



계절 간 열저장과 지역난방 환수 열 히트펌프를 통합한 농촌 마이크로 열 그리드 운영 모델에 관한 연구

임용훈*

An Integrated Operation Model for Rural Micro-Thermal Grids incorporating Seasonal Thermal Energy Storage and District Heating Return Water Heat Pumps

Yong Hoon Im*

Received 26 September 2025 Revised 17 December 2025 Accepted 23 December 2025 Published online 28 January 2026

ABSTRACT This study proposes an integrated operation model for a microthermal grid that combines building and greenhouse demands near existing district heating networks. Unlike previous studies that have focused on urban buildings, the present study addresses rural communities with greenhouse loads, which are characterized by high seasonal variability. The simulation results indicate that seasonal thermal energy storage combined with solar heat can reduce primary energy consumption by up to 48%, depending on the solar collector area. Furthermore, integration of district heating return water-based heat pumps provides an additional 5–8% reduction, demonstrating the potential of the model as a low-carbon alternative for rural energy systems. The findings highlight the technical feasibility and policy relevance of interconnected thermal grids in rural areas.

Key words Seasonal heat storage and utilization(계절 간 열저장·이용), District heating return water based heat pump(지역난방 회수 열 기반 히트펌프), Interconnected operation of thermal grids(열 그리드 간 연계 운영), Solar thermal energy(태양열 에너지), Agricultural community(농촌 커뮤니티)

Nomenclature

E_{HAC} : instantaneous stored heat in seasonal thermal storage tank, Wh

$E_{HAC,M}$: maximum instantaneous stored heat in seasonal thermal storage tank, Wh

h_f : frictional head loss, m

Q_{rad} : solar radiation heat gain, Wh

Q_{rf} : heat loss through greenhouse roof, Wh

Q_{fl} : heat exchanged with soil, Wh

Q_{sw} : lateral heat loss, Wh

Q_{vt} : heat exchanged during ventilation, Wh

Q_{SST} : surplus solar thermal energy, Wh

Q_{Load} : building heating demand (load), Wh

Q_{Loss} : heat loss from thermal storage tank, Wh

Professor, Department of Mechanical System Engineering,
Sookmyung Women's University

*Corresponding author: iyh@sookmyung.ac.kr

Tel: +82-2-710-9489

Fax: +82-2-2077-7863

Q_{in} : heat inflow into the space, Wh
 Q_{out} : heat outflow from the space, Wh

Subscript

CHP : cogeneration heat and power
 COP : coefficient of performance
 DH : district heating
 DHN : district heating network
 RT : refrigerating ton
 SPF : seasonal performance factor
 STES : seasonal thermal energy storage
 SOC : state of charge

1. 서론

스마트팜 보급 확대에 따라 시설원예는 점차 집적화되고 대규모화되는 추세에 있다. 이에 따라 기존의 개별 온실별 열 공급 모델에서 벗어나, 열 그리드 기반의 중앙집중형 또는 분산형 열 공급 모델로의 전환이 요구되고 있다. 지역난방 네트워크(District Heating Network, DHN)는 그동안 도심 내 공동주택, 업무·상업용 건물과 같은 대규모 수요처를 중심으로 운영되고 있다.^[1] 그러나 최근 기후변화로 인한 냉방수요 증가와 정부의 분산 에너지 보급 확대 정책^[2]에 힘입어, 도심 외곽 및 농촌 지역에서도 다양한 신규 열 수요가 부각 되고 있다.

특히 스마트팜을 포함한 농촌 온실 부하는 잠재적인 냉방 부하가 난방 부하 대비 3~4배 이상으로 매우 크기 때문에, 도심 건물에서 일반적으로 적용되는 터보식 냉방방식 만으로는 대응이 어렵다. 또한 작물의 종류에 따라 요구되는 열 공급 온도 범위가 다양하여, 표준화된 온도 조건을 전제로 한 도심 건물용 중앙집중형 3세대 지역난방 모델과는 다른 설계 접근이 필요하다.^[3] 더불어 도심지와 달리 농촌 지역은 부지 확보가 쉬워, 대용량 축열조를 포함한 분산형 계절 간 축열 시스템(Seasonal Thermal Energy Storage, STES)을 적용할 수 있는 여건을 갖추고 있어, 이러한 차별적 조건을 고려한 운전 및 설비 최적화 전략 수립이 가능하다.

이러한 맥락에서 계절 간 열 저장·이용은 여름철 잉여 태

양열을 겨울철 난방과 온실 가온에 활용함으로써 계절적 부하 불균형을 완화할 수 있는 핵심 기술로 주목받고 있다.^[4] 또한 태양열 집열 시스템과 회수 열 기반 히트펌프와의 결합은 기존 화석연료 보일러 대비 에너지 효율 향상과 온실가스 저감 효과를 동시에 기대할 수 있다.^[5]

지금까지의 연구는 주로 도시 건물 부하를 대상으로 STES 및 히트펌프 적용 타당성을 검토해 왔으며, 열 공급 효율화와 탄소 감축 가능성을 제시하였다.^[6,7] 그러나 농촌 지역을 중심으로 한 신규 열 수요, 특히 온실 부하를 포함하는 마이크로 열 그리드 운영 모델에 관한 연구는 여전히 미흡하다. 농촌 커뮤니티는 건물과 온실 부하를 동시에 고려해야 하는 복합적 특성을 가지며, 이를 대상으로 한 실증적·시뮬레이션 기반 연구가 매우 부족하다는 점에서 연구 공백이 존재한다.

국제적으로도 EU Green Deal, IEA 보고서 등에서 분산형·저온 열 공급 모델 확산의 필요성을 강조하고 있으나, 농촌 커뮤니티와 같은 비도시 지역을 대상으로 한 연구는 제한적이다. 이에 본 연구는 건물과 온실 부하를 아우르는 농촌 커뮤니티를 대상으로 열 그리드 연계 운영 모델을 제안하고, 기존 지역난방 네트워크 플랫폼과의 통합을 통해 얻을 수 있는 편익을 시뮬레이션으로 분석하였다. 구체적으로는 ① 태양열 집열 시스템, ② 계절 간 열 저장·이용(STES), ③ 지역난방 회수 열 기반 히트펌프를 적용하여 독립형 운영과 연계형 운영의 성과를 비교하고, 기술적 타당성을 검토하였다. 본 연구는 농촌 커뮤니티를 구성하는 건물 및 온실 부하에 대응할 수 있는 분산형·저온 열 공급 모델의 가능성을 제시함으로써, 향후 농촌 기반 분산 에너지 활성화 정책 및 국제적 저탄소 열 공급 모델 확산에 이바지할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 시스템 개요 및 모델링

본 연구에서 제안하는 농촌 커뮤니티 열 그리드 운영 모델은 Fig. 1과 같이 분산형 태양열 집열 시스템, 계절 간 열 저장·이용(STES), 지역난방 회수 열을 열원으로 하는 분산형 히트펌프를 주요 열 공급 수단으로 구성하였다. 또한 동절기 피크 난방 부하 발생 시에는 인근 지역난방 네트워크

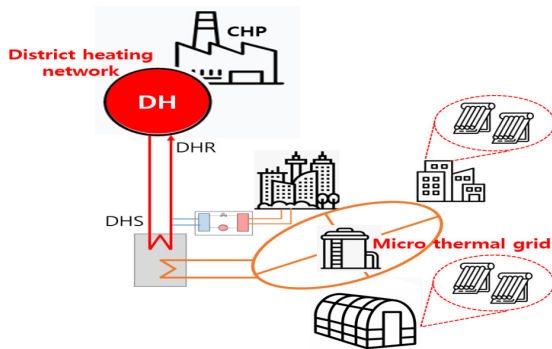


Fig. 1. Schematic of interconnected operation of thermal grids

로부터의 보조 열 공급을 고려하여, 전체 부하 대응 능력을 확보할 수 있도록 설계하였다.

특히 태양열 에너지는 동절기보다는 하절기에 최대 생산량을 보이지만, 태양열 기반 열 구동 냉방 시스템은 아직 경제성이 충분히 확보되지 못한 상황이다. 따라서 이러한 수요-공급 간 계절적 불일치를 해결하기 위해서는 계절 간 축열조(STES)를 활용한 부하 조정이 필수적이다.

본 연구에서는 이를 검증하기 위하여 기존 열병합발전(CHP) 기반 집단에너지 시스템 설계 프로그램^[8]을 활용하였으며, 여기에 분산형 태양열 시스템, 회수 열 기반 히트펌프, STES 시뮬레이션 모듈을 추가 구현하여 열 그리드 연계 운영 효과를 분석하였다. 이와 같은 접근을 통해 농촌 커뮤니티에 적합한 저온·분산형 열 공급 모델의 실효성을 평가할 수 있도록 하였다. 당 시뮬레이션 프로그램의 기본 구조는 연간, 시각별 에너지 부하 대응을 위한 다양한 열원 설비별, 연간 운영계획에 따른 에너지 수요 및 공급 간 정산을 특징으로 하는데, Fig. 2에서 보는 바와 같이, 에너지

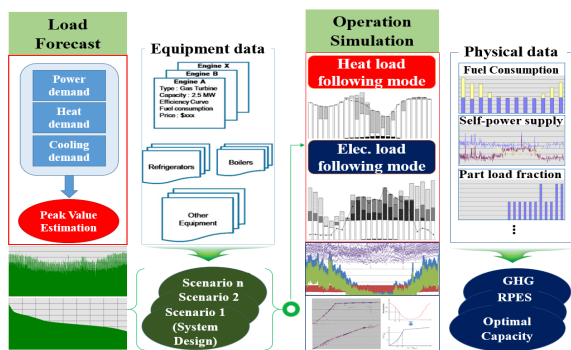


Fig. 2. Illustration of the simulation procedure for micro thermal energy system design^[8]

부하 예측 모듈, 운전 시뮬레이션 모듈로 구성된다. 운전 시뮬레이션 모듈에서는 앞서 예측된 연간, 시각별 에너지 부하 자료를 입력으로 하여 열병합발전 설비, 태양열, 태양광, 풍력 등 재생 열원 등 다양한 열원설비 구성이 가능하며, 부하 및 가격 변동성을 고려한 설비 운영계획에 따른 시각별 운전 시뮬레이션을 통해 설비별 연료 사용량, 에너지 생산량, 설비 운영 대수 등 물리적 주요 변수에 대한 정보를 얻게 된다.

본 연구에서 제안된 모델은 분산형 저온 네트워크(4, 5세대 모델^[9,10])를 기반으로 하며, 공급 수와 회수 수로 구성된 2 배관 시스템에서 회수 수를 히트펌프의 열원으로 재활용하도록 설계하였다. 이는 기존 중앙집중식 지역난방과 달리 도심지 인근의 농촌 커뮤니티 내 온실, 공공건물, 주택 등 다양한 수요처를 통합할 수 있는 구조를 목표로 한다.

2.1 계절 간 열저장·이용 모델링

계절 간 축열조(STES) 모델링에서는 대용량 축열조에서 일반적으로 나타나는 성층화(Stratification) 기반의 내부 온도분포 등 세부 물리 현상을 직접 예측^[11]하기보다는, 잉여 열저장 및 열 그리드 간 연계 운영에 따라 가용한 축열 열량을 동적으로 추정할 수 있는 단순화된 접근 방식^[12]을 적용하였다. 즉, 축열조를 열의 입·출력에 따른 에너지 상태 변수로 정의하고, 시각별로 변화하는 축열 가능 용량을 SOC(State of Charge)로 나타내었다.

$$\frac{d(E)_{HAC}}{dt} = \frac{d(Q_{in})}{dt} - \frac{d(Q_{out})}{dt} = \frac{d(Q_{SST})}{dt} - \frac{d(Q_{Load})}{dt} - \frac{d(Q_{Loss})}{dt} \quad (1)$$

$$SOC = (E)_{HAC} / (E)_{HAC.M} \quad (2)$$

여기서 Q_{SST} 는 잉여 태양열, Q_{Load} 는 수요부하, Q_{Loss} 는 열 손실을 의미한다.

열 손실은 축열조 용량 기준, 시간별 0.025%로 가정하였으며, 이는 기존 연구^[11,13]를 참고하여 설정하였다. 본 가정은 시뮬레이션 단순화를 위한 것으로, 향후 계절 간 열저장·이용(STES) 모델의 경제성 확보를 위해서는 단열 강화

비용과 열 이용률 향상 편익 간의 trade-off를 반영한 최적 설계가 필요하다. 특히 본 연구에서 고려하는 농촌 커뮤니티의 저온 열 공급(< 55°C) 구조에서는, 축열조 열 손실이 전체 시스템 효율에 미치는 영향이 도심형 고온 공급 모델보다 상대적으로 작다는 점을 고려하였다.

2.2 열 그리드 간 연계 운영 모델링

본 연구에서 적용한 열 그리드 간 연계 운영 모델은 기존 집단에너지 시스템 설계 프로그램을 기반으로 구현되었으며, 다양한 열원 설비의 가동 조건과 공급 우선순위를 반영하였다(Fig. 3). 농촌 커뮤니티 단위의 신규 열 수요에 대응하기 위해 다음과 같은 운영계획을 수립하였다.

1. 태양열 직접 공급: 실시간으로 생산되는 태양열은 가능한 한 즉시 부하에 공급하여 저장·방출 과정에서 발생할 수 있는 손실을 최소화한다.
2. 계절 간 열저장·방열(STES): 실시간 열 수요를 초과한 잉여 태양열을 축열조에 저장하고, 동절기 난방 부하 발생 시 이를 방출하는 방식으로 모델링하였다. 이때 축열조의 충·방전 상태는 SOC 변수로 정의하여, 계절 간 열저장 상태 변화를 정량적으로 반영하였다.
3. 회수 열 기반 히트펌프 가동: 지역난방 네트워크 회수열을 증발기 열원으로 활용하여 미활용 저온 열을 회수하고, 시스템 효율을 극대화한다.
4. 지역난방 보조 공급: 상기 세 가지 공급원만으로 수요 충족이 어려운 경우, 인근 지역난방 네트워크로부터의 열 공급을 보조적으로 적용한다.

히트펌프 운전은 부분 부하율이 60% 이상일 때만 운전

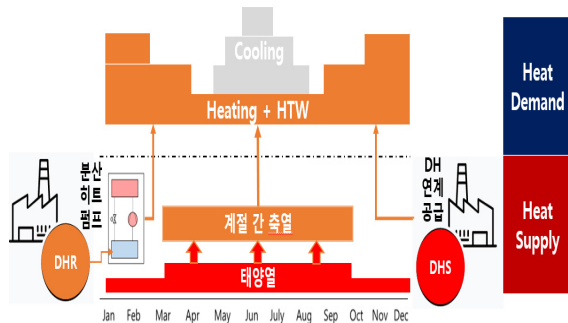


Fig. 3. Operational schemes by heat supplying facility for interconnected operation of thermal grids

되도록 설정하였다. 이는 부분 부하 영역에서 성능 저하를 방지하기 위한 조건으로, 그 결과 하절기와 같이 난방 부하가 낮은 시기에는 히트펌프 가동이 제한되고 대신 STES 활용도가 증가한다. 이러한 운영계획은 회수 열 기반 히트펌프의 고효율 운전과 태양열·축열 활용 간의 균형을 동시에 고려한 구조로, 농촌 커뮤니티 열 그리드의 실효성을 높이는 데 기여할 수 있다.

2.3 분산형 히트펌프 운영 모델링

본 연구의 주요 차별성은 기존 농촌 커뮤니티에서 사용되던 화석연료 보일러를 분산형 히트펌프로 대체한 점에 있다. 히트펌프의 성능은 증발기 측 열원 조건에 크게 좌우되는데, 기존에 활용되던 공기 열, 지열, 하수 열은 계절적 변동성과 장기 운전 시 성능 저하가 불가피하였다.

이에 본 연구에서는 농촌 커뮤니티 열 그리드와 연계된 지역난방 회수 열을 히트펌프의 증발기 열원으로 활용하는 방안을 제시하였다. 지역난방 네트워크 배관을 통해 회수되는 열은 연중 비교적 안정적인 온도 조건을 유지하며, 실제 국내 사례에서도 동절기에 평균 40°C 이상의 온도가 관측되는 경우가 많다(Fig. 4). 이는 저온 열원 문제를 해결할 수 있는 유리한 조건으로, 농촌 지역에서 히트펌프 성능 저하를 방지하고 안정적인 난방공급을 가능하게 한다. 나아가 화석연료 보일러 대체를 통해 농촌 커뮤니티의 탄소 중립형 열 공급 체계 구축에 기여할 수 있으며, 저탄소 농업 모델 확산에도 긍정적 영향을 미칠 수 있다.

Figure 5는 지역난방 회수 열을 열원으로 활용하는 분산형 히트펌프의 열 교환 프로세스를 개략적으로 나타낸 것

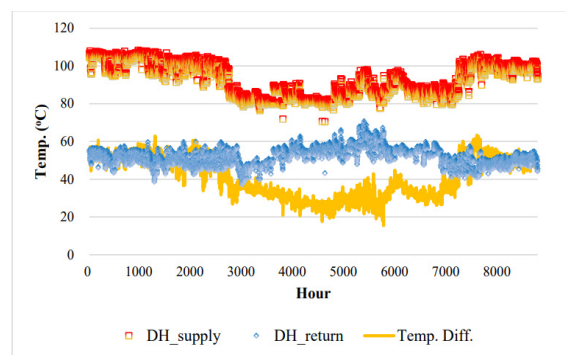


Fig. 4. Profiles of operational temperature of district heating network

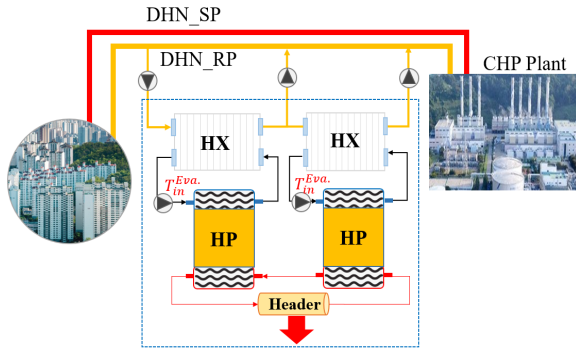


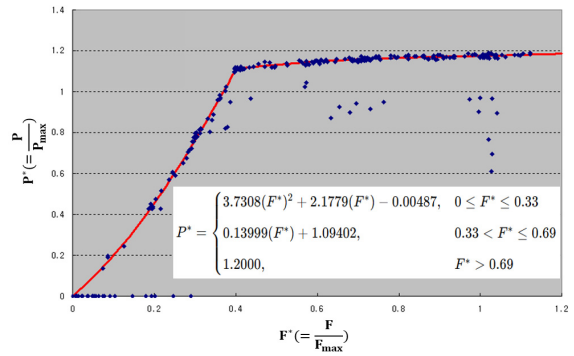
Fig. 5. Schematic overview of a constant-temperature heat exchange process utilizing district heating return water for heat pump operation

이다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯이, 지역난방 회수 열은 연중 비교적 안정적인 온도 범위를 유지하므로, Fig. 5와 같이 간접 열 교환 방식을 통해 히트펌프 증발부에 일정 온도의 열을 지속해서 공급할 수 있다. 이러한 시스템 특성을 고려하여 본 연구에서는 시뮬레이션 수행 시 시간별 COP 변동을 별도로 고려하지 않고, 연중 고정된 COP 값을 적용하여 히트펌프 성능을 평가하였다. 다만, 실제 운전 환경에서는 부분 부하 운전, 보조 설비 운전, 열교환기 오염도 변화 등에 따라 COP가 변동할 수 있으므로, 본 가정은 시스템 수준의 경향 분석을 위한 단순화된 접근으로 해석될 필요가 있다.

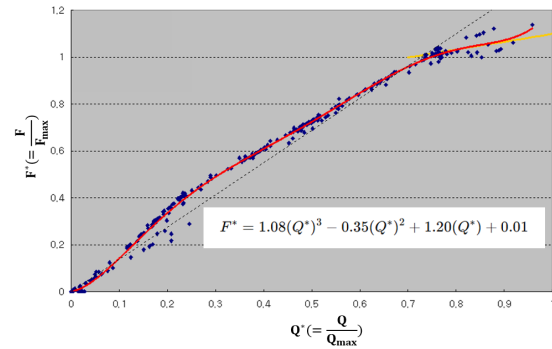
2.4 기존 지역난방 네트워크 모델링

열 그리드 연계 운영에 따른 에너지절감 효과를 정량적으로 평가하기 위해서는, 신규 농촌 커뮤니티 열 수요가 기존 지역난방 열원 설비의 운전 조건과 연료 소비에 미치는 영향을 고려해야 한다. 그러나 열병합발전(CHP) 기반의 지역난방 시스템은 연간 열부하 변동에 따라 다양한 운전 모드를 적용하기 때문에, 신규 부하를 포함한 최적 운영 조건을 직접 도출하기 위해서는 매우 복잡한 시뮬레이션이 요구된다.

본 연구에서는 이러한 복잡성을 피하고자, Fig. 6에서 보는 바와 같이 기존 지역난방 사업장의 실제 운영 데이터를 활용하여 열원 설비별 에너지 생산량과 연료 사용량 간의 상관관계를 회귀식 형태로 도출하였다.^[14] 이를 통해 새로운 부하 조건이 적용되더라도, 추가적인 복잡한 최적화



(a) Electricity production vs. fuel consumption



(b) Fuel consumption vs. heat production

Fig. 6. Correlation formula between main operation variables by connected operation of thermal grids

과정을 거치지 않고 기존 상관 식을 이용하여 설비 가동 특성과 연료 소비를 추정할 수 있도록 하였다.

예를 들어, 간절기 기간에 농촌 커뮤니티의 난방 부하를 충당하기 위해 기존 네트워크에서 열 공급이 추가로 이루어질 경우, 해당 시점의 과거 운영 패턴에서 유사한 조건을 추출하고 이를 기반으로 연료 소비량을 산정하였다. 이러한 접근은 모델 단순화와 실용성을 동시에 확보할 수 있으며, 신규 열 수요가 기존 지역난방 시스템에 미치는 영향을 합리적으로 분석하는 데 유효하다.

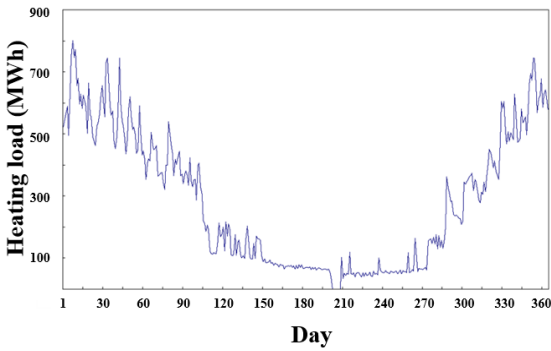
3. 계절 간 열저장 기반 열 그리드 연계 운영 시뮬레이션 결과

3.1 성능 분석 기준

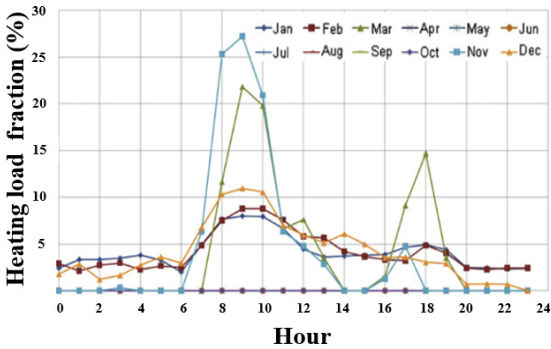
3.1.1 분석 대상 및 에너지 부하 예측

본 시뮬레이션에서는 기존 지역난방 열원 인근에 위치할

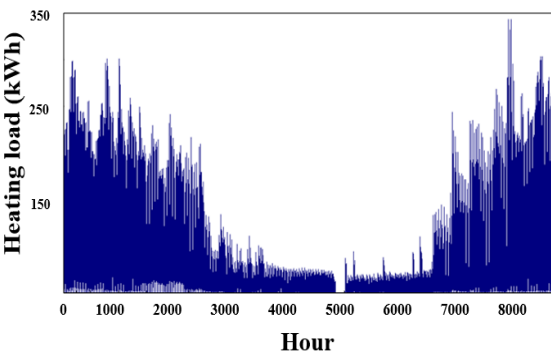
수 있는 농촌 커뮤니티의 신규 열 수요를 가상의 건물군으로 정의하였다. 고려된 수요처에는 공동주택, 업무·상업용 건물, 그리고 최근 보급이 급증하고 있는 시설원에 온실이 포함된다. 열 그리드 기반 중앙집중형 열 공급 모델은 배관 네트워크 구축에 상당한 초기 투자비가 소요되므로, 일정 수준 이상의 열부하 집적이 전제되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 공동주택이나 상가 등 거주 밀도가 높은 건물군 인근에 스마트팜 단지가 조성되는 시나리오를 가정하여 분석을 수행하였다.



(a) Year-round daily heating load profile



(b) Day averaged hourly heating load profiles by month



(c) Year-round hourly heating load profile synthesized from (a) and (b)

Fig. 7. Schematic overview of synthesizing (c) from (a) and (b)

석을 수행하였다.

에너지 부하 예측은 기존에 구축된 월별·시각별 건물 단위 부하 모델^[15]을 기반으로 수행하였다. 실제 관측된 일별 부하 데이터와 건물별 단위 부하 모델을 결합하여, 건물 유형별 연간 8,760시간 단위 면적당 에너지 수요 곡선을 생성하였다(Fig. 7). 온실은 농촌 커뮤니티의 주요 열 수요처 중 하나로, 다른 건물 유형과 달리 월별·시각별 단위 부하 모델이 마련되어 있지 않다. 이에 본 연구에서는 별도의 시뮬레이션을 통해 연간 8,760시간의 냉·난방 부하를 산정하였다.

예측 결과(Fig. 8)에 따르면, 동절기 난방 부하보다 하절기 냉방 부하는 최대 4배 이상 높게 나타나, 일반 건물과 뚜렷이 구별되는 온실의 특성을 보여준다.

본 연구에서는 이러한 단위 면적당 에너지 수요 곡선에 각 건물 유형의 연면적을 곱하여 총 연간 에너지 부하를 산정하였으며(Fig. 9), 건물 유형별 적용 연면적, 최대 부하, 총부하량 결과를 Table 1에 요약하였다.

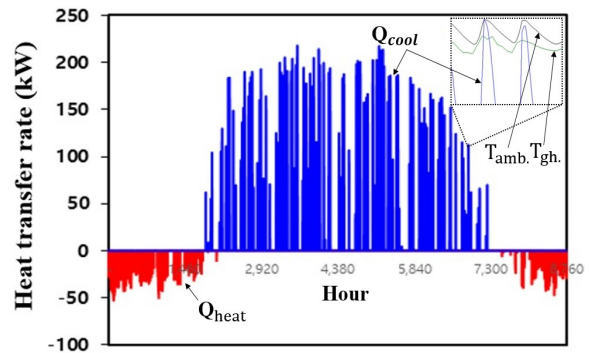


Fig. 8. Heating and cooling demands for the greenhouse of simulation

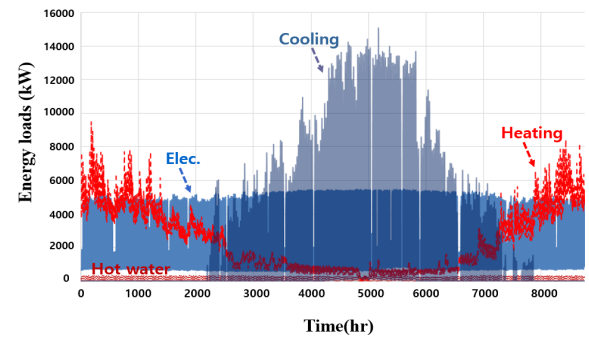


Fig. 9. Annual hourly profile of energy loads for micro thermal grid

Table 1. Basic building's information and anticipated energy loads

Building Type	Total Area (m ²)	Energy Loads					
		Heating		Cooling		Electricity	
		Max (kWh)	Ann. (GWh)	Max (kWh)	Ann. (GWh)	Max (kWh)	Ann. (GWh)
Apartment	125,000	6,288	16.22	511	0.11	897	5.74
Office	8,000	849	0.56	1,075	0.46	266	1.02
Commercial	50,000	2,846	0.91	14,323	15.90	4,564	17.60
Greenhouse	10,000	1,404	5.76	-	-	174	0.95
Sum	193,000	11,387	23.5	15,909	16.47	5,901	25.31

농촌 커뮤니티 열 그리드 운영에서 기후변화에 따른 냉방 부하 증가는 향후 중요한 이슈로 예상되며, 특히 시설원에 온실의 냉방수요 확대가 전망된다.^[16,17] 본 연구에서는 분석 범위를 난방 중심 부하로 한정하였다. 이는 태양열 등을 활용할 수 있는 열 구동 냉방방식이 터보식 전기 냉방 대비 성능 및 비용 측면에서 현재 시장 경쟁력을 확보하기 어려워, 현행 열 공급 중심의 열 그리드 모델을 냉방 부문까지 확장하여 적용하는 데 구조적인 한계가 존재하기 때문이다. 이에, 향후에는 잉여 재생 전력을 활용하는 Power-to-Heat 모델을 포함하여, 전력을 매개로 한 양방향 에너지 거래가 가능한 혁신적인 에너지시스템 모델의 도입이 필요할 것으로 판단된다.

이러한 연구 범위 설정에 따라, 본 연구는 하절기에 발생하는 잉여 태양열을 계절 간 저장하여 동절기 난방에 활용하는 시나리오에 초점을 두고, 온실 부하를 포함한 열 그리드 운영 효과를 평가하였다. 시뮬레이션에서는 약 10,000 m² 규모의 온실에서 저온성 작물(딸기)을 재배하는 조건을 가정하였으며, 하절기 냉방 부하는 고려하지 않고 난방 부하만을 히트펌프를 통해 공급하는 것으로 설정하였다. 이때 히트펌프 운전에 따른 전력 소비는 시스템 해석에 별도로 반영하였다.

3.2 운영 시뮬레이션 결과

지역난방 열원을 활용한 흡수식 냉방은 최근 온실 냉방 부하 적용 시도와 맞물려 향후 주요한 공급 수단으로 기대되고 있다. 그러나 현재로서는 열 구동 냉방방식의 효율성 한계, 설비 최적화 미비, 그리고 터보식 냉방 대비 경쟁력 부족 등 해결해야 할 과제가 많다. 따라서 본 연구의 시뮬레

Table 2. Simulation conditions by scenario

Variable	Case I	Case II	Heat pump Heat Source
	Solar Panel Area (m ²)	# of H.P. for each building	
Ref. case	10,000	1	Water (Lake etc.)
Scenario 1	20,000	1	DH return water
Scenario 2	30,000	2	DH return water
Scenario 3	40,000	3	DH return water

이션 분석은 농촌 커뮤니티 인근에서 운영되는 분산형 열원, 즉 지역난방 공급과 연계된 난방 부하를 중심으로 수행하였다.

국내 온실 재배 환경에서는 저온성 작물의 경우 하절기 재배가 이루어지지 않아 냉방 부하가 발생하지 않는다. 그러나 기후 온난화에 따라 향후 온실 냉방수요 확대가 불가피할 것으로 예상된다. 다만, 지역난방 열원을 활용한 흡수식 또는 터보식 냉방의 가동에 따라 발생하는 배열을 계절 간 저장·활용하는 운영 시나리오는 본 연구의 범위를 넘어서는 것으로, 후속 연구에서 다루고자 한다.

Table 2는 시나리오별 열 공급 시스템의 구성을 요약한 것이다. Case I에서는 태양열 패널 설치 면적을 10,000 m²에서 최대 40,000 m²까지 확대하는 조건을 적용하였으며, 히트펌프는 포함하지 않았다. Case II에서는 태양열 패널 면적을 10,000 m²로 고정하고, 건물당 히트펌프(250 RT/set) 설치 대수를 1대에서 3대까지 변화시키며 운영 성능을 분석하였다. 이때 히트펌프의 열원은 지역난방 네트워크 회수열(DH return water)로 설정하였다. 두 경우 모두 태양열을 열원으로 하는 계절 간 열저장(STES, 10,000 m³ 규모)을 적용하였다. 한편, Reference case는 태양열 패널 10,000 m²와 히트펌프 1대를 포함하되, 열원은 외부 수계(Lake 등)로 설정하였다.

3.2.1 Case I: 태양열 계절 간 열 저장·이용 영향 분석

Case I에서는 대표적인 재생 열원인 태양열을 계절 간 저장·이용(STES) 모델의 열원으로 적용할 경우, 열 그리드 연계 운영 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 농촌 커뮤니티 내 분산형 태양열 패널 설치는 농지 보전 및 관련 규제에 인

해 유희공간 확보에 제약이 따른다. 이에 본 연구에서는 전체 건물군 연면적의 5%에 해당하는 10,000 m²를 기준 설치 면적으로 설정하고, 이를 기준으로 100%, 200%, 300% 확대하는 시나리오를 추가 구성하여 에너지절감 효과를 비교하였다.

설치 면적에 비례하여 STES 용량을 적정하게 산정하는 것이 중요하다. 축열 용량이 부족할 경우, 생산된 잉여 태양열의 일부는 폐기될 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 활용되지 못하는 잉여 태양열 폐기를 방지하기 위해 STES 용량을 잉여 태양열을 전량 저장할 수 있는 충분 용량으로 가정하였다. 다만, 축열 용량 변화가 최적 설비 구성 및 운영 성능(예: 보조 열원 투입, 펌핑 전력, 충·방열 스케줄링)에 미치는 영향은 본 연구 범위를 넘어서는 것으로, 향후 후속 연구에서 최적화 관점으로 검토할 예정이다.

연간 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 Fig. 10과 같이 태양열 패널 단위 면적당 연간 및 시각별 생산량이 필요하다. 본 연구에서는 관련 선행연구^[18]의 결과를 활용하여 설치 면적에 비례하는 연간 8,760시간 단위의 태양열 생산량을 산정하였다.

Figure 11은 Case I 기준 시나리오에서 열원별 난방 부하 기여도와 연간·시각별 축열량, 열 손실, 방열량의 변화를 나타낸 것이다. 농촌 커뮤니티의 실시간 열 수요는 우선적으로 태양열로 충당되며, 초과된 잉여 태양열은 축열조에 저장·방출된다. 이에 따라 축열량은 단순 누적되지 않고 시기별 부하 특성에 따라 변동한다. 하절기에는 주거용 건물의 급탕 수요를 충족한 후 남는 태양열이 축열조에 저장되지만, 대부분 초가을 이전에 소진되어 동절기 기여는 제한적이다. 또한 Case I에서는 분산형 히트펌프를 고려하지

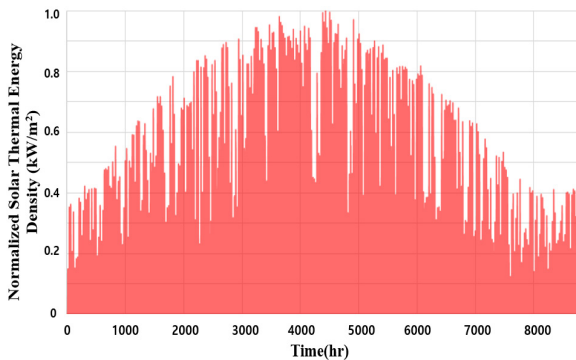
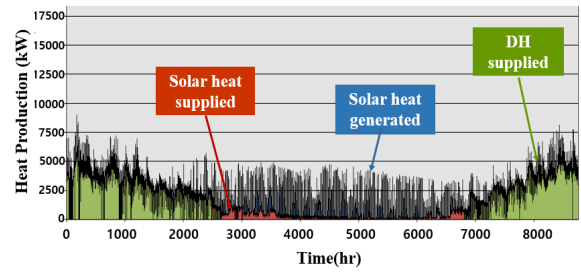
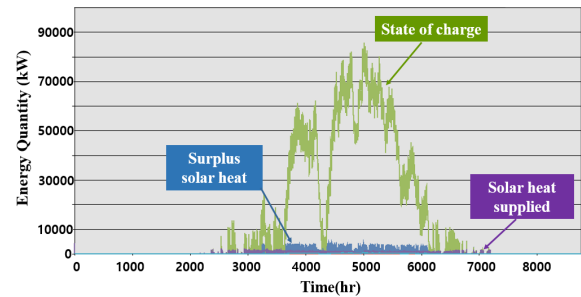


Fig. 10. Annual hourly unit solar heat generation profile



(a) Profiles of heat supplying for micro thermal grid.



(b) Profile of seasonal heat storage and utilization

Fig. 11. Annual hourly heat supplying profile for micro thermal grid

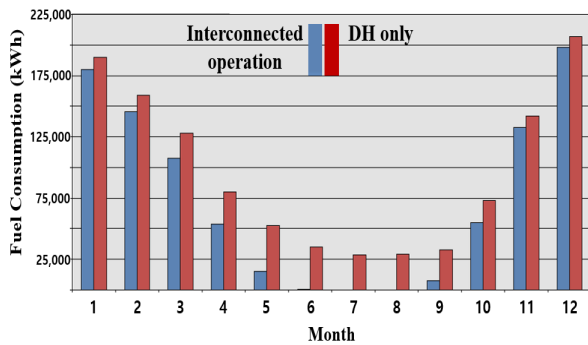
않았으므로 동절기 난방 부하의 상당 부분이 지역난방 네트워크에 의존하며, 설치 면적 제약으로 인해 태양열의 동절기 기여도는 극히 미미한 것으로 나타났다.

Figure 12는 기존 지역난방으로부터 100% 공급을 받는 시나리오와 비교하여, 태양열 패널 설치 면적 확대에 따른 월별 에너지절감 효과를 보여준다. 패널 면적 증가에 따라 계절 간 열저장의 기여가 점차 동절기까지 확대되는 양상이 나타났으나, 농촌 커뮤니티 내 유희공간 확보 한계로 인해 대규모 태양열 패널 설치만으로 동절기 부하를 충당하기에는 현실적 제약이 있음을 확인하였다.

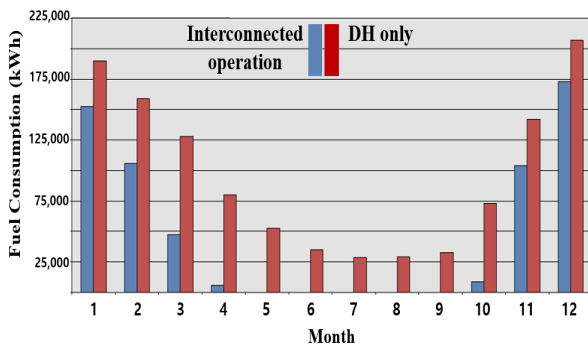
3.2.2 Case II: 지역난방 회수 열 이용 히트펌프 영향 분석

앞서 살펴본 바와 같이 재생에너지원은 낮은 에너지 밀도와 태양 복사에너지의 계절적 변동성을 지니므로, 열 그리드 연계 운영의 편익을 극대화하기 위해서는 추가적인 열 공급원이 필요하다. 본 연구에서는 그 대안으로 지역난방 회수 열을 수열원으로 활용하는 분산형 히트펌프 모델을 고려하였다.

Case II에서는 태양열 패널 설치 면적을 Case I의 기준



(a) Ref. case (Case I)



(b) Scenario 3 (Case I)

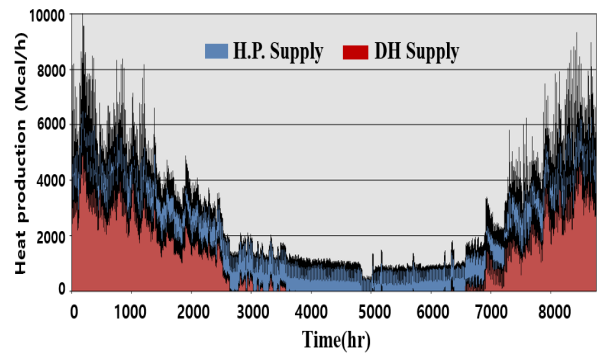
Fig. 12. Comparison of annual monthly primary energy consumption before and after connected operation between thermal grids

안(10,000 m²)으로 고정된 상태에서, 건물별 분산형 히트펌프 설치 규모(대수) 변화에 따른 에너지절감 효과를 분석하였다. 시나리오별 히트펌프 용량은 Table 3에 제시하였으며, 건물당(온실의 경우 3,300 m²당) 250RT급 히트펌프를 기준으로 산정하였다.

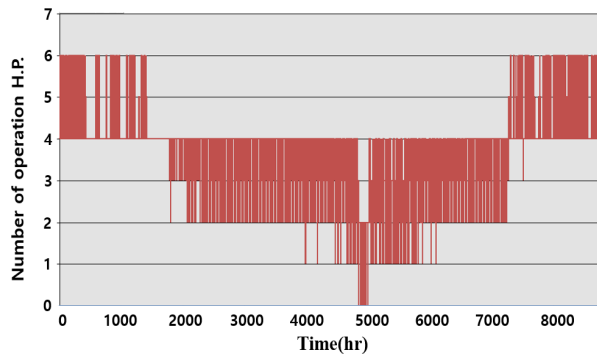
분석 결과, Fig. 13(a)에서 보는 바와 같이 지역난방 회수 열을 열원으로 하는 히트펌프는 농촌 커뮤니티 열 수요

Table 3. Technical Specification for main energy facilities

Facility	Main Parameters	Remarks
H.P.	Capacity: 250 (USRT) Cutoff load ratio: 60%	
Solar Panel	Installation areas (m ²)	Annual solar heat generation profile applied (see Fig. 10)
Seasonal Heat Storage (Solar Heat)	Installation Volume (m ³)	- Single Storage Tank - Heat loss rate: 0.005 (%/h)



(a) Heat supply by facility (H.P. vs. DH)



(b) Variation of the number of heat pumps

Fig. 13. Profile of heat supplying and the number of HP's units for greenhouses (Scenario 2, Case II)

의 상당 부분을 안정적으로 감당할 수 있었다. 다만 최대 공급 가능 용량을 초과하는 부하와 부분 부하 가동률 제한 조건 이하의 부하는 기존 지역난방 공급을 통해 충당되는 것으로 나타났다.

한편, Fig. 13(b)는 분산형 히트펌프의 연간 부하 변동에 따른 시각별 가동 대수 변화의 예를 보여준다. 동절기와 같이 난방 부하가 큰 시기에는 히트펌프 대부분이 높은 비율로 가동되지만, 하절기에는 급탕 수요 대응 수준으로 가동 대수가 현저히 감소하였다. 이는 향후 온실 냉방 부하가 포함될 경우, 히트펌프의 냉방 운전이 연간 가동률을 크게 향상시킬 수 있음을 시사한다.

4. 열 그리드 연계 운영 모델 적용 타당성 고찰

4.1 에너지절감 효과

Fig. 14는 계절 간 태양열 저장·이용과 지역난방 연계에

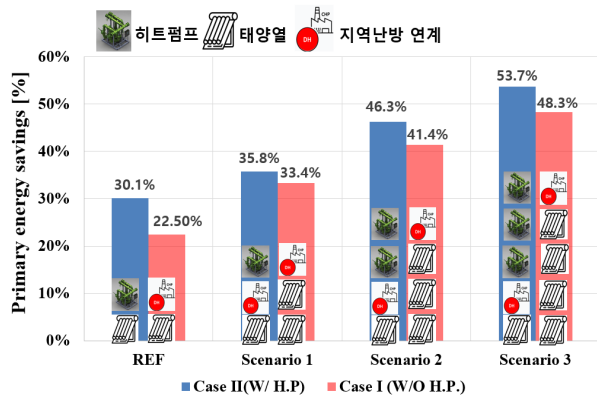


Fig. 14. Comparison of simulation results in terms of primary energy savings according to cases and scenarios

기반한 농촌 커뮤니티 분산형 열 그리드 운영이, 기존 지역난방 단독 공급 대비 갖는 에너지절감 효과를 비교한 결과를 보여준다. Case I은 Table 2와 같이 개별 건물 단위 히트펌프가 적용되지 않은 조건이며, Case II는 지역난방 회수 열을 열원으로 활용하는 히트펌프 모델을 추가한 점에서 차이를 가진다.

분석 결과, Case I 기준 조건에서는 약 22%의 에너지절감 효과가 나타났으며, 태양열 패널 설치 면적을 기준안 대비 3배 확대하면 최대 48%까지 절감 효과가 증가하였다. 그러나 설치 면적 확대에 따른 추가 절감 편익 증가율 점차 감소하여, Scenario 1에서는 기준안 대비 약 48%의 편익 증가율을 보이지만, Scenario 3에서는 Scenario 2 대비 약 17% 수준에 그쳤다. 이는 동절기 난방 부하 대응에 있어 단순한 태양열 설비 확대만으로는 효율성 향상에 한계가 있음을 시사한다.

국내의 경우 절대농지 확보 측면에서 태양열 설비 확충에 제약이 크기 때문에, 지역난방 회수 열을 열원으로 활용한 히트펌프 적용(Case II)의 중요성이 더욱 부각된다. 분석 결과, 지역난방 회수 열을 활용하면 그렇지 않은 경우(Case I) 대비 수 % 수준의 추가 절감 효과가 확인되었다. 예를 들어 기준안에서는 약 7.5%, Scenario 3에서는 약 5.3%의 추가 절감 효과가 나타났다. 이는 지역난방 회수 열 기반 히트펌프 시스템이 농촌 커뮤니티 분산형 열 공급 모델에서 효과적인 보완 수단임을 보여준다.

4.2 열 공급 거리에 따른 펌프 소비 동력

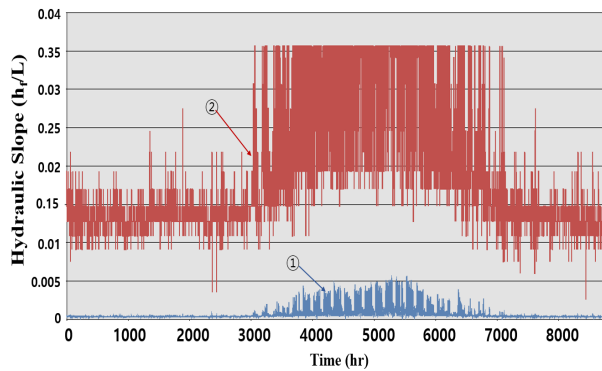
본 연구에서 분석한 열 그리드 간 연계 운영 모델에서 지역난방 시스템의 경제성은 열원과 수요처 간 배관 거리로 인해 결정되는 순환 펌프의 소요 동력에 크게 좌우된다. 따라서 펌프 동력 최소화를 고려한 열 그리드 설계가 필수적이며, 장거리 배관을 통해 대용량 열원을 이송하는 열 네트워크의 특성상 배관 조건에 따른 수도 손실과 이에 따른 펌프 소비전력의 합리적인 산정은 비용 최적화를 위한 핵심 요소이다.

다만, 본 연구의 목적은 열 네트워크의 세부 배관 설계의 타당성을 검증하기보다는 가상의 수요부하를 대상으로 연간 열원 생산 및 계절 간 열저장(STES) 적용에 따른 열 공급 대응성을 평가하는 데 있다. 이에 따라 개별 수요처 건물의 배치, 배관 매설 길이에 따른 마찰 손실과 및 굴곡부에서 발생하는 수도 손실과 같은 상세 배관 설계 요소는 본 연구의 범위를 벗어나며, 이는 향후 후속 연구에서 추가적으로 다룰 수 있을 것으로 판단된다.

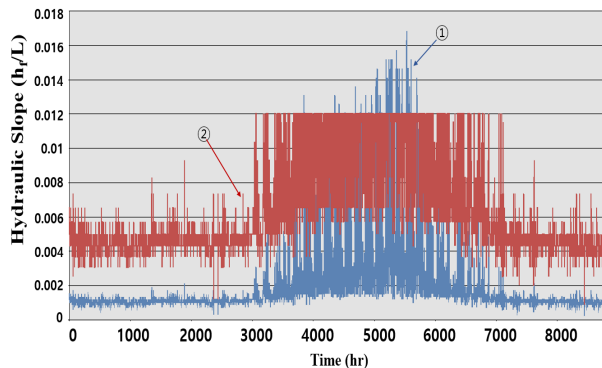
이에 따라 본 연구에서는 배관 길이보다는 열 배관의 직경을 주요 설계 변수로 설정하여 이에 따른 수도 손실과 펌프 소요 동력의 영향을 제한적으로 고찰하였다. 배관 내 유체 유동에 따른 마찰 손실 및 압력 강하는 물 이송 시스템 해석에 널리 활용되는 경험 식인 Hazen-Williams^[19] 식을 적용하여 모사하였다.

Fig. 15는 지역난방 네트워크와 마이크로 열 그리드 측 배관 직경 변화에 따른 수도 손실, 즉 단위 길이당 수도 구배(hydraulic slope)를 비교한 결과를 나타내고 있다. 분석 결과, 배관 직경은 수도 손실을 지배하는 핵심 설계 변수로, 동일 유량 조건에서 직경이 감소할수록 마찰 손실이 비선형적으로 증가하는 경향이 확인되었다. 이는 장거리 열 수송을 전제로 하는 열 네트워크 시스템에서 배관 직경 선정이 펌프 소요 동력을 결정하는 주요 요인임을 의미한다.

일반적으로 지역난방 네트워크는 대규모 수요처에 대한 안정적인 열 공급을 위해 충분한 배관 직경이 확보되는 반면, 열 그리드 연계 시스템에서 마이크로 열 그리드 측 배관은 피크부하 시 펌프 동력 손실량을 지배하는 역할을 수행한다. 따라서 열 네트워크 설계 시 메인 네트워크는 연간 에너지 관점의 직경 최적화를, 마이크로 열 그리드 측은 피크부하 대응을 고려한 선택적 직경 확대 전략을 적용할 필



(a) Pipe diameter (① 1.0m; ② 0.8m)



(b) Pipe diameter (① 0.8m; ② 1.0m)

Fig. 15. Effect of pipe diameter on the hydraulic slope (① Micro thermal grid side, ② District heating side)

요가 있음을 시사한다.

본 연구에서는 온실을 포함하는 농촌 커뮤니티를 대상으로 계절 간 열저장 활용의 적용 타당성을 분석하였다. 그 결과, 농촌 유휴 부지를 활용한 태양열 발전과 하절기 잉여 태양열의 저장·재활용이 본질적으로 낮은 태양열의 에너지 밀도를 보완할 수 있음을 확인하였다. 향후 기후 온난화 심화에 따라 냉방수요가 증가하고 연중 재배형 온실 운영이 확대될 경우, 냉방 부하를 포함한 재생 열 활용 모델의 필요성이 더욱 커질 것으로 전망된다. 이에 따라 후속 연구에서는 하절기 터보 냉동기의 배열을 계절 간 열저장 열원으로 추가 고려하는 방안을 검토할 예정이다.

5. 결론

본 연구에서는 기존 지역난방 네트워크 인근에 형성되는 농촌 커뮤니티를 대상으로, 계절 간 열저장·이용(STES)과

지역난방 회수 열 기반 히트펌프 시스템을 적용한 열 그리드 연계 운영 모델의 타당성을 시뮬레이션으로 분석하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

1. 태양열 설치 규모 효과: Case I 기준안(10,000 m²) 대비 태양열 설비 면적을 확대하면 에너지절감 효과는 각각 33.4%, 41.4%, 48.3%로 나타났으며 증가율은 48% → 24% → 17%로 점차 감소하였다. 이는 단순한 태양열 설비 확대만으로는 투자비 대비 에너지절감 효과의 한계가 있음을 시사한다.
2. 히트펌프 적용 효과: 지역난방 회수 열을 이용한 분산형 히트펌프 적용(Case II)의 경우, 1대 설치 시 35.8%, 2대 설치 시 46.3%, 3대 설치 시 53.7%의 절감 효과가 나타났다. 증가율은 19% → 29% → 16%로 일정하지 않았으며, 이는 설비 확충 효과가 선형적으로 나타나지 않음을 의미한다. 따라서 투자비 대비 경제성을 고려한 최적 설비 용량 산정이 필요함을 알 수 있었다.
3. 운영 전략 시사점: 온실을 포함한 농촌 커뮤니티를 대상으로 한 난방 중심의 계절 간 열저장·이용 모델은 히트펌프 설비의 연간 가동률 측면에서 한계가 있었다. 이에 따라 냉방 부하를 포함하는 통합 운영 전략이 시장 경쟁력 확보를 위해 필요함을 확인하였다.

종합하면, 태양열 기반 계절 간 열저장·이용과 지역난방 네트워크 연계 운영을 통해 기존 단독 열 공급 대비 높은 에너지절감 효과를 달성할 수 있었다. 또한 도심 적용뿐 아니라, 농촌 커뮤니티를 대상으로 한 적용에 있어 절대 농지확보 측면에서 유휴 부지 확보가 어려우므로, 단순 태양열 설비 확충보다는 지역난방 회수 열 기반 히트펌프 적용이 더욱더 효과적임을 확인하였다.

본 연구에서는 시스템 수준의 열 공급 대응성 분석에 초점을 두어 펌프 동력 소모와 이에 따른 경제성 평가를 정량적으로 포함하지는 않았으나, 배관 직경에 따른 수두 손실 특성이 펌프 소요 동력요구량을 지배하는 주요 설계 변수임을 확인하였다. 향후 연구에서는 실증데이터 확보를 기반으로, 지역난방 네트워크와 마이크로 열 그리드 측 배관의 기능적 차이를 고려한 펌프 동력 산정과 비용분석을 포함한 종합적인 경제성 평가를 수행할 예정이다. 나아가 경제성과 향후 냉방수요 증가에 대응하기 위해, 태양열 외에도 하절기 터보 냉동기 가동 시 발생하는 응축부 배열을 계

절 간 저장·이용 열원으로 활용하는 방안이 후속 연구에서 검토되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청의 재원으로 수행된 연구과제의 지원을 받았으며(No. RS-2024-00399318), 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2024-00354083).

References

- [1] Werner, S., 2017, "International review of district heating and cooling", *Energy*, **137**, 617-631.
- [2] Government of the Republic of Korea, 2023, "Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), "The 10th Basic Plan for Electricity Supply and Demand (2022-2036)", <https://nsp.nanet.go.kr/plan/subject/detail.do?nationalPlanControlNo=PLAN0000033810>.
- [3] Rasheed, A., Kwak, C.S., Na, W.H., Lee, J.W., Kim, H.T., and Lee, H.W., 2020, "Development of a building energy simulation model for control of multi-span greenhouse microclimate", *Agronomy*, **10**(9), 1236.
- [4] Xu, J., Wang, R. Z., and Li, Y., 2014, "A review of available technologies for seasonal thermal energy storage", *Solar Energy*, **103**, 610-638.
- [5] Cox, J., Campos, G., Armatis, P., Belding, S., Lowder, T., Kristensen, L., Zourellis, A., Bless, F., Arpagaus, C., and Baldwin, S., 2022, "Low-Carbon District Heating: Performance Modeling of Hybrid Solar, Heat Pump, and Thermal Storage Systems for District Thermal Energy in the United States", *Proc. 19th International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, Paper No. 2321.
- [6] Kim, J.H., Han, Y.J., Kim, C., and Hong, H.K., 2018, "The effect of variable flow-rate and valve-position control on seasonal solar thermal energy storage tanks", *Korea J. Air-Cond. Refrig. Eng.*, **30**(12), 609-619.
- [7] Park, S.M., and Seo, T.B., 2018, "Economic evaluation of glass-greenhouse heating solar-thermal system applied with seasonal borehole thermal energy storage", *J. Korean Solar Energy*, **38**(5), 63-74.
- [8] Chung, M., Lee, S.G., Park, C., Park, H.C., and Im, Y. H., 2013, "Development of a combined energy-demands calculator for urban building communities in Korea", *Environ. Plan. B Urban Anal. City Sci.*, **40**(2), 289-309.
- [9] Choi, W.J., Lee, W.J., Kim, J., Jeong, J.W., and Kim, M.H., 2025, "Evaluation of the applicability of fifth-generation district heating and cooling systems for a net-zero energy campus", *Korea J. Air-Cond. Refrig. Eng.*, **37**(4), 196-205.
- [10] Choi, W.J., Park, K.E., Kang, S.H., Hong, J.Y., and Kim, M.H., 2023, "Energy saving potential of simultaneous heating and cooling heat pump-based district heating and cooling systems for a zero-energy community", *J. Korean Inst. Archit. Sustain. Environ. Build. Syst.*, **17**(6), 434-445.
- [11] Bai, F., and Xu, C., 2011, "Performance analysis of a two-stage thermal energy storage system using concrete and steam accumulator", *Appl. Therm. Eng.*, **31**(14-15), 2764-2771.
- [12] Bui, V.-H., Hussain, A., Im, Y.H., and Kim, H.-M., 2019, "An internal trading strategy for optimal energy management of combined cooling, heat and power in building microgrids", *Appl. Energy*, **239**, 536-548.
- [13] Baetens, R., Jelle, B.P., Thue, J.V., Tenpierik, M.J., Grynning, S., Uvsløkk, S., and Gustavsen, A., 2010, "Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond", *Energy Build.*, **42**(2), 147-172.
- [14] Youn, Y.J., and Im, Y.H., 2023, "Analysis of operating characteristics of interconnected operation of thermal grids with bidirectional heat trade", *Appl. Therm. Eng.*, **229**, 120608.
- [15] Chung, M., and Park, H.C., 2010, "Development of a software package for community energy system assessment – Part I: Building a load estimator", *Energy*, **35**(7), 2767-2776.
- [16] Goo, J.-B., Shin, H.-J., Kwak, Y.-H., and Huh, J.-H., 2021, "Development of Smart Greenhouse Energy Analysis Model and Analysis of Cooling Packages Performance", *J. Korean Solar Energy*, **41**(6), 1-18.

- [17] Ryu, S.W., and Park, D.Y., 2021, “Economic analysis based on smart-farm cooling technology”, KIEAE Journal, **21**(5), 55-65.
- [18] Liu, J., Chung, D.-H., Chung, M., and Im, Y.H., 2018, “Development of load models and operation simulator for a building complex with mixtures of multi-type engines and renewable devices”, Energy Build., **158**, 831-847.
- [19] Jamil, R., 2019, “Frictional head loss relation between Hazen-Williams and Darcy-Weisbach equations for various water supply pipe materials”, Int. J. Water, **13**(4), 333-347.