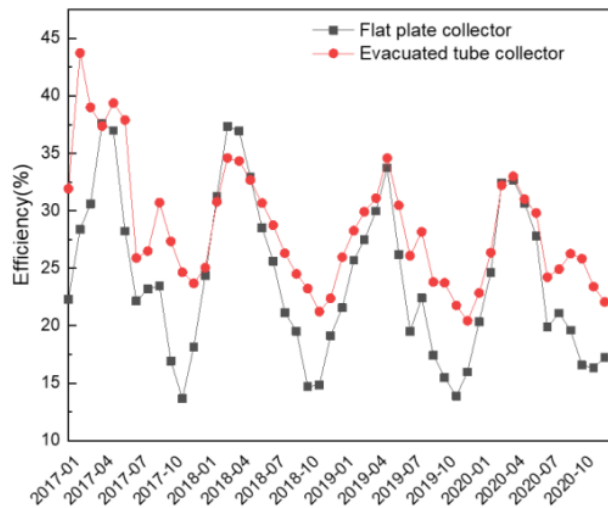


Fig. 3 Production Efficiency of flat plate and evacuated tube collector

평판형 집열기의 연평균 생산효율은 2017년부터 2020년까지 차례대로 26.2%, 26.2%, 23.4%, 24.3%로 측정되었으며, 진공관형 집열기의 연평균 생산효율은 33.2%, 28.4%, 27.8%, 27.5%로 측정되었다. 2017년 운전 초에는 계간축열조의 하부온도가 26°C로 가장 낮았고, 집열시스템이 상대적으로 최적의 상태로 유지되었다. 입구온도와 일사량 외에도 집열기의 유지보수상태에 따라 생산효율은 변화될 수 있다.

(2) 계간축열조

계간축열조는 종방향 9개구간의 온도를 측정하고 있으며, 분석대상기간의 구간별 온도 및 평균온도는 Fig. 4와 같다. 2017년 1월 1일 하부 최저온도 23.9°C를 시작으로 4번의 주기를 순환하였으며, 2019년 10월 1일 상부 최고온도가 90.3°C로 측정되었다. 2017년 4월경에는 계간축열조의 냉각운전으로 온도가 하강하였으며, 같은 해 8월경에는 시수가 유입되어 계간축열조의 온도가 낮게 측정되었었다. 운전 초인 2017년 4월과 8월경을 제외하고 봄 ~ 가을철 축열로 인한 온도상승, 겨울철 방열로 인한 온도하강의 규칙적인 주기로 계간축열조가 운영되고 있다.

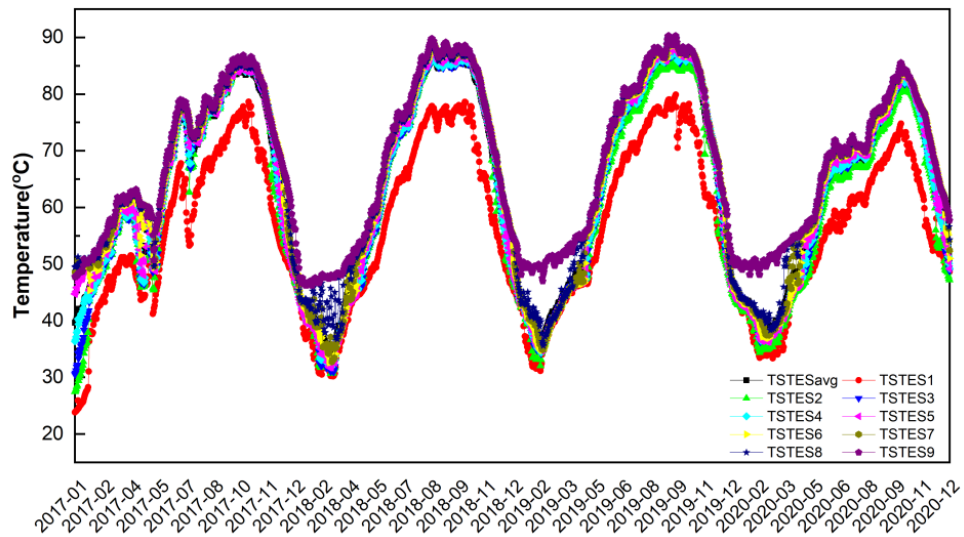


Fig. 4 Temperature of STES by section

4.3 열공급 현황

진천 친환경에너지타운 내 계간 및 심야축열시스템에서 현재 총 7개의 공공건물에 열을 공급하고 있다. 초기에는 열부하가 적었으나 순차적으로 정상적인 운영이 시작되면서 열부하가 증가하였다.

진천 친환경에너지타운의 열수요처는 냉/난방기간 및 연도별로 상이하다. 고등학교와 육아종합지원센터는 각각 흡수식냉온수기와 지열HP 등 자체 냉난방이 가능한 열원기기가 구성되어있어 난방기간에는 중앙기계실에서 육아종합지원센터를 제외한 6개의 공공건물에 열을 공급하고, 냉방기간에는 학교 및 육아종합지원센터를 제외한 5개의 공공건물에 열을 공급하고 있다. 또한, 2019년부터는 친환경에너지타운에서 고등학교 및 육아종합지원센터의 열원설비와 중앙기계실의 축열시스템 간의 양방향 열거래실험이 진행되어, 해당 기간에는 중앙기계실에서 공급된 냉난방열량이 감소되었다. 년도별 열공급 현황은 Table 5와 같다.

Table 5 Yearly heat supply amount

(Unit : MWh)

Year	Central supply			Bidirection heat transaction	
	Heating	Hot water	Cooling	Heating	Cooling
2017	306.4	78.2	106.9	0	0
2018	508.3	123.6	160.3	0	0
2019	468.5	112.9	187.6	35.2	33.5
2020	472.2	102.6	152.9	47.5	55.3

2017년도에는 일부 건물의 미운영으로 전체적인 열부하는 감소하였으며, 2019년과 2020년은 양방향 열거래실험으로 중앙기계실에서 공급된 냉난방열량이 감소하였다.

4.4 기대수익 및 온실가스저감효과

진천 친환경에너지타운에서 신재생에너지를 통해 인근 공공건물에 공급한 냉/온열량을 기준으로 기대수익과 온실가스저감량을 계산하였다. 열공급량에 따른 기대수익은 난방기간의 경우 도시가스가 공급되고 있지 않는 친환경에너지타운의 특성상 LPG가스보일러를 사용하였을 경우 가스절감비용⁹⁾으로 계산하였고, 냉방기간에는 시스템에어컨을 정격으로 운전하였을 경우 전력량요금 절감비용을 계산하였다.

온실가스저감량은 온열의 경우 LPG절감량, 냉열의 경우 전력절감량을 계산하여 각각에 대한 지구온난화지수가 고려된 온실가스절감량(ton CO₂ eq.)값을 계산하였다.

(1) 기대수익

온열공급량에 대한 기대수익은 식(1)의 LPG절감량에 LPG단가 1,832 원/kg과 부과세 10%가 더해진 값으로 계산된다.

$$LPG\ 절\ 감\ 량 = \frac{\text{온열공급량}(kWh)}{\text{보일러효율}(\%)} \times 860 \left(\frac{kcal}{kWh} \right) \times \frac{1}{LPG\ 열\ 량} \left(\frac{kg}{kcal} \right) \quad (1)$$

이때, 보일러효율은 90%, LPG열량값은 12,000 kcal/kg으로 가정하여 계산하였다.

냉열 공급량에 대한 기대수익은 정격 냉방능력 9,000 W일 때 정격 소비전력이 2,900 W인 시스템 에어컨¹⁰⁾을 기준으로 냉방공급량에 따른 소비전력량은 계산하였으며, 소비전력량 계산식은 식(2)와 같다.

$$\text{소비전력량} = \text{냉방공급량}(kWh) \times \frac{\text{시스템에어컨 정격소비전력}(W)}{\text{시스템에어컨 정격냉방능력}(W)} \quad (2)$$

이때 계산된 소비전력량은 저압 일반용 전력(갑)의 전력요금제를 적용하여 부과세 10%와 전력발전기금 3.7%가 더해진 값으로 전력량요금 절감비용을 계산하였고, 계절별 전력량요금은 여름철 105.7 원/kWh, 봄가을철 65.2 원/kWh과 같다.

2017년부터 2020년까지 진천 친환경에너지타운에서 공급한 냉/온열량에 따른 기대수익은 Table 6과 같다.

Table 6 Expected Earnings of heat supply (Unit : million won)

Year	Hot heat supply	Cold heat supply
2017	61.71	0.89
2018	101.40	1.31
2019	93.30	1.48
2020	92.24	1.19

(2) 온실가스저감효과

온실가스 저감효과는 기대수익에서 계산된 LPG와 전력량 절감에 따른 온실가스저감량을 계산하였다. LPG의 온실가스절감량은 산출된 LPG 발열량(TJ)을 기준으로 온실가스 배출계수¹¹⁾와 지구온난화지수를 곱하여 이산화탄소환산량(CO₂ eq.)값을 계산하였다.

전력량 절감에 따른 온실가스절감량은 절감된 전력량에 전력량배출계수값 0.45941¹²⁾을 곱하여 이산화탄소 환산량을 계산하였으며, 진천 친환경에너지타운에서 연평균 열공급량에 따른 CO₂발생량(전력량배출계수값 0.4567)을 기준으로 우리나라 대표수종인 30년생 소나무숲 1 ha가 흡수하는 이산화탄소량과 2등급승용차가 연간 배출하는 이산화탄소량을 비교하였다¹³⁾. 2017년부터 2020년까지 온실가스저감효과는 Table 7과 같다.

Table 7 Effect of greenhouse gas reduction

Year	LPG (m ³)	Electricity (kWh)	Greenhouse gas (ton CO ₂ eq.)	Pine grove (ha)	Passenger car (ea)
2017	16,463	8,295	101.1	9.34	42
2018	27,053	12,434	165.6	15.30	68
2019	24,891	14,557	153.8	14.21	63
2020	24,607	11,860	150.9	13.94	62

5. 결론

진천 친환경에너지타운은 신재생에너지 융복합 이용을 통한 에너지자립마을이다. 정상적 운영이 된 18년 이후 3년간 태양열, 지열, 수열 등의 신재생에너지 융복합 시스템 운영의 주요내용은 아래와 같다.

(1) 해당기간 중 총 온열공급량은 1788.1 MWh이며, 냉열공급량은 500.7 MWh이다.

- (2) 온열공급량 중 난방열량은 온열공급량의 81.0%인 1449.1 MWh이며, 나머지 19.0%인 339.0 MWh는 급탕열량이다.
- (3) 급탕열량은 전부 태양열시스템(계간축열조)에서 공급되었으며, 난방공급량 중 62.4%는 태양열 시스템에서 공급되었고, 나머지 37.6%는 히트펌프시스템(심야축열조)에서 공급되었다.
- (4) 따라서 온열 공급량 중 태양열 시스템의 직접 이용비율은 69.6%인 1243.8 MWh이다.
- (5) 히트펌프를 이용한 난방 열량 중 승온용 히트펌프의 증발열원으로 사용된 357.6 MWh는 태양열 시스템에서 생산된 열량이므로, 온열공급량 중 태양열 시스템의 총 분담율은 89.6%이다.
- (6) 이를 통한 온실가스 저감효과는 연평균 156.7 톤이며, 이는 30년생 소나무 숲 14.5 ha가 연간 흡수하는 이산화탄소량과 같고, 2등급 승용차가 64 대가 연간 배출하는 이산화탄소량과 같은 값이다.
- (7) 신재생에너지열공급량은 LPG보일러 사용시 연평균 95.6 백만원의 연료비용을 절감할 수 있으며, 전력량 요금은 연평균 1.3 백만원을 절감할 수 있다.

열에너지의 경우 친환경에너지타운에서 필요한 에너지를 전부 신재생에너지로 공급하고 있지만, 전력의 경우 수요량은 계통전력에서 사용하고 발전량은 판매하는 방식으로 에너지를 소비하고 있다. 다음 연구에서는 진천 친환경에너지타운에서 소비되는 총 소비전력량을 고려하여 ESS와 결합된 태양광발전시스템에서의 적정 ESS 용량을 확인하여 진천 친환경에너지타운의 전력과 열 모두 독립된 마을을 설계 가능성을 확인하려한다.

진천 친환경에너지타운은 신재생에너지를 통한 열 및 전력생산으로 단위지역의 연평균 651톤(CO₂ eq.)의 온실가스를 절감하고 있다. 탄소중립사회 및 기후변화시대에 진천 친환경에너지타운과 같은 신재생에너지와 결합된 분산형 에너지시스템의 보급확대는 저탄소 녹색성장을 위한 보다 능동적인 생태계 구축에 기여할 것으로 예상된다.

후기

본 연구는 에너지기술평가원의 에너지기술개발사업의 연구지원을 받아 수행되었음(과제번호 : 2018201060010A).

REFERENCES

1. Korea Energy Economics Institute, Yearbook of Energy Statistics, 2019.
2. Xu, L., Torrens, J. I., Guo, F., Yang, X., and Hensen, J. K. M., Application of Large Underground Seasonal Thermal Energy Storage in District Heating System: A Model-based Energy Performance Assessment of a Pilot System in Chifeng, China, Applied Thermal Engineering, Vol. 137, pp. 319-328, 2018.
3. Shah, S. K., Aye, L., and Rismanchi, B., Seasonal Thermal Energy Storage System for Cold Climate Zones: A Review of Recent Developments, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 97, pp. 38-49, 2018.
4. Besagni, G., Croci, L., Nesa, R., and Molinaroli, L., Field Study of a Novel Solar-assisted Dual-source

- Multifunctional Heat Pump, *Renewable Energy*, Vol. 132, pp. 1185-1215, 2019.
5. Chen, Y., Hua, H., Wang, J., and Lund, P. D., Integrated Performance Analysis of a Space Heating System Assisted by Photovoltaic/Thermal Collectors and Ground Source Heat Pump for Hotel and Office Building Types, *Renewable Energy*, Vol. 169, pp. 925-934, 2021.
 6. Dong, Z., Bingyang, L., Qintong, Z., and Jinping, L., Thermal Performance and Energy Characteristic Analysis of Multiple Renewable Energy Complementary Heat Pump System, *Solar Energy*, Vol. 196, pp. 287-294, 2020.
 7. Kim, D. W., Heo, J. H., Kim, M. H., and Lee, D. W., Operational Result Analysis of 850 kW Photovoltaic System in Eco-friendly Energy Town, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 41, No. 2, pp. 25-37, 2021.
 8. Lee, D. W., Heo, J. H., and Kim, M. H., A Different Kind of Solar Thermal Collector, Patent Registration Number 10-1901289.
 9. Energy price comparison, <https://www.ccbgas.co.kr/info/info04.do>, 2019 (Accessed 2021.02.21.).
 10. LG System Air Conditioner (TW0901M2SR), Rated Power Consumption.
 11. The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006.
 12. Korea Environment Corporation, Climate Change & Carbon Market, ETS Insight, Vol. 18, 2020.
 13. Korea Forest Service, Standard Carbon Sequestration of Major Tree Species, 2012.

부록

Table 1A Outdoor temperature

(Unit : °C)

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Ma.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
2017	0.4	2.4	8.3	16.0	22.3	25.9	29.8	28.7	23.1	17.5	6.9	0.0
2018	-1.8	0.1	10.3	15.9	21.4	26.5	31.3	31.5	23.6	14.4	9.2	0.9
2019	0.3	2.9	9.1	14.2	21.7	25.5	29.0	30.3	24.8	18.3	9.8	3.3
2020	3.7	4.8	9.8	13.0	21.4	27.4	27.2	30.2	23.9	15.9	9.3	1.1

Table 2A Solar radiation quantity (Horizontal/Inclined)

(Unit : kWh/m²)

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Ma.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
2017	81.4	112.6	143.7	152.7	194.8	188.0	123.9	141.4	141.8	110.4	88.0	85.5
	106.2	136.5	162.3	160.2	191.3	177.7	117.4	142.8	156.2	132.6	108.6	115.8
2018	83.3	109.6	143.2	163.1	179.1	189.1	187.0	162.4	141.7	120.5	86.0	83.5
	113.6	133.5	155.4	165.2	172.3	176.0	180.2	159.5	150.1	138.4	107.4	112.8
2019	95.5	102.8	136.3	153.3	215.4	185.4	152.6	167.3	118.7	115.5	88.3	71.9
	123.7	123.0	148.6	155.6	207.8	173.4	142.5	166.2	124.8	134.2	110.5	93.7
2020	76.4	98.4	156.2	191.4	180.0	179.3	134.4	126.6	130.8	128.0	84.4	85.5
	95.8	120.1	172.6	195.7	171.4	164.4	124.1	123.6	138.9	150.9	108.2	115.0

Table 3A Seasonal Thermal Energy Storage heat supply amount (heating/hot water)

(Unit : kWh)

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Ma.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
2017	3,497	27,135	41,073	33,235	7,575	0	0	0	0	9,793	61,097	92,344
	19	146	1,707	2,262	3,459	5,721	7,667	14,146	13,650	10,071	9,272	10,066
2018	46,939	9,252	15,207	43,026	10,908	0	0	0	0	12,637	66,237	91,987
	6,311	5,685	4,888	3,766	10,377	17,698	19,420	18,919	16,458	9,065	4,502	6,461
2019	47,735	8,166	24,530	44,991	5,708	0	0	0	0	6,406	6,5671	101,440
	7,553	5,879	5,218	4,523	19,548	12,410	12,069	10,265	5,856	16,365	5,815	7,386
2020	27,446	13,909	17,761	48,206	19,858	0	0	0	0	22,055	63,723	90,916
	5,085	4,451	5,007	3,899	7,201	37,135	19,511	4,438	3,648	4,258	3,928	4,044

Table 4A Midnight Thermal Energy Storage heat supply amount (heating/cooling)

(Unit : kWh)

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Ma.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
2017	18,767	2,063	237	36	2,128	0	0	0	0	0	115	7,260
	0	0	0	0	2,852	20,511	32,303	31,838	16,469	2,946	0	0
2018	54,280	88,374	65,595	1,792	181	0	0	0	0	87	377	1,470
	0	0	0	0	9,022	26,224	42,500	50,816	25,616	6,079	0	0
2019	46,744	60,388	48,068	7,310	148	0	0	0	0	0	263	956
	0	0	0	0	18,399	30,043	42,977	50,761	27,812	17,630	0	0
2020	51,335	64,627	46,791	4,732	44	0	0	0	0	0	0	775
	0	0	0	0	8,121	28,873	30,927	36,865	37,652	10,426	0	0