



BES를 사용한 에너지 절감형 양돈장의 지열히트펌프 적정 용량 산정

Estimation of Adequate Capacity of Ground Source Heat Pump in Energy-saving Pig Farms Using Building Energy Simulation

이성원^a · 오병욱^b · 박광우^c · 서일환^{d,†}

Lee, Seong-Won · Oh, Byung-Wook · Park, Kwang-Woo · Seo, Il-Hwan

ABSTRACT

In Korea, attention is being paid to the use of renewable energy in the livestock industry, and Ground Source Heat Pump (GSHP), which is advantageous for temperature control, is considered as one of the ways to reduce the use of fossil fuels. But GSHP is expensive to install, which proper capacity calculation is required. GSHP capacity is related to its maximum energy load. Energy loads are affected by climate characteristics and time, so dynamic analysis is required. In this study, the optimal capacity of GSHP was calculated by calculating the heating and cooling load of pig farms using BES (Building Energy Simulation) and economic analysis was performed. After designing the inside of the pig house using TRNSYS, one of the commercial programs of the BES technique, the energy load was calculated based on meteorological data. Through the calculated energy load, three heating devices and GSHP used in pig farms were analyzed for economic feasibility. As a result, GSHP's total cost of ownership was the cheapest, but the installation cost was the highest. In order to reduce the initial cost of GSHP, the capacity of GSHP was divided, and a scenario was created in which some of it was used as an auxiliary heating device, and economic analysis was conducted. In this study, a method to calculate the proper capacity of GSHP through dynamic energy analysis was proposed, and it can be used as data necessary to expand the spread of GSHP.

Keywords: Ground source heat pump; heating system; pig farm; energy capacity; economic analysis

1. 서론

국내 양돈업은 2018년 기준 7조 1,185억 원 규모로 전체 농림업에서 2번째로 높은 생산액을 가진다 (MAFRA, 2019). 돼지 사육두수는 2000년 800만 두에서 2019년 1,100만 두로 규모가 매년 증가하지만, 양돈장은 2000년 2만 3천 가구에서 2019년 6천 가구로 양돈장의 수가 축소되고 있어 양돈장의 대형화와 사육 밀집화가 가속되고 있으며 (KOSIS, 2018), 양돈장의 대형화와 사육 밀집화로 돈사 내부의 온도, 습도, 환기량 등 환경조절에 어려움이 있다. 돼지는 환경조건 중 온도에 민감한 특징을 가지며, 돈사 내 질병 확산과 폐사에 영향을

줄 수 있다. 돼지는 고온 스트레스를 받을 경우 사료 섭취량 감소, 영양소 소화 및 흡수율 저하와 같은 부정적인 영향을 미치고 (Oh et al., 2017), 저온에서는 돼지의 호흡기 질환 발병률이 높아지고 면역력이 저하된다 (Eom, 2006). 온도 편차에 따라 면역체계에도 영향을 주는데 일반적으로 5°C 이상의 일교차가 발생하는 경우 돼지의 질병 면역력 저하가 발생할 수 있어 돈사 내 온도 관리에 주의가 필요하다 (RDA, 2019). 한국의 경우 10년 평균 기온은 여름 24.4°C, 겨울 0.4°C로 여름과 겨울은 24°C의 높은 온도 편차를 보이며, 축사 내부의 적정기온을 유지하기 위하여 환기만을 활용하는 것은 충분하지 않아 적절한 냉·난방 기술이 필요하다 (KOSIS, 2019). 축산업에서 에너지 소비량은 동절기에 난방을 위해 77%로 가장 높게 차지하며, 축종중에서 양돈업이 50%로 가장 많이 차지하고 있다. 에너지원은 화석 연료가 73.7%로 의존도가 높아 축산업에서의 환경적인 대책을 위해 신재생에너지를 활용한 기술과 같은 대체제가 필요하다 (Cho, 2011; Shim et al., 2015; Park and Kim, 2019) 최근 정부에서는 축산업에서의 환경적 개선을 요구하고 있으며, 이에 따라 농림축산식품부에서는 재생에너지 2030 계획을 통해 농촌 지역의 신재생에너지 확대에 힘쓰고 있다. 이를 위하여 “에너지자립형 생산기술개발”에 태양열, 지열, 융복합 (태양열, 지열), 고체산화물 연료전지

^a Ph.D. Student, Department of Rural Construction Engineering, Jeonbuk National University

^b Ph.D. Student, Department of Rural Construction Engineering, Jeonbuk National University

^c Researcher, WP Co., Ltd

^d Assistant Professor, Department of Rural Construction Engineering, Jeonbuk National University

† Corresponding author

Tel.: +82-63-270-2520, Fax: +82-63-270-2517

E-mail: ihseo@jbnu.ac.kr

Received: November 18, 2020

Revised: November 11, 2021

Accepted: November 22, 2021

와 같은 신재생에너지의 활용을 적극적으로 지원하고 있다. 신재생에너지 중 GSHP (Ground Source Heat Pump)는 지상과 지하의 온도 차에 의한 열 교환이 사용되기 때문에 외부환경에 영향이 적으며, 에너지의 연속적인 활용이 가능하다. 양돈업에서는 GSHP가 냉난방 기술에 활용도가 높아 양돈장에 기술을 적용하는 것에 관심이 높아지고 있다. GSHP는 지하 300 m~수 km 내에 존재하는 에너지를 활용하는 심부 지열과 지표로부터 300 m 내에 존재하는 에너지원을 활용하는 천부 지열로 나누어진다. 회로 구성과 형태에 따라 수직 밀폐 회로형, 수평 밀폐 회로형과 개방 회로형으로 나뉘며 국내에서는 요구 공간이 적고 냉·난방에 효율적인 수직 밀폐 회로형이 주로 사용된다 (Kim, 2014).

GSHP는 초기 투자 비용이 높아 적정용량을 산정이 필요하다 (Kim, 2014). 국내의 기후는 일교차와 계절에 따른 온도변화가 크기 때문에 단순 최대 부하량을 이용하여 GSHP의 용량을 산정할 경우 과대산정이 될 수 있어 농가 부담이 높아져 GSHP의 확산에 어려움이 생긴다. 따라서 정적 해석이 아닌 시간에 따른 동적 해석을 수행하고 시간당 발생 부하량의 빈도분석을 통한 적정용량 산정이 필요하다. 양돈장 내부에는 열원으로 작용하는 돼지와 적정 환경 유지를 위한 환풍기 가동, 작업자들의 작업 패턴과 같은 복합적인 요소가 있어 복사, 대류, 축열, 방열에 따른 복합적인 에너지의 흐름을 해석할 수 있는 BES (Building Energy Simulation)를 활용하였다.

양돈 기술에 있어서 초기에는 사양관리와 시설관리 중심으로 기술 개발이 이루어졌으나, 현재는 축산환경과 친환경 발전을 중심으로 연구가 이루어지는 추세로 다양한 연구가 수행되어 지고 있다 (RDA, 2014). 그 중 신재생에너지를 농업에 적용한 연구는 온실을 중심으로 진행되었으며, 축산업에 적용한 연구는 계사를 대상으로 연구가 수행되었으나 돈사나 GSHP를 대상으로 한 연구는 아직 미흡하다 (Zanaty, 2009; Choi et al., 2010; Martin et al., 2012; Seo et al., 2014; Hassani et al., 2016; Lee et al., 2017; Zhou, 2019). BES는 건물의 에너지 흐름을 해석하는 시뮬레이션으로 주로 사무실, 주거 공간과 같은 사람이 장기간 생활하는 공간에서 내부 열에너지 흐름에 관련된 분석이 이루어져 왔으며 사람의 휴식과 생활적인 측면에서 편안함과 안정감을 주는 환경에 관한 연구가 수행됐다 (Bourgeois et al., 2006; Pang et al., 2007; Peeters et al., 2009; Bouyer et al., 2011; Jie et al., 2014). BES를 활용한 신재생에너지의 효율과 설치방식, 위치에 관련된 연구는 태양광, 태양열을 중심으로 이루어져 왔으며, GSHP의 적정 용량을 산정하는 연구는 거의 이루어지지 않았다 (Park and Lee, 2002; Yang and Lu, 2004; Loutzenhiser et al., 2007; Lee et al., 2013; Sheng et al., 2016; Kim et al., 2017; Park et al., 2019).

본 연구에서는 BES를 통한 동적 냉·난방 부하량을 산정하여 양돈장 내 지열히트펌프의 경제적 설치 기준 마련을 위하여 적정용량을 산정하였다. GSHP 시스템 설치를 고려하고 있는 대상 농장을 선정하여, 현장의 구조 및 환기 시스템을 반영하여 빌딩 에너지 시뮬레이션 모델을 설계하였다. 설계된 모델을 통하여 2018년도 1년간의 기상데이터를 반영한 시간별 냉·난방 부하량을 산정하였다. GSHP, 온풍기, 온수기의 조합에 따라 초기투입비와 운영비를 고려한 적정 조합에 따른 경제성 분석을 수행하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상농장

실험 돈사는 순창에 있는 7200두 규모의 양돈장으로 위도 34°54'52" N, 경도 127°22'19" E에 위치한다. 농장주의 협조로 320두 규모가 사육되는 자돈사에서 실험을 진행하였다 (Fig. 1). 대상 자돈사는 16구역으로 나누어 사육하며, 한 구역 당 면적을 8 m²이다. 사육밀도는 0.4 m²/head로 구역 당 20마리의 돼지를 사육한다. 실험 대상 농가는 올인 올아웃 (All-In-All-Out) 시스템을 적용한 돈사로 다른 돈방의 돼지가 섞이지 않는 전입·전출을 한다. 환기 시설은 Fig. 3과 같이 돈사 내부의 배기 팬을 이용하여 음압식으로 환기하며, 쿨링패드를 통해 외부 공기가 입기된다. 입기된 공기는 돈사 내부의 급격한 온도변화를 피하기 위해 복도와 중천장을 통해 이동하면서, 내부 공



Fig. 1 Satellite image of the experimental pig house

기와 혼합된 후, 중천장에 설치된 음압식 환기구를 통해 돈사 내에 유입된다. 돈사 내 온도조절은 하절기의 경우 쿨링패드를 사용하며, 동절기의 경우 히팅패널을 사용한다. 외부 기상 자료의 경우 실험 돈사에서 20 m 떨어진 구역에 설치된 자동 기상관측시스템을 통해 측정된 기상자료를 활용하였다. 대상 돈사의 1년 기상은 최저기온 -10.9°C , 최대기온 37.2°C , 평균기온 15°C 이며, 최대 강수량은 32 mm로 7월에서 9월 초에 집중적으로 발생했다 (Fig. 2).

2. Building Energy Simulation

BES는 전달함수법을 이용하여 해석 대상의 공간에서 발생하는 열 취득과 손실에 관련된 복사, 대류, 축열, 방열 등을 복합적으로 고려하여 에너지 흐름을 산출하는 동적 해석기법이다. BES는 주거 공간, 사무용 건축물, 공장 등에서 에너지

흐름 모의와 부하 산정에 활용되고 있으며, 축사 난방시스템의 효율성 분석, 외부환경에 의한 축사 내 환경 분석, 온실 내 태양광 발전 설비의 효율성 분석 등 농업에서 활용되고 있다 (Marko et al., 2016; Axaopoulos et al., 2017; Lee et al., 2017; Ha et al., 2018; Kwon et al., 2019). 본 연구에서는 BES 해석 프로그램 중 TRNSYS 17.1 (TESS, LLC., USA)를 이용하여, 돈사 내 에너지 흐름에 따른 냉·난방 부하량을 계산하였다.

TRNSYS는 Fig. 4와 같이 냉·난방 부하에 필요한 모듈을 사용자가 선택한다. Type 9c는 외부에서 받은 기상데이터를 다른 모듈에 연결하는 역할을 한다. 외부 기상데이터는 기상의 월, 일, 월별 누적시간, 일별 누적시간, 일 누적, 시간 누적을 통해 시간의 흐름을 계산하며, 온도, 절대습도, 일사량, 풍속, 풍향, 대기압을 기본 데이터로 한다. Type 33c는 습공기

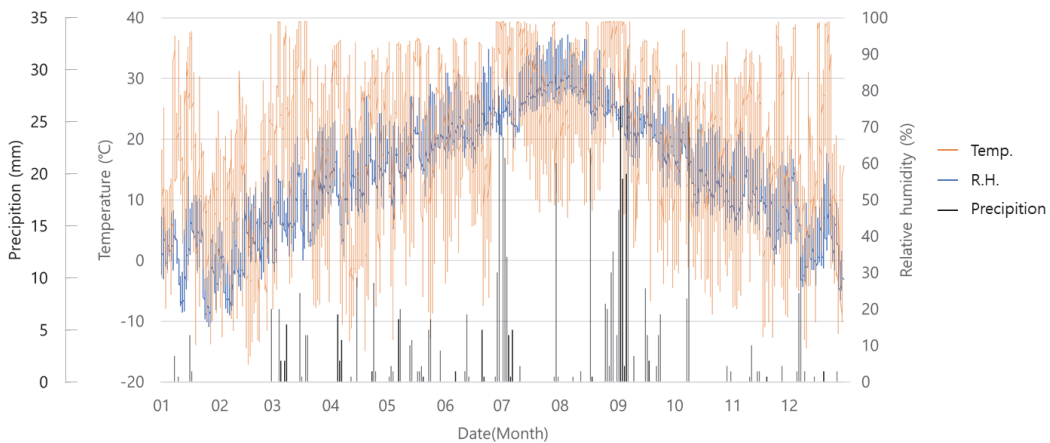


Fig. 2 External weather data of the experimental pig house

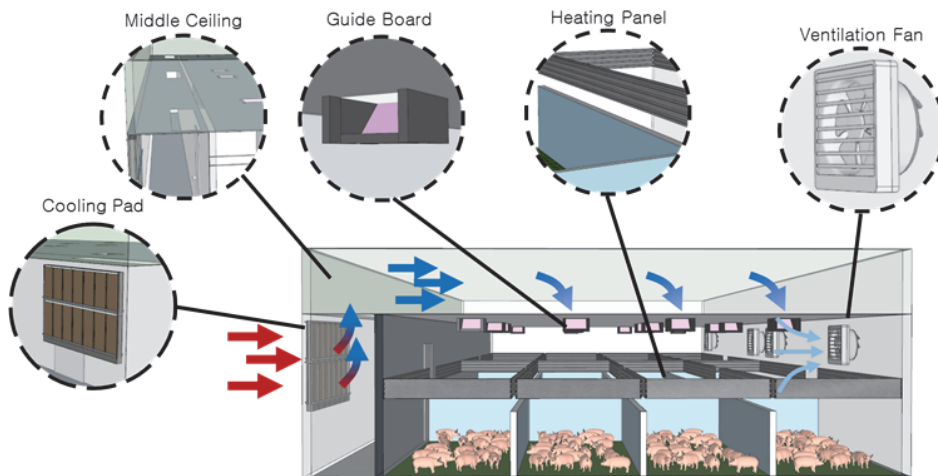


Fig. 3 Structure diagrams of internal ventilation system in the experimental pig house

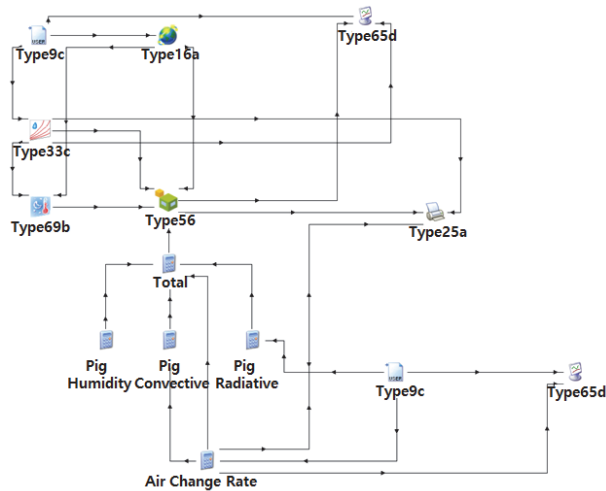


Fig. 4 Heating and cooling load model in TRNSYS

선도 모듈 (Psychometric Chart)로 온도, 습도, 엔탈피, 증기 포화도, 노점 온도 등 기상 에 따른 온도 부하량 계산에 필요한 공기 특성값을 계산하는 역할을 한다. Type 69b는 천공온도 (Sky Temperature)로 태양열이 지표에 닿기 전 대기에서 손실되는 에너지를 계산하는 역할을 한다. Type 16a는 직달 산란 일사를 계산하는 모듈로 방위 및 경사각에 따른 일사량을 계산하며, 건물의 위치와 벽체의 방위에 따른 내부 온도변화를 계산하는 역할을 한다. Type 65d는 앞선 데이터를 통해 건물 내부의 온도 부하량을 그래프로 나타내주는 역할을 한다. Type 56은 다공간으로 나뉜 건물 내부의 열 흐름을 구현하기 위한 물성값과 각 공간 간의 열전달 방식을 통해 계산하고자 하는 영역에서의 에너지 부하를 계산하는 역할을 한다.

3. GSHP (Ground Source Heating Pump)

지열 에너지는 토양, 지하수, 지표수 등이 태양 복사에너지 나 지구 내부의 마그마에 의해 축적된 열에너지를 의미한다. 지열 에너지는 활용 측면에 따라 직접이용과 간접이용으로

분류된다. 간접이용은 지열 에너지를 통해 전기를 생산하는 방식을 의미하며, 직접이용은 히트펌프나 냉동기와 같은 에너지 변환기에 열원을 공급하여 건축물의 냉·난방에 활용하는 것을 의미한다. 지열에너지의 직접적인 이용 방식 중 GSHP 시스템은 축사에서 지열에너지를 활용하는 가장 큰 부분을 차지한다. GSHP는 열원에 따라 종류를 구분하며, 열원의 종류에는 지중, 지하수, 지표수가 있다.

지중 열교환기는 설치방식에 따라 수직밀폐형, 우물관정형, 수평밀폐형으로 나뉜다. 국내에서는 수직밀폐형 방식을 사용하는 비율이 높으며, 수평밀폐형과 우물관정형은 상대적으로 낮은 비율로 활용되고 있다. 수평밀폐형 방식은 펌프의 소비동력이 낮고 시공비용이 저렴하지만, 국내의 좁은 대지면적과 경사로 인해 설치가 어려우며, 우물관정형은 좁은 면적에서 높은 효율로 얻을 수 있지만, 양질의 수자원이 대량으로 필요하다는 단점으로 인해 설치비율이 낮다. 반면 수직밀폐형은 좁은 대지면적에서 사용할 수 있으며, 국내에서 지속적인 연구로 기술적, 경제적 신뢰성이 높다. 열교환방식은 매체의 종류에 따라 물-공기, 물-물 방식이 있다. 국내에서는 오염에 강하고, 2차사용이 가능한 물-물 방식이 주로 사용되고 있으며, 대상 돈사의 경우 앞선 장점과 기존의 난방 시설을 이용할 수 있는 물-물 방식을 선정하였다. 본 연구의 돈사에서 지열 에너지의 직접이용하는 물-물 방식의 수직밀폐형 지중 열교환기를 활용한 GSHP로 돈사 내부를 냉·난방한다.

4. 연구 방법

가. TRNSYS 모델 설계

BES를 설계할 때 태양의 고도와 영역의 크기, 환기구조도 부하해석에 영향을 미치기 때문에 Fig. 5와 같이 돈사의 영역과 주요 구조를 설정하였다. 시간에 따른 동적 열부하 해석을 위해 시계열에 따라 건축물이 받는 태양 고도를 계산하였다. 돈사의 냉·난방 부하량을 계산하기 위해 Fig. 5 (b)와 같이

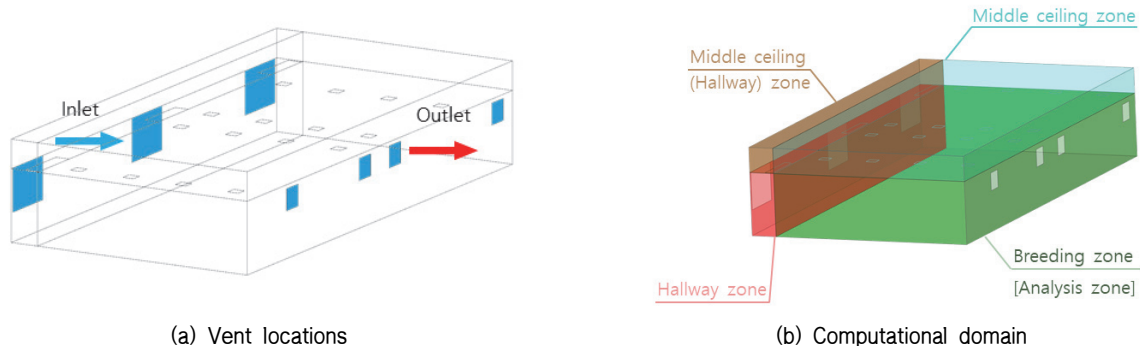


Fig. 5 Computational domain considering vent configuration for BES modeling

계산영역을 지정하였다. 대상 돈사의 경우 Fig. 5 (a)와 같이 외부의 공기를 쿨링패드로 온도를 낮추고, 작업사용 복도를 통해 중천장으로 유입된 뒤 가이드 판을 통해 돈방에 균일하게 유입되는 구조로 되어 있다. 공기의 유입 경로에 따라 Fig. 5 (b)와 같이 돼지 사육 영역, 복도, 중천장, 중천장과 복도 연결구역으로 나누어 계산영역을 지정하였다.

돈사 내부의 냉·난방 부하량을 계산하기 위해서는 계산 영역의 적정온도를 설정해야 한다. 돼지는 주령에 따라 적정 온도의 차이가 있으므로, 돼지의 생육시기에 따라 설정 온도의 차이를 주었다. 모델링 대상 자돈사에서는 젓먹이가 끝난 이후인 21~25일령의 돼지를 10~11주 동안 육성돈 전까지 사육한다. 계산영역의 설정 온도는 현장의 운영조건에 따라 초기 자돈의 적정 온도인 28~31℃로 유지하며, 일주일마다 1~2℃씩 낮춰 육성기의 적정 내부 온도인 20℃가 되도록 조절하였다.

돈사 내 온도에 영향을 미치는 요인으로 벽체의 단열, 환기 시스템, 돼지의 체열, 외부기상이 있다. 이러한 요인들은 BES를 통해 냉·난방 부하량을 계산하는 데 있어 중요한 역할을 하기 때문에 각 요인에 필요한 설정값을 조사하여 모델에 적용했다. 벽체의 구성성분과 물성치는 농림축산식품부 (2016)가 제시한 양돈 표준설계도에 따라 Table 1과 같이 설정하였다. 자돈사의 적정 환기량은 외부 기상에 따라 저온 시 3 CFM (Cubic Feet per Minute)/head, 적온 시 15 CFM/head, 고온 시 35 CFM/head로 설정하였다 (MWPS, 1983). 돼지의 체열은 복사열과 방사율로 구분하여 제시하였다. 돼지가 발생시키는 복사열은 Andres (2013)에 따라 식 (1)과 같이 나타낸다. 돼지의 피부 표면 열 방사율은 Dennis (2014)가 제시한 0.95로 설정하였으며, 돼지의 표면 온도는 Felipe (2020)가 제시한 36℃로 설정하였다. 대류 열 발생량은 Li (2017)에 따라 식 (2)와

같이 나타낸다. 돈사 내부의 습도는 열전달계수에 영향을 주기 때문에 MWPS (1983)에 따라 돼지 한 마리당 배출하는 절대 습도량인 0.086 kg/hr를 적용시켜 습도에 따른 열전달계수에 변화를 주었다. Wang et al. (2013)에 따라 축사 내부 슬러리의 평균 열 전달계수는 31.2 W/(m²·K)이며, 슬러리의 평균 습도 발생량은 0.24 kg/m²/hr이다.

$$Q_{pig-radiative} = A_p \epsilon_p \sigma ((T_{sk})^4 - (T_r)^4) \quad (1)$$

$$Q_{pig-convective} = A_p h_c (T_{sk} - T_r) \quad (2)$$

여기서, h_c 는 대류 열전달 계수 ($h_c = 12.765v_{as} + 2.079$)를 의미하며, v_{as} 는 돈사 내부의 유속 (m/s)을 나타낸다. A_p 는 돼지 피부의 면적 ($2/3 \times 0.097 \times M^{0.633} m^2$), M 은 돼지의 무게, ϵ_p 는 피부 표면 열 방사율, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수 ($5.67 \times 10^{-8} w/m^2 - K^4$), T_{sk} 는 돼지 표면 온도 (K), T_r 은 피부 주변 온도 (K)이다.

TRNSYS를 통해 설계된 돈사 내 냉·난방부하량을 2018년을 대상으로 1년간 1시간 단위로 해석하였다. 설정된 온도에 따라 돈방 영역에서 GSHP 시스템의 용량산정을 위하여 시간당 최대 난방부하량과 냉방부하량을 산정하였다. 영역별 공간에 대한 냉·난방 부하량은 열 평형 방정식 (식 (3))을 통해 계산된다 (Tobias, 1999).

$$Q = Q_{surf} + Q_{inf} + Q_v + Q_{g,c} + Q_{cplg} \quad (3)$$

여기서, Q_{surf} 는 내부 표면에서의 대류 열, Q_{inf} 는 외기로부터의 침투 열, Q_v 는 HVAC (Heating, Ventilation, & Air Conditioning) 시스템의 공기흐름으로 얻거나 뺏기는 열, $Q_{g,c}$ 는 생물체, 장

Table 1 Physical properties and thickness of walls in the experimental pig houses

Property					
Material	Thermal conductivity [kJ/mhK]		Capacity [kJ/kg K]	Density [kg/m ³]	
Concrete	5.86		0.88	2,300	
Brick	3.45		1	2,000	
Urethane	0.1		1.47	40	
Polywood	0.58		17	550	
Styrofoam	0.033		1.3	50	
Wall thickness by material inside pig house (mm)					
Wall			Ceiling		
Urethane	Styrofoam	Concrete	Urethane	Styrofoam	Concrete
50	75	75	50	100	100

비, 조명 등을 통해 얻는 내부 대류 열, Q_{pbg} 는 연결된 공간에서의 공기 흐름에서 얻는 열 또는 경계조건을 통해 얻는 열을 의미하며, 각 식은 식 (4)~(7)으로 나타낸다.

$$Q_{surf} = U_w A_w (T_w - T_r) \quad (4)$$

$$Q_{inf} = \dot{m}_{inf} C_p (T_{amb} - T_r) \quad (5)$$

$$Q_v = \dot{m}_v C_p (T_v - T_r) \quad (6)$$

$$Q_{cplg} = V \rho C_p (T_{zone} - T_r) \quad (7)$$

여기서, U_w 는 벽체의 대류열전달계수 (W/m^2K), A_w 는 벽체의 면적 (m^2), T_w 는 벽체온도 (K), T_r 는 내부 공기의 온도 (K), \dot{m}_{inf} 는 침투된 외기의 질량유량 (kg/s), C_p 는 Specific heat ($J/kg K$), T_{amb} 는 외기 온도 (K), \dot{m}_v 는 공조 시스템으로 얻는 유체의 질량 유량 (kg/s), T_v 는 공조 시스템으로 얻는 유체의 온도 (K), V 는 연결된 공간의 유량 (m^3/s), ρ 는 밀도 (kg/m^3), T_{zone} 는 연결된 공간의 유체 온도 (K)를 나타낸다.

GSHP를 축사에서 사용할 경우 동일한 시스템에서 냉방과 난방을 가동할 수 있다. 대부분의 축사에서는 냉방과 난방시스템이 구분되어 있으며, 냉방은 경제적인 이유로 인하여 환기에 의존하거나 안개분무 및 쿨링패드를 사용하는 것이 일반적이다. 반면 GSHP는 냉방효과도 줄 수 있으나, 본 연구에서는 경제성 평가를 위하여 사육 시 운영비의 큰 부분을 차지하는 난방부하량을 초점을 두어 분석하였다.

나. 경제성평가

GSHP의 난방부하량에 대한 경제성 분석을 위해 양돈장에서 사용하는 일반적인 난방설비인 전기보일러, 등유 보일러, 온풍기를 비교군으로 선정하였다. 온풍기는 공기를 직접 난방하며, 돈사 내부에 설치하기 때문에 별도의 공사나 시설비가 별도로 들지 않지만, GSHP와 전기보일러, 등유 보일러는 급탕하는 방식으로 라디에이터를 통해 간접적으로 난방하기 때문에 난방기 이외에 배관 시공비용이나 시설비를 포함하여 계산하였다. 배관 시공비용은 대상 돈사에서 수행한 시공비를 조사하여 산정하였다. 대상 돈사의 경우 기존에 전기보일러를 사용하고 있었으며, 대상 전기 보일러와 동일한 규격의 난방설비로 비교하여 경제성 분석을 수행하였다 (Table 2).

난방장치별로 총 소유비용 (total cost of ownership, 시설이나 장비 비용과 설치비, 운영비를 포함한 총비용)을 2018년도 기준으로 설치비, 장비비, 운영비를 참고하여 비교 분석하였다. 운영비를 계산하기 위해 각 에너지원 비용을 조사하였다.

등유 보일러의 경우 축산농가에 대한 정부지원 정책에 따라 면세유 금액으로 계산하였다. 전력을 사용하는 히트펌프와 전기보일러, 온풍기는 한국전력공사가 제시한 전기요금 기준표 (Table 3)에 따라 전기요금을 산정하였다. 한국전력공사의 전기요금 제시 기준에 따르면 축산업의 경우 B 항목으로 구분되며, 상업용 축사의 경우 고압으로 전기요금을 산정한다. 계절에 따라 전기요금 계산 금액이 구분되기 때문에 Table 3을 활용하여 계절별로 전기요금을 계산하였다. 계산된 전기요금은 10월 단위는 내려서 산정하였다.

Table 2 Boundary conditions for economic analysis of geothermal heating and cooling system installed in the experimental pig house

Building	Total conditioned Volume	352 m ³	
	Occupants	320 (Piglet)	
GSHP	Heating Power	28.8 kW	
	Nominal COP (Heating)	3.83	
	Cooling Power	25.1 kW	
	Nominal COP (Cooling)	4.43	
	Entering Water Temperature (Standard)		
	Cooling Source	30°C	
	Cooling Load	12°C	
	Heating Source	5°C	
Soil	Heating Load	40°C	
	Surface Soil Annual Mean Temperature	14.6°C	
	Amplitude of Surface Soil Temperature	33.7°C	
	Thermal Diffusivity	0.049 m ² /day	
	Thermal Conductivity	274 W/(m · K)	
	Day of the minimum surface temperature	186 day	

Table 3 Standard rates for each energy sources used in agricultural industry

Classification		Demand charge (won/kW)	Energy charge (won/kW)		
Electric	A-Type	360	21.6		
	B-Type	Low-Voltage	1,150	39.2	
			High-Voltage	Summer (Jun. 1-Aug. 31)	
		Spring · Fall (Mar. 1 - May. 31 / Sep. 1 - Oct. 31)		39.9	
Winter (Nov. 1 - Feb. 28)		41.9			
Kerosene		Price per kerosene (won/liter)	631		
GSHP (Ground Source Heat Pumps)		Installation cost (million won /RT)		3.5	

III. 결과 및 고찰

1. BES 모델 결과

실험 대상지의 건축물의 특성과 외부기상, 환기 운영 방식을 고려하여 2018년 1월 1일~2018년 12월 31일까지의 1년간 (8,760 hr)의 냉·난방 부하량을 계산한 결과 Fig. 6과 같이 나타났다. 돈사 내부는 주령별 적정 사육온도를 고려하여 냉·난방부하를 산정하여 Fig. 6과 같이 일정 주기로 난방 부하가 급격히 상승하는 구간이 있다.

냉방부하량의 경우 최대 440 MJ/hr으로 순간적으로 높은 부하량을 가지지만 1년 중 13% 미만으로 가동되며, Fig. 6 (b)와 같이 특정 시기만 가동된다는 특성을 가지고 있다. 돈사에서 냉방장치는 높은 부하량에 비해 계절성이 뚜렷하여 일반적인 양돈장에서는 냉각장치가 아닌 쿨링패드와 안개분무 시설을 활용하거나 환기량을 조절한다. 쿨링패드와 안개분무 시설은 지하수를 끌어올리는 모터가 주 전력소비원이며, 연속사용이 아닌 10분 이내의 단발적인 작동을 수행하여 전력 사용률이 낮다. 지열 에너지를 활용하여 돈사 내 냉방을 수행할 경우 기존 시설의 대체가 아닌 추가적인 냉방시설로 활용되기 때문에 적정용량 산정은 난방장치를 중심으로 수행하였다.

계절별 냉·난방 부하량을 보면 동절기인 12, 1, 2월에서 난방부하량이 가장 높으며, 전체 난방부하량의 44%가 동절기에 나타난다. 동절기의 난방부하량 중 1월이 43,603 MJ로 전체 난방부하량의 17%를 차지하며, 난방부하량의 경우 전체 계절에 분산되어 나타난다. 냉방부하량은 4~10월에서 나타나며 하절기인 6, 7, 8월에 가장 높게 나타나며, 하절기는 전체 냉방부하량의 95%로 냉방부하량의 경우 특정 계절에 치우쳐져 나타난다(Table 5).

2. GSHP 설치에 따른 경제성 평가

TRNSYS에서 계산된 난방부하량에 따라 난방장치별 설치비와 연간 유지비를 계산하여 경제성 평가를 진행하였다. 난방장치의 단가는 실험 대상의 크기인 352 m³을 고려하여 시중에 판매되고 있는 장치의 평균값을 사용하였으며, 보일러와 GSHP는 별도의 배관 시공비를 추가하였다. 배관 시공비는 실험 돈사의 시공비용인 1,200만 원으로 선정하였다. 난방부하량에 따른 연간 유지비를 계산하기 위해 장치의 효율을 고려하여 Table 3의 자료를 활용하여 Table 6과 같이 산출하였다. 등유 보일러는 원료비용이 비싸고 장치의 효율이 낮아 연간 유지비용이 497만 원으로 난방장치 중 가장 높은 것으로 나타났다. 온풍기는 설치비와 장비 당 단가가 저렴하지만, 전력소비량이 높아 연간 유지비용이 451만 원으로 비싸다. 전기 보일러는 설치비가 1,450만 원으로 설치비용이 비싸지만, 연

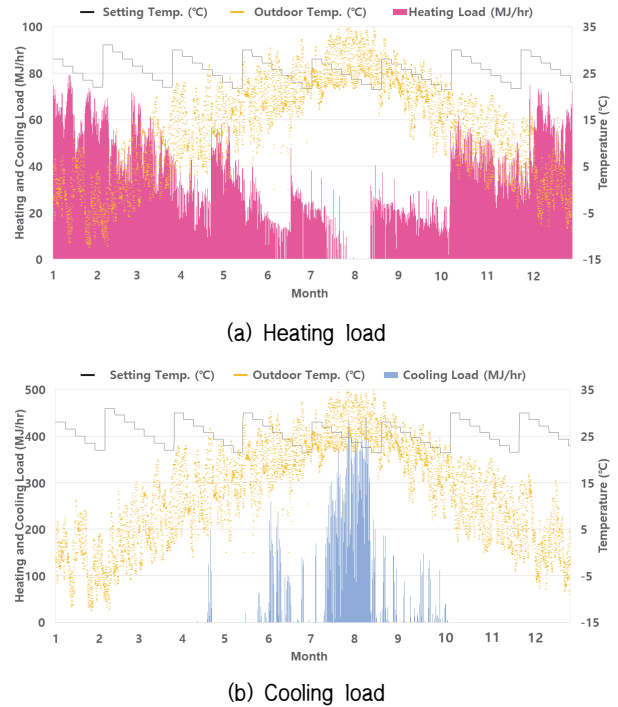


Fig. 6 Calculation of cooling and heating load through TRNSYS during 2018

Table 4 Overall heating and cooling load in pig house

Energy load	Heating load	Cooling load
Maximum load	80 MJ/hr	440 MJ/hr
Average load	34 MJ/hr	136 MJ/hr
Total load	2.57×10^5 MJ	1.60×10^5 MJ

Table 5 Monthly heating and cooling loads in the experimental pig house

Month	Heating load (MJ)	Cooling load (MJ)
January	43,603	-
February	30,345	-
March	29,115	-
April	18,783	2,230
May	18,111	642
June	9,251	14,045
July	4,882	69,520
August	6,607	68,754
September	8,964	4,536
October	26,103	382
November	22,886	-
December	38,718	-
Total	257,369	160,109

Table 6 Monthly operating costs and initial costs according to heating systems in pig house, where has 320 heads of pigs

Month	Heating load (kWh)	Electric boiler cost (won)	Kerosene boiler cost (won)	Electric fan heater cost (won)	GSHP (won)
1	43,603	530,350	846,370	646,098	128,670
2	30,345	368,530	588,180	499,029	88,850
3	29,115	335,810	564,010	480,795	80,590
4	18,783	215,750	362,750	346,332	50,960
5	18,111	207,800	349,590	325,185	48,890
6	9,251	110,620	177,550	235,897	25,350
7	4,882	58,130	93,520	134,080	13,260
8	6,607	79,130	127,060	147,488	18,490
9	8,964	101,400	171,630	242,991	22,910
10	26,103	300,810	505,470	460,047	71,910
11	22,886	263,390	442,560	388,626	62,610
12	38,718	470,570	751,120	603,779	113,910
Annual cost (won)		3,042,290	4,979,810	4,510,347	726,400
Installation cost (won)		14,500,000	12,600,000	8,000,000	36,500,000

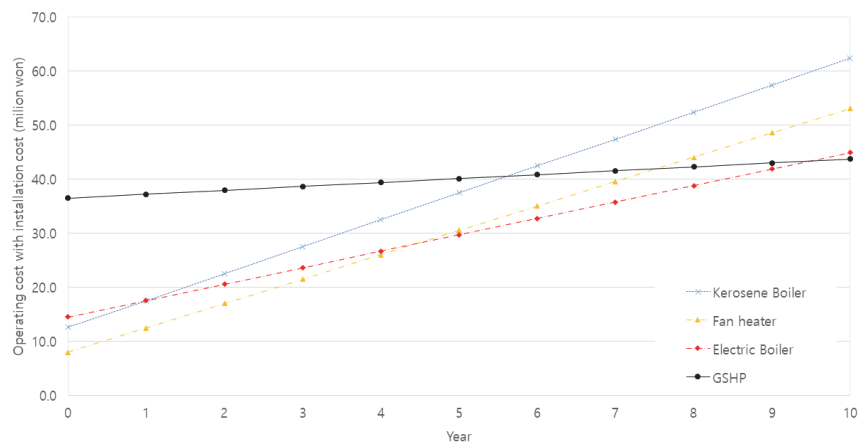


Fig. 7 Yearly operating costs with installation costs by heating systems

간 유지비용이 저렴하여 5년 사용 시 총 소유비용이 가장 낮게 평가된다. GSHP가 난방장치 중 설치비가 3,650만 원으로 온풍기에 비해 4.5배 더 비싸지만, 연간 유지비는 72만 6천 원으로 가장 저렴하였다. 별도의 설치 지원금을 고려하지 않은 경우, GSHP의 총 소유비용은 5.6년 이후 등유 보일러보다 저렴해지고, 7.5년 이후 온풍기보다 저렴해지며, 9.5년 이후 전기보일러보다 저렴해진다. 대상 농장의 시간당 최대 난방 부하량을 포함하기 위한 GSHP의 설치용량은 7 RT이며, 초기 설치비용은 배관시공비와 GSHP의 설치비를 포함한 3,650만 원이다. GSHP는 10년을 계획했을 경우 총 소유비용이 가장 저렴해지지만, 초기비용은 난방장치 중 가장 높아 농가에서 부담하기에 어려움이 있어 초기설치비를 줄일 수 있는 방법 마련이 필요하다.

GSHP는 시간 단위 최대 난방부하량을 통해 설치용량을 산정하며, 최소 설치단위는 1 RT (Ton of refrigeration)이다. 시간 당 난방부하량을 보면 최대 난방부하량이 발생하는 빈도수는 낮은 편이며, 최대 난방부하량에 따라 GSHP를 설치하면 설치용량이 과대하게 책정될 수 있다. 대상 돈사의 GSHP를 6RT 이상 사용하는 경우는 4.7%로 GSHP가 비효율적으로 선정되어있다. 설치비가 비싼 GSHP를 대신하여 일정 범위 이상을 대체 난방장치를 이용하여 GSHP의 과대 용량이나 과소용량을 막고 적정용량을 선정해야한다. 적정용량의 범위를 선정하기 위해 Fig. 8과 같이 대상 돈사의 1년간 시간당 발생 난방부하량의 빈도를 정규분포 확률밀도함수 그래프를 그려 빈도를 분석하였다. 정규 분포는 난방부하량의 평균인 2.68 RT와 표준편차 1.34 RT를 사용하였다. 정규분포 확률밀도의

누적값이 90%, 80%, 70%, 60%, 50%에 해당하는 부하량을 산정하여 GSHP의 총 소유비용을 계산하였으며, 부족한 난방 에너지는 다른 난방장치를 통해 보충하는 시나리오를 작성하였다. 90%, 80%, 50%에 해당하는 부하량은 4.6 RT, 3.99 RT, 2.53 RT로 설치용량은 5 RT, 4 RT, 3 RT로 산정된다. 70%와 60%는 3.38 RT와 3.10 RT로 80%와 동일한 4 RT의 용량으로 계산되기 때문에 시나리오에서는 생략하였다. GSHP의 보조 열원은 배관을 공유할 수 있으며, 총 소유비용이 가장 저렴한 전기보일러로 선정하였다.

Table 7과 Fig. 9는 시나리오에 따른 경제성 분석을 진행한 것이다. Table 7을 보면 GSHP를 90%, 전기보일러를 10% 사용했을 경우 설치비용은 450만 원 감소하였지만, 운영비는 106% 증가하였다. GSHP를 80%, 전기보일러를 20% 사용했을 경우 설치비용 800만 원 감소하였지만, 운영비가 117% 증가하였다. GSHP 50% 사용했을 경우 설치비용은 1,150만 원 감소하였지만, 운영비는 180% 증가하였다. 이 중 GSHP를 80% 사용했을 경우에 비해 50% 사용한 경우 운영비의 증가 비율이 더 높게 나타났으며, Fig. 9를 보면 10년 이후 GSHP를

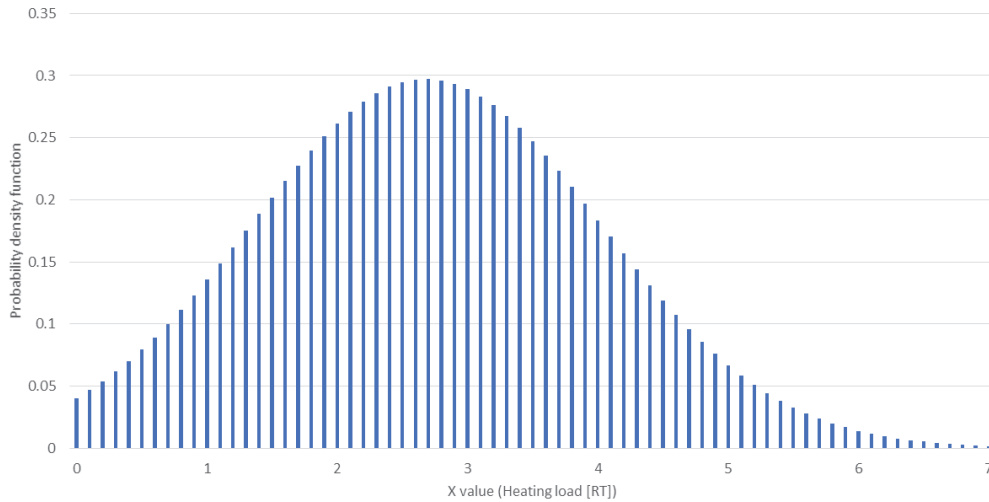


Fig. 8 Representative plot of normal probability density function graph by heating load (RT)

Table 7 Monthly operating costs and initial costs by scenario

Month	Heating load (kWh)	Scenarios			
		GSHP 100%	GSHP 90%* (5 RT) + Electric boiler 10%	GSHP 80%* (4 RT) + Electric boiler 20%	GSHP 50%* (3 RT) + Electric boiler 50%
1	43,603	128,670	157,070	192,540	311,040
2	30,345	88,850	94,290	106,160	176,200
3	29,115	80,590	82,320	87,570	143,730
4	18,783	50,960	50,960	51,740	71,780
5	18,111	48,890	48,890	49,430	59,720
6	9,251	25,350	25,350	25,350	26,220
7	4,882	13,260	13,260	13,260	13,350
8	6,607	18,490	18,490	18,490	18,650
9	8,964	22,910	22,910	22,910	22,910
10	26,103	71,910	72,070	75,030	123,480
11	22,886	62,610	62,610	62,700	86,980
12	38,718	113,910	125,600	150,080	252,800
Annual cost (won)		726,400	773,820	855,260	1,306,860
Installation cost (won)		36,500,000	32,000,000	28,500,000	25,000,000

* GSHP capacity considering maximum heating load

50% 사용한 경우 총 소유비용이 80% 사용한 경우보다 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. GSHP를 80% 사용하고 전기보일러를 20% 사용할 경우 설치비용과 운영비를 절감할 수 있다.

Table 8은 Table 7의 시나리오와 다른 난방장치를 100% 사용했을 때의 시나리오의 총 소유비용을 비교하였을 때 예산 절감 효과가 나타나는 시점을 분석한 내용이다. GSHP를 100% 사용하였을 때와 전기보일러를 100% 사용하였을 때를 비교하면 설치 후 9.5년이 지난 시점에서 GSHP 100%를 사용했을 때의 예산 절감효과가 나타났다. 예산 절감효과의 시점은 GSHP를 80%, 전기보일러를 20% 사용하는 기점부터 차이가 반년 이하로 발생하였다.

돈사 내에서 사용되는 난방장치와 각 시나리오를 비교할 경우 초기비용은 온풍기를 사용하는 것이 저렴하지만 10년 이후 총 소유비용은 GSHP 80%와 전기보일러 20%를 사용하는 것이 30% 더 저렴하게 나타난다. 운영비와 초기비용을 비교하면 GSHP를 1 RT씩 줄일 때 초기비용은 선형적으로 감소하는 반면 운영비가 증가하여 10년을 기준으로 총 소유비용이 다른 시나리오보다 높아지는 현상이 발생한다. GSHP 50%와 전기보일러 50%를 사용할 경우 앞선 특성에 따라 GSHP

80%와 전기보일러 20%를 사용하는 경우에 비해 총 소유비용이 3% 더 많이 나타난다. 다양한 난방시설과 GSHP의 시나리오 중 GSHP 80%와 전기보일러 20%를 사용하는 경우가 총 소유비용이 가장 저렴하다. 선정된 시나리오와 총 소유비용이 가장 높은 등유 보일러와 비교할 때 실험 돈사에서 2,530만원 (실험 대상 돈사 320두 기준)의 비용을 절감할 수 있었으며, 실험 농가 전체인 4배 규모로 확장할 경우 10년 이후 1억 원 이상의 예산 비용의 절감효과를 기대할 수 있다. GSHP는 정부의 친환경 정책에 따라 정부 보조금과 지자체 보조금을 지원받을 수 있다. 정부 보조금은 고려하여 GSHP에 대한 초기비용의 일부를 지원해주며, GSHP를 100% 사용했을 시 1,960만 원을 감면받을 수 있다. 각 시나리오 별로 정부 보조금을 적용했을 경우 전기보일러와 비교할 때 투자 회수 기간은 GSHP 100%일 때 1년으로 줄일 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 TRNSYS 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 자돈사 내부의 냉·난방 부하량을 산출한 후, GSHP, 전기보일러, 등유보일러, 온풍기의 경제성 분석을 진행하였다. 분석된 데이터를 통해 GSHP의 용량을 나누고 전기보일러를 보조 열원으로 시나리오를 선정하고, 적절한 GSHP의 용량을 선정하였다.

TRNSYS를 사용하여 실험 대상 돈사의 냉·난방 부하량을 시계열에 따라 동적 해석을 한 결과 최대 냉방부하량은 440 MJ/hr, 최대 난방부하량을 80 MJ/hr이며, 총 냉방부하량은 1.60×10^5 MJ, 총 난방부하량은 2.87×10^5 MJ로 산정되었다. 최대 냉방부하량은 최대 난방부하량보다 5.5배 높게 나타났지만 총 난방부하량은 총 냉방부하량에 비해 1.6 배 더 높게 나타났다. 이는 1년 중 난방은 87%가 가동되는 데에 반해 냉방은 13%만 가동되기 때문이다.

위의 결과를 통해 난방장치별로 경제성분석을 진행하였으며, 전기 온풍기의 설치비가 가장 저렴했지만 10년간의 총 소유비용에서 GSHP가 가장 저렴하게 나타났다. GSHP의 경우 다른 난방장치에 비해 높은 초기비용을 가지고 있어 일반적인 농가에서 사용하는 데에 어려움이 있다. 최대 난방부하량을 통해 계산된 용량은 과대하게 산정될 수 있어 본 연구에서는 GSHP에 사용되는 난방부하량을 조절하여 경제성 분석을 수행하였다. GSHP의 난방부하량을 시간 단위의 정규분포 확률밀도함수로 분석하여 GSHP의 용량을 90%, 80%, 50% 나눈 시나리오를 작성하였으며, GSHP를 제외한 난방장치 중 총 소유비용이 가장 저렴한 전기보일러를 보조열원으로 활용하였다.

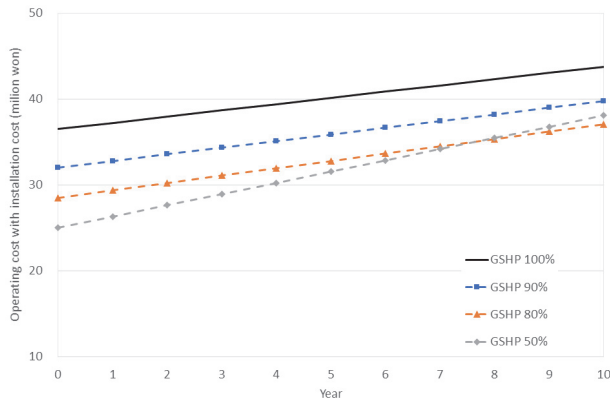


Fig. 9 Yearly operating costs with initial costs by installation scenarios

Table 8 Payback period by scenarios compared to existing heating system without government assistant

Scenario		Payback period by heating systems		
GSHP	E.B.	Electric boiler (year)	Kerosene boiler (year)	Electric fan heater (year)
100%	0%	9.5	5.6	7.5
90%	10%	7.7	4.6	6.4
80%	20%	6.4	3.9	5.6
50%	50%	6.1	3.4	5.3

작성된 시나리오를 분석하였을 경우 GSHP의 용량을 50% 이하로 낮출 때 총 소유비용이 증가하는 형태를 보였으며, GSHP의 용량을 80%, 전기보일러의 용량을 20%로 설정하였을 때 총 소유비용이 가장 저렴하게 나타났다. 이를 통해 실험 돈사에서는 GSHP의 용량을 80%로 선정할 경우 경제성이 높게 나타난다고 평가하였다.

추후 GSHP의 적정용량과 기존 난방장치의 사용비율을 산정하는 방법의 기초자료로 활용될 수 있으며, GSHP에 대한 농가의 부담을 줄여 정부에서 주도하는 농업의 신재생에너지 사업을 확대를 위한 방안으로 사용될 것을 기대한다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원 연구사업 (과제번호: 20194210100020, 과제명: 축산업 대상 재생에너지 융복합시스템 개발 및 실증)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

1. Andrés, S., J. P. Vico, V. Garrido, M. J. Grilló, S. Samper, P. Gavín, S. Herrera-León, and R. C. Mainar-Jaime, 2013. Epidemiology of subclinical salmonellosis in wild birds from an area of high prevalence of pig salmonellosis: Phenotypic and genetic profiles of Salmonella isolates. *Zoonoses and Public Health* 60(5): 355-365. doi:10.1111/j.1863-2378.2012.01542.
2. Axaopoulos, P., P. Panagakakis, and I. Axaopoulos, 2017. Optimization of exterior wall and roof insulation thickness of a growing-finishing piggery building. *Transactions of the ASABE* 60(2): 489-495. doi:10.13031/trans.12009.
3. Bourgeois, D., C. Reinhart, and I. Macdonald, 2006. Adding advanced behavioural models in whole building energy simulation: A study on the total energy impact of manual and automated lighting control. *Energy and Buildings* 38(7): 814-823. doi:10.1016/j.enbuild.2006.03.002.
4. Bouyer, J., C. Inard, and M. Musy, 2011. Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context. *Energy and Buildings* 43(7): 1549-1559. doi:10.1016/j.enbuild.2011.02.010.
5. Brunner, T., 1999. *Untersuchung geeigneter Regelungsstrategien für thermisch aktive Decken in Bürogebäuden mit Hilfe der Computersimulation und dem Ziel der Nutzung von Umweltenergie*. Germany: diplom.de.
6. Cho, S. M. 2011. A Study on the Conversion of Energy Sources for Facilities and Livestock Farmers, Research paper 11-03 Ulsan. Korea Energy Economics Institute (in Korean).
7. Choi, H. C., J. H. Park, J. I. Song, J. C. Na, M. J. Kim, H. T. Bang, H. G. Kang, S. B. Park, H. S. Chae, O. S. Suh, Y. S. Yoo, and T. W. Kim, 2010. Evaluation on heating effects of ground source heat pump system in farrowing house. *J. Lives. Hous. & Env.* 16(3): 205-215.
8. Eom, H. J., 2006. Beware of swine respiratory diseases in winter. *Journal of Korea Feed Ingredients Association* 4(11): 106-110 (in Korean).
9. Felipe, N. F., J. M. Abe, A. N. Irenilza, A. S. Ferreira, F. A. Vieira, and H. U. Costa, 2020. Automatic prediction of stress in piglets (*Sus Scrofa*) using infrared skin temperature. *Computers and Electronics in Agriculture* 168: 105-148. doi:10.1016/j.compag.2019.105148.
10. Ha, T. H., K. S. Kwon, S. W. Hong, H. C. Choi, J. Y. Lee, D. H. Lee, S. M. Woo, K. Y. Yang, R. W. Kim, U. H. Yeo, S. Y. Lee, and I. B. Lee, 2018. Estimation of THI index to evaluate thermal stress of animal-occupied zone in a broiler house using BES method. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 60(2): 75-84 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2018.60.2.075.
11. Hassanién, R. H. E., M. Li, and W. D. Lin, 2016. Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54: 989-1001. doi:10.1016/j.rser.2015.10.095.
12. IEA, 2010, Heating and cooling with a focus on increased energy efficiency and improved comfort, 6-8. EXBCS Annex 37.
13. Kim, J. H., S. H. Bae, and H. K. Hong, 2017. The selection of input value of the solar hot water system in energy#. *The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea* 29(6): 575-578 (in Korean).
14. Kim, J. S., 2014, *Cooling and heating are solved in one shot through efficient use of geothermal energy*, 28. Rural Research Institute focus, Jeonju, Jeonbuk: Korea Rural Development Administration (in Korean).
15. Korea Meteorological Administration, Comprehensive climate change monitoring information, [Http://www.climate.go.kr](http://www.climate.go.kr). (in Korean)
16. Korean Statistical Information Service, Livestock trend survey. [Http://kosis.kr/index/index.do](http://kosis.kr/index/index.do). Dec. 2018. (in Korean)

17. Korean Statistical Information Service, Temperature trend. [Http://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1400](http://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1400). 1 Jul. 2019 (in Korean).
18. Kwon, K. S., T. H. Ha, H. C. Choi, J. B. Kim, J. Y. Lee, J. H. Jeon, K. Y. Yang, R. W. Kim, U. H. Yeo, and S. Y. Lee, 2019. Evaluation of thermal stress of poultry according to stocking densities using numerical BES model. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society* 20(1): 456-463 (in Korean). doi: 10.5762/KAIS.2019.20.1.456.
19. Lee, J. W., H. J. Jung, J. Y. Park, J. B. Lee, and Y. Yoon, 2013. Optimization of building window system in Asian regions by analyzing solar heat gain and daylighting elements. *The Journal of Renewable Energy* 50: 522-531. doi:10.1016/j.renene.2012.07.029.
20. Lee, M. H., I. B. Lee, T. H. Ha, R. W. Kim, U. H. Yeo, S. Y. Lee, G. Y. Park, and J. G. Kim, 2017. Estimation on heating and cooling loads for a multi-span greenhouse and performance analysis of PV system using Building Energy Simulation. *Protected Horticulture and Plant Factory* 26(4): 258-267 (in Korean). doi:10.12791/KSBEC.2017. 26.4.258.
21. Lee, S. B., I. B. Lee, S. W. Hong, I. H. Seo, P. J. Bitog, K. S. Kwon, T. H. Ha, and C. P. Han, 2012. Prediction of greenhouse energy loads using Building Energy Simulation (BES). *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(3): 113-124 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2012.54.3.113.
22. Li, H., R. Li, and G. Zhang, 2017. Numerical study on the convective heat transfer of fattening pig in groups in a mechanical ventilated pig house. *Computers and Electronics in Agriculture* 149: 90-100. doi:10.1016/j.compag.2017.08.013.
23. Loutzenhiser, P. G., H. Manz, C. Felsmann, P. A. Strachan, T. Frank, and G. M. Maxwell, 2007. Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation. *The Journal of Solar Energy* 81(2): 254-267. doi:10.1016/j.solener.2006.03.009.
24. Mančić, M. V., D. S. Živković, M. L. Đorđević, and M. N. Rajić, 2016. Optimization of a polygeneration system for energy demands of a livestock farm. *Thermal Science* 20(5): 1285-1300. doi:10.2298/TSCI16S5285M.
25. Martin, I., M. T. A. Herrera, and P. E. C. Lopez, 2012. Parametric analysis of a solar heating system for agricultural greenhouse with dynamic simulation in TRNSYS. *The Asian Conference on Sustainability, Energy and the Environment 2012*. Mich.: ACSEE2012.
26. Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs, 2019. Major Statistical Indicators of Agricultural and Livestock Products, 5-6 (in Korean).
27. MWPS-8, 1983, *Swine housing and equipment handbook*, Cornell University, New York, United States.
28. National Center for Greenhouse Gas Inventory & Research (GIR), 2019, National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea, National Statistics-115018 (in Korean).
29. Oh, S. Y., Y. D. Jeong, D. W. Kim, Y. J. Min, D. J. Yu, K. H. Kim, and Y. H. Kim, 2017. Effect of heat stress on growth performance and physiological changes of pigs in commercial farm. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society* 18(7): 130-139 (in Korean). doi: 10.5762/KAIS.2017.18.7.130.
30. Pan, Y., Z. Huang, and G. Wu, 2007. Calibrated building energy simulation and its application in a high-rise commercial building in Shanghai. *Energy and Buildings* 39(6): 651-657. doi:10.1016/j.enbuild.2006.09.013.
31. Park, D. S., J. C. Jeong, R. Yun, J. H. Heo, and S. M. Yoon, 2019. Analysis of hybrid district heating system integrating with renewable energy by TRNSYS. *The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea* 39(1): 11-14 (in Korean).
32. Park, J. U. and E. J. Lee, 2002. TRNSYS simulation study for assessing energy performance of solar low energy house. *Proceedings of 2002 KSES International Symposium Paper*. 275-281.
33. Park, J. Y. and Y. J. Kim, 2019. The effects of renewable energy in agricultural sector. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society* 20(1): 224-235 (in Korean). doi:10.5762/KAIS.2019.20.1.224.
34. Peeters L., D. Richard, J. Hensen, and W. D'haeseleer, 2009. Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation. *Applied Energy* 86(5): 772-780. doi:10.1016/j.apenergy.2008.07.011.
35. Rural Development Administration, 2014. Agricultural Management-Development and Prospect of Agricultural Technology-Livestock, Nongsaro - Planting Technology Information (in Korean).
36. Rural Development Administration, 2014. Pig-Weaning pig specification management, Planting Technology Information (in Korean).

37. Rural Development Administration, 2019. Weekly farming information 39, Nongsaro Jeonju, Jenonbuk: Korea Rural Development Administration (in Korean).
38. Seo, I. H., I. B. Lee, K. S. Kwon, and S. J. Park, 2014. BES computation for periodical energy load of greenhouse with geothermal heating system. *Acta Horticulturae* 1037: 113-118. doi:10.17660/ActaHortic.2014.1037.10.
39. Shim, S. H., B. H. Lee, T. S. Park, and K. H. Jeong, 2015. Energy consumption and GHG emissions from fuel combustion in korean livestock sector. *Journal of Climate Change Research* 6(4): 267-276 (in Korean). doi:10.15531/KSCCR.2015.6.4.267.
40. Soerensen, D. D., S. Clausen, J. B. Mercer, and L. J. Pedersen, 2014. Determining the emissivity of pig skin for accurate infrared thermography. *Computers and Electronics in Agriculture* 109: 52-58. doi:10.1016/j.compag.2014.09.003.
41. Wang, P., K. Yokoo, Y. Wakiya, and M. Tanaka, 2013. Thermal balance analysis of activated-sludge process for pig slurry treatment. *Biosystems Engineering* 116(4): 368-378. doi:10.1016/j.biosystemseng.2013.08.004.
42. Yang, H. and L. Lu, 2004. Study of typical meteorological years and their effect on building energy and renewable energy simulations. *ASHRAE Transactions* 110(2): 424-431.
43. Zanaty, H. E., 2009. A techno-economic study for heating poultry houses using renewable energy. Master diss. Cairo, Egypt: The American University.
44. Zhang, S., P. Huang, and Y. J. Sun, 2016. A multi-criterion renewable energy system design optimization for net zero energy buildings under uncertainties. *The Journal of Energy* 94(1): 654-665. doi:10.1016/j.energy.2015.11.044.
45. Zhao, J., B. Lasternas, K. P. Lam, R. Yun, and V. Loftness, 2014. Occupant behavior and schedule modeling for building energy simulation through office appliance power consumption data mining. *Energy and Buildings* 82: 341-355. doi:10.1016/j.enbuild.2014.07.033.
46. Zhou, Y., 2019. Direct geothermal energy: Reducing the poultry industries carbon footprint. Ph.D. diss. Melbourne, Australia: The University of Melbourne.