

지열 히트펌프를 이용한 난방 시스템의 전과정평가: 복사난방과 대류난방 비교

Life Cycle Assessment of Heating Systems using Ground Source Heat Pump: A Comparison Analysis between Radiant and Convective Heating

배상무(Sangmu Bae), 최현중(Hyun-Jung Choi), 최경석(Gyeong-Seok Choi)*, 채호병(Hobyung Chae)**,
오진환(Jinhwan Oh)**, 강연주(Yeonju Kang)***, 남유진(Yujin Nam)****†

한국건설기술연구원 건축에너지연구소 수석연구원, *한국건설기술연구원 건축에너지연구소 선임연구원,
부산대학교 생산기술연구소 박사후연구원, *부산대학교 건축공학과 공학석사,
****부산대학교 건축공학과 교수

Senior Researcher, Department of Building Energy Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

**Senior Research Fellow, Department of Building Energy Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea*

***Post-doctoral Researcher, Research Institute of Industrial Technology, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

****Master of Engineering, Department of Architectural Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

*****Professor, Department of Architectural Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

Abstract

The ground source heat pump (GSHP) using radiant heating can reduce energy consumption and ensure thermal comfort for occupants, compared to convective heating method. However, to utilize the GSHP using radiant heating as a technology for achieving zero energy buildings, it is necessary to quantitatively assess the environmental impact. Most previous studies have focused on the energy efficiency aspects of the GSHP using radiant heating, but there is a lack of quantitative data on the carbon emissions generated. Therefore, in this study, to quantitatively assess the environmental impact of the GSHP using radiant heating, an integrated simulation model based on energy simulation was developed. The life cycle assessment method was used to analyze the carbon emissions generated during the manufacturing, installation, operation, and disposal stages. Moreover, to demonstrate the environmental benefits of the GSHP using radiant heating, the carbon emissions were compared to convective heating.

Key words: Ground source heat pump(지열 히트펌프), Radiant heating(복사난방), Convective heating(대류난방), Life cycle assessment(전과정평가), Carbon emissions(탄소 배출량)

†Corresponding author

E-mail: namyujin@pusan.ac.kr

접수일: 2024년 09월 05일; 심사일: 1차:2024년 09월 26일, 2차:2024년 11월 13일; 채택일: 2024년 11월 13일

기호 설명

CFI_i	: 탄소발자국 지수 [$\text{kgCO}_2\text{eq/unit}$]
d_x	: 바닥난방 파이프 간의 중심거리 [m]
E_e	: 내재탄소 배출량 [kgCO_2eq]
E_o	: 운영탄소 배출량 [kgCO_2eq]
f_i	: 전력 탄소 배출량 계수 [$\text{kgCO}_2\text{eq/kWh}$]
m_i	: 환경 부하량 [unit]
P_{SYS}	: 지열 히트펌프 난방 시스템의 소비전력 [W]
T_{ST}	: 축열탱크의 내부온도 [$^{\circ}\text{C}$]
$T_{i\text{ndoor}}$: 실내온도 [$^{\circ}\text{C}$]
T_{set}	: 실내설정온도 [$^{\circ}\text{C}$]

그리스 문자

λ	: 열전도도 [$\text{W/m}\cdot\text{K}$]
ϕ	: 보정 계수 [-]
δ	: 바닥난방 파이프의 외부관경 [m]
ϑ_1	: 바닥난방 파이프의 내부표면 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
ϑ_3	: 바닥난방 파이프의 외부표면 온도 [$^{\circ}\text{C}$]

1. 서 론

기후 변화는 인간의 생활환경에 심각한 위협을 가하고, 기본적인 권리에 대해 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 기후 변화에 가장 중요한 원인은 이산화탄소로 국제사회는 파리협정(Paris Agreement)을 통해 탄소 배출량을 줄이기 위해 노력하고 있다[1]. 탄소 배출의 주요 원인은 에너지 생산을 위한 화석 연료의 연소이고, 인간이 대부분 시간을 보내는 건축물에서 에너지 수요는 지속적으로 증가하고 있다[2]. 국제사회는 건물부문의 에너지 소비와 탄소 배출을 효과적으로 줄이기 위해 제로에너지건축물 개념을 도입하고 있으며, 이를 실현하기 위해 고단열·고기밀의 패시브 기술과 함께 신재생에너지의 사용을 적극적으로 권장하고 있다.

제로에너지건축물 구현을 위해 태양광, 태양열, 지열 히트펌프를 중심의 신재생에너지 기술이 적용되고 있다. 특히, 지열원 히트펌프는 다른 신재생에너지 기술과 달리 외기조건에 영향을 거의 받지 않으므로 비교적 안정적인 성능을 확보할 수 있다. 이러한 지열원 히트펌프는 다양한 지역과 건물에 적용되어 도입 타당성이 평가되고 있다. Kapıcıoğlu and Esen[2]은 튀르키예의 온대기후에 있는 상업용 건축물을 대상으로 설계수명 20년 동안 천연가스를 활용하는 공조 시스템과 지열 히트펌프 시스템의 경제적, 환경적 측면을 조사하였다. 지열원 히트펌프는 천연가스 공조 시스템보다 초기투자비용이 높았지만 정부의 인센티브 정책을 통해 단가를 낮출 수 있었고, 20년 동안의 운영비용은 최대 65% 절감할 수 있었다. Nikitin et al.[3]은 성능적, 경제적, 환경적 관점에서 러시아의 가장 추운 10개 도시에서 공기열 및 지열 히트펌프 사용에 관한 비교연구를 수행하였다. 지열 히트펌프는 공기열 히트펌프보다 열원 온도의 우위가 있으므로 에너지 효율이 높았으며, 초기투자비용과 에너지비용을 모두 고려할 때 지열 히트펌프가 더 경제적인 시스템으로 분석되었다. Sohn et al.[4]는 중규모 상업용 건축물을 대상으로 냉동기·보일러(Chiller and Boiler)와 지열 히트펌프의 성능을

비교하였다. 에너지 시뮬레이션 분석결과, 지열 히트펌프는 냉동기-보일러보다 연간 에너지 소요량을 58% 절감할 수 있었다. 지열 히트펌프는 기존의 냉난방 시스템 및 공기열 히트펌프보다 성능적, 경제적, 환경적 이점이 있다[2-4]. 나아가, 실제 건축물에서 지열 히트펌프를 활용하기 위해 공조방식을 다각화하여 적용 가능성을 평가하고 있다. Zhang et al.[5]은 상업용 건축물에 지열 히트펌프를 활용하여 바닥난방 시스템의 난방 특성을 실험적으로 분석하였다. 지열 히트펌프를 활용한 바닥난방 시스템은 기존 공기열 히트펌프보다 32%의 에너지 절감 효과를 나타냈다. 또한, 전기요금이 저렴한 심야 시간 활용방안을 통해 에너지 비용 절감에 대한 더 높은 잠재성을 확인하였다. Tahersima and Tikalsky[6]는 1.22m 두께의 매스 콘크리트(Mass Concrete)를 활용하는 지열 히트펌프 기반 바닥복사난방 시스템을 제안하였다. 매스 콘크리트는 건축물의 축열 배터리 역할을 수행하였고, 실내에 균일한 온도분포를 제공하여 재실자의 열적 쾌적성을 개선하였다. Bae et al.[7]은 태양광열-지열 히트펌프 융복합 시스템을 활용하여 복사난방과 대류난방에 의한 실내의 온열환경과 성능을 분석하였다. 복사난방은 대류난방보다 히트펌프의 성능계수가 약 20% 높았고, 재실자의 열적 쾌적성을 만족시킬 수 있었다. Romani et al.[8]은 지열 히트펌프와 결합된 복사벽 난방 시스템을 제안하고, 실험을 통해 에너지 절감을 평가하였다. 복사벽의 열용량으로 인해 비수요기간에도 에너지를 저장할 수 있었으며, 최대 40%의 에너지 절감하였다.

지열 히트펌프를 활용한 바닥복사난방은 공기열 히트펌프 또는 대류난방 방식보다 에너지 소비를 절감하고 재실자의 열적 쾌적성을 만족할 수 있다. 그러나, 지열 히트펌프를 활용한 난방 시스템이 제로에너지건축물 구현을 위한 기술로써 활용되기 위해서는 에너지 소비의 저감효과와 함께 환경적 영향에 대한 정량적 평가가 필요하다. 그러나, 대부분 선행연구에서는 지열 히트펌프를 이용한 복사난방 시스템에 대해 에너지 측면만 고려하고 있으므로 설계, 설치, 운영을 포함한 전 과정에서 발생하는 탄소 배출량에 대한 정량적 데이터는 부족한 실정이다. 따라서, 제로에너지건축물 관점에서 지열 히트펌프를 이용한 복사난방 시스템의 도입 타당성을 검증하기 위해서는 전 생애주기(Life Cycle)에서 발생하는 탄소 배출량 평가가 필요하다. 본 연구에서는 제로에너지건축물 구현을 위한 기술로써 지열 히트펌프를 이용한 복사난방 시스템의 환경적 영향을 정량적으로 평가하기 위해 에너지 시뮬레이션 기반의 통합 시뮬레이션 모델을 구축하고, ISO 14040[9]에서 제시하는 전과정평가(Life Cycle Assessment) 방법을 활용하여 제조, 설치, 운영, 폐기단계에서 발생하는 탄소 배출량을 분석하였다. 또한, 지열 히트펌프를 이용한 복사난방의 환경적 이점을 제시하기 위해 기존의 대류난방 방식과 탄소 배출량 결과를 비교하였다.

2. 지열 이용 난방 시스템

2.1 통합 시뮬레이션 모델

Fig. 1은 지열 히트펌프 이용 난방 시스템의 통합 시뮬레이션 모델을 나타낸다. 본 연구에서 구축한 통합 시뮬레이션 모델은 선행연구[10]에서 제시한 에너지 시뮬레이션 기반 성능예측모델을 참조하였다. 선행연구에서는 통합 시뮬레이션 모델의 신뢰성을 해석결과와 실증실험의 실측데이터와 비교를 통해 검증하였다. 지열 히트펌프를 이용한 난방 시스템은 수직밀폐형 지중열교환기, 히트펌프, 축열탱크, 순환펌프의 네 가지 주요설비로 구성된다. 또한, 외기온도, 일사량, 지중온도와 같은 환경조건을 반영할 수 있는 모델을 이용하여 건물부하 모델과 지열 히트펌프 모델이 난방에너지 수요 및 소비전력을 정확하게 계산할 수 있도록 하였다. 난방 시스템의 운전은 Coupled-controller에서 사용자가 정의한 운전기간, 운전시간에 의해 근거하여 수행된다.

Fig. 2는 지열 히트펌프 이용 난방 시스템의 개요도 나타낸다. 지열 히트펌프를 활용한 바닥복사난방의 환경적 영향을 전 생애주기 관점에서 정량적으로 평가하기 위해 대류난방과 복사난방 두가지 방식을 비교 분석하였다. 대류난방 방식은 팬코일유닛(Fan Coil Unit)을 활용하여 난방운전을 수행하고, 복사난방은

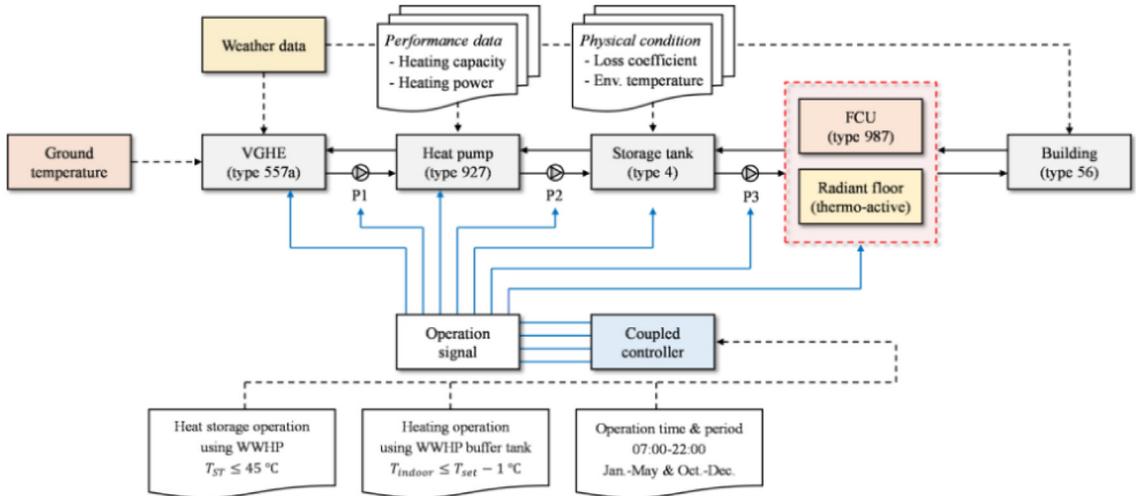


Fig. 1. Integrated simulation model of heating system with ground source heat pump.

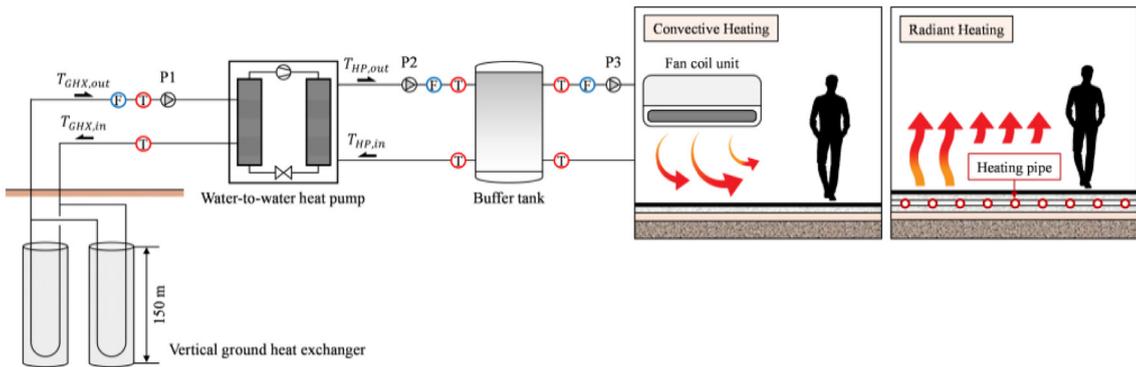


Fig. 2. Schematic diagram of a heating system with ground source heat pump [7].

바닥복사난방(Radiant Floor Heating)으로 결정하였다.

Table 1은 지열 히트펌프 활용 난방 시스템의 운전조건을 나타낸다. 난방 시스템의 운전시간은 24시간으로 설정하였으며, 운전방법은 (1) 히트펌프 이용 축열운전, (2) 축열탱크 이용 난방운전으로 구성된다.

Table 1. Operation conditions

Equipment	Operation On
Heat pump	$T_{ST} \leq 45^{\circ}\text{C}$
Pump 1	Synchronizes with heat pump
Pump 2	Synchronizes with heat pump
Pump 3	$T_{indoor} < T_{set} - 1^{\circ}\text{C}$
Fan coil unit or Radiant floor heating	Synchronizes with pump 3

히트펌프의 축열운전은 축열탱크의 내부온도(T_{ST})에 의해 결정된다. 축열탱크의 내부온도가 45°C 이하일 때 히트펌프는 축열탱크에 온수를 공급한다. 이때, 히트펌프의 1, 2차측에 설치된 순환펌프는 함께 가동된다. 한편, 축열탱크를 이용한 난방운전은 팬코일유닛 또는 바닥복사난방을 이용하여 수행된다. 팬코일유닛 또는 바닥복사난방은 실내온도(T_{indoor})가 설정온도($T_{set} = 22^{\circ}\text{C}$)보다 1°C 낮으면 축열탱크를 이용하여 난방운전을 수행한다.

2.2 건물부하 모델

난방 시스템의 운전을 위한 건축물의 난방에너지 수요를 결정하기 위해 저자의 선행연구[7]에서 구축한 건물부하 모델을 참조하였으며, 설계방법에 관한 신뢰성을 확보하고자 농림축산식품부의 저에너지주택 표준설계도면에 근거하였다. 건물부하 모델은 ISO 13790[11]에서 제시된 동적 해석방법을 기반으로 난방에너지 수요를 계산한다. 난방에너지 수요계산을 단순화하기 위해 건물부하 모델을 단일 공간(Zone)으로 설정하였고, 바닥면적은 140 m², 바닥에서 천장까지의 높이는 2.4m이다. 외피의 단열조건은 국토교통부에서 공고하는 「건축물의 에너지절약설계기준」의 [별표 1] 지역별 건축물 부위의 열관류율표에 근거하였다. 건축물 난방에너지 수요의 계산을 위해 요구되는 내부발열(Occupancy, Lighting, Equipment) 조건 및 난방 시스템의 On/Off 일정은 ASHRAE Standard 90.2[12]에서 제시하는 Midrise Apartment의 조건을 참조하였다. 건물부하 모델은 서울에 위치한 것으로 가정하였다. 모델의 연간 난방에너지 수요량은 11,039 kWh로 계산되었으며, 난방 최대부하는 9.35 kW로 산정되었다[16]. 난방에너지 수요량과 최대부하에 근거하여 지열 히트펌프를 이용한 복사 및 대류난방 시스템의 설계조건을 Table 2와 같이 결정하였다.

Table 2. Specific conditions of heating system using ground source heat pump

Equipment	Parameter	Value
Ground heat exchanger	Borehole diameter	0.15 m
	Borehole depth	200 m
	Number of borehole	1
Heat pump	Type	Water-to-water
	Rated heating capacity	10.5 kW
	Rated heating power consumption	2.93 kW
Heat storage tank	Volume	0.2 m ³
Circulating pump	Flow rate	30 L/min
	Rated power consumption	2 kW
Fan coil unit	Rated heating capacity	12.6 kW
	Rated fan power consumption	0.23 kW
Radiant floor pipes	Pipe length	574 m
	Pipe outside diameter	0.02 m
	Pipe wall thickness	0.001 m
	Pipe wall conductivity	1.36 kJ/h·m·K

2.3 바닥복사난방 모델

Fig. 2는 통합 시뮬레이션 모델에 활용된 복사난방의 구조와 열활성 모델의 구성요소(Thermo-active element)를 나타낸다. 복사난방의 구조는 콘크리트 슬래브, 압출법 보온판, 모르타르 및 마감재로 구성된다. 모르타르 내부에는 온수가 흐를 수 있는 파이프가 삽입되어 있다. 열활성 모델은 건축물의 구조체에 유체 시스템을 적용할 수 있으며, 건물부하 모델에 통합하여 바닥복사에 의한 실내의 냉난방 온도 조절에 활용된다.

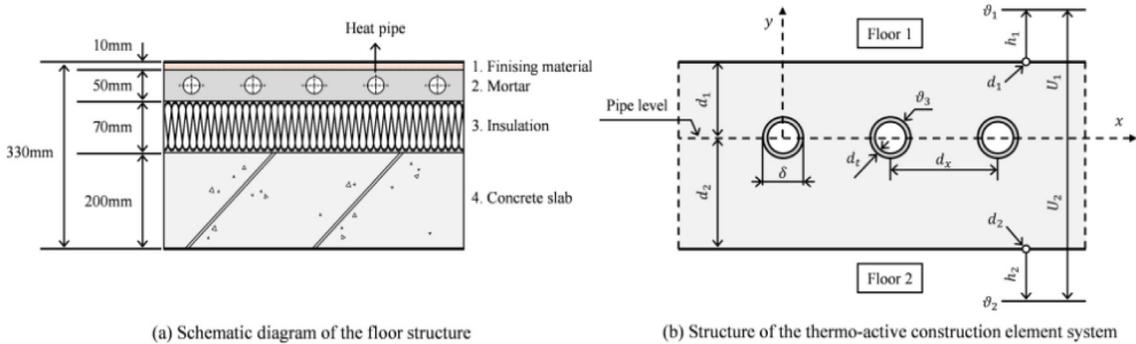


Fig. 3. Schematic diagram of radiant floor heating structure.

열활성화 부재의 단면 평면에서 파이프 사이의 유한한 거리로 인해 2차원 온도장(Temperature Field)이 형성된다. 파이프를 통한 열의 투입 또는 방출은 파이프 내의 유체의 온도를 변화시킨다[13]. 실내 공간을 향한 표면에서의 유체의 흐름에 대한 온도분포는 아래의 식 (1)부터 (3)을 통해 나타낼 수 있다.

$$q_a = \Phi \cdot U_1 \cdot (\vartheta_3 - \vartheta_1) + (1 - \Phi) \cdot \frac{U_1 \cdot U_2}{U_1 + U_2} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) \quad (1)$$

$$\Phi = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_b \cdot \Gamma}{d_x \cdot (U_1 + U_2)} \quad (2)$$

$$\Gamma = \left[\left(\frac{d_x}{\pi \cdot \delta} \right) + \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_b}{d_x \cdot (U_1 + U_2)} + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{g_1(s) + g_2(s)}{s} \right]^{-1} \quad (3)$$

3. 전과정평가

3.1 전과정평가 개요

본 연구에서는 지열 히트펌프를 이용한 난방 시스템의 전과정평가를 위해 제조, 시공, 사용, 폐기단계로 분류하고, 난방 시스템의 주요 구성요소에 관해 탄소 배출량을 계산하였다. 탄소 배출량은 내재탄소(Embodied Carbon)과 운영탄소(Operational Carbon)로 구분하였다. 내재탄소는 제조, 운송, 설치 및 폐기단계에서 발생하는 모든 탄소 배출량으로 정의된다. 내재탄소 배출량은 환경부에서 제시하는 환경성적표지(Environmental Product Declaration)의 탄소발자국 지수(Carbon Footprint Index)와 함께 특정제품에 대한

환경성적을 산정하는데 필요한 Life Cycle Inventory Database(LCI DB)를 활용하였다[14]. 한편, 운영탄소는 난방 시스템의 운전에 따른 에너지 소비량과 한국에너지공단에서 제시한 온실가스 전력배출계수(0.4781 kgCO₂eq/kWh)를 활용하여 계산된다[15]. 내재탄소 배출량과 운영탄소 배출량은 아래의 식 (4)와 (5)를 통해 나타낼 수 있다.

$$E_e = \sum CFI_i \times m_i \quad (4)$$

$$E_o = P_{SYS} \times f_i \quad (5)$$

3.2 제조 및 설치단계

Table 3은 제조 및 설치단계에서 발생하는 탄소 배출량을 나타낸다. 제조단계에서는 지열 히트펌프를

Table 3. Carbon emissions in manufacturing and installation stages

Stage	Parameter	Material	Unit	LCI DB (kgCO ₂ eq/unit)	CO ₂ emission (kgCO ₂ eq)
Manufacturing	GHEX	Polyethylene	360 kg	2.03	365
		Ethylene glycol	204 kg	1.37	139
		Reinforced steel	66 kg	3.19	105
		Bentonite	15222 kg	0.05	380
	Heat pump	Steel	190 kg	3.18	604
		Copper	44 kg	4.57	201
		Elastomere	20 kg	2.03	40.6
	circulating pumps	Stainless steel	49.8 kg	3.19	52.9
		Bronze	9.0 kg	4.57	13.7
		Rubber	1.2 kg	0.92	0.368
	Radiant floor	Polyethylene pipe	75 kg	2.03	152
		Mortar	5040 kg	0.12	604
	Fan coil unit	Steel	150 kg	3.18	477
		Polyethylene	9 kg	2.03	18.27
		Steel	32.4 kg	3.18	103
		Copper	1.5 kg	5	6.9
Transportation	1-ton truck	9 L	2.59	23.3	
Installation	Construction	Boring machine	722 L	2.59	1872
		Excavator	80.8 L	2.59	209
	Radiant heating	Pipe welder	1.5 kWh	0.49	0.735
		Stapler	0.4 kWh	0.49	0.196
		Mortar pump	195 kWh	2.63	512
	Convective heating	Pipe welder	1.5 kWh	0.49	0.735
		Electric wiring	9 L	2.63	23.7
Installation	Installation	0.4 L	0.49	0.294	

이용한 난방 시스템의 네 가지 주요 구성요소에 관해 (1) 원자재의 수집, (2) 장비생산 공정에서 발생하는 탄소 배출량을 고려하였다. 한편, 설치단계에서는 공장에서 제조된 장비와 시공재료들을 현장으로 운송하고 설치하는 과정을 고려하였다. 이 과정에서는 (1) 운송수단의 연료 소비, (2) 대규모 건설장비(천공기, 굴착기 등)의 연료 소비, (3) 지중열교환기 파이프 설치에 따른 탄소 배출량을 계산하였다.

제조단계에서 지열 히트펌프에 대한 탄소 배출량은 1901 kgCO₂eq로 계산되었으며, 지열 히트펌프에 복사와 대류난방 시스템이 결합할 때 탄소 배출량은 복사난방은 2657 kgCO₂eq, 대류난방은 2506 kgCO₂eq로 계산되었다. 복사난방은 대류난방보다 탄소 배출량이 6% (151 kgCO₂eq) 높았다. 이는, 복사난방이 건축물의 공조면적만큼 열교환 파이프와 모르타르를 사용하므로 대류난방보다 더 많은 장비와 재료가 사용되기 때문이다. 한편, 설치단계에서 장비의 운송과 지중열교환기 설치에 관한 탄소 배출량은 2104 kgCO₂eq로 계산되었다. 설치단계에서 발생한 탄소 배출량은 복사난방이 2617 kgCO₂eq, 대류난방이 2129 kgCO₂eq로 계산되었다. 제조단계와 동일한 이유로 복사난방은 건축물의 공조면적만큼 열교환 파이프를 설치하고, 단열재 및 모르타르 마감 작업을 수행하므로 대류난방보다 탄소 배출량이 약 23% (488 kgCO₂eq) 높았다.

3.3 운영 및 폐기단계

Table 4는 운영단계에서 발생하는 탄소 배출량을 나타낸다. 운영단계에서는 지열 히트펌프를 이용한 난방 시스템의 복사난방과 대류난방 운전에서 발생하는 탄소 배출량만 고려하였으며, 시스템의 노후화 및 유지보수와 관련된 배출량은 제외하였다. 복사난방과 대류난방의 난방기간(10월~5월) 동안 소비전력은 통합 시뮬레이션 모델을 통해 계산하였다. 복사난방에서 히트펌프와 순환펌프의 소비전력은 각각 5622 kWh, 865 kWh로 산출되었으며, 탄소 배출량의 합계는 3177 kgCO₂eq로 계산되었다. 한편, 대류난방의 소비전력은 8424 kWh로 산출되었으며, 탄소 배출량은 4127 kgCO₂eq로 계산되었다. 운영단계에서 복사난방은 대류난방보다 탄소 배출량이 약 23% (949 kgCO₂eq) 절감하였다. 이는, 복사난방이 대류난방보다 지열 히트펌프를 이용한 난방 시스템의 성능계수가 약 20% 높으므로 에너지 효율적인 운전을 수행하였으며[16], 난방 시스템의 소비전력을 70% (1937 kWh) 절감하였기 때문이다.

Table 5는 폐기단계에서 발생하는 탄소 배출량을 나타낸다. 해당 단계에서는 지열 히트펌프를 이용한 난방 시스템에 사용된 장비와 재료의 (1) 재활용, (2) 소각, (3) 매립, (4) 폐수과정에서 발생한 탄소 배출량을 고려한다. 폐기단계에서 지열 히트펌프의 탄소 배출량은 876 kgCO₂eq로 계산되었다. 지열 히트펌프와 복사난방 및 대류난방이 함께 고려될 경우 탄소 배출량은 각각 1282 kgCO₂eq, 989 kgCO₂eq로 계산되었다. 복사난방은 대류난방보다 탄소 배출량이 약 30% (293 kgCO₂eq) 높았다.

Table 4. Carbon emissions in operation stage

Stage	Parameter	Material	Unit	LCI DB (kgCO ₂ eq/unit)	CO ₂ emission (kgCO ₂ eq)	
Operation	Radiant heating	Heat pump	5622 kWh	0.49	2754	
		Pumps	865 kWh	0.49	423	
	Convective heating	Heat pump	6816 kWh	0.49	3340	
		Pumps		1142 kWh	0.49	559
			Fan coil unit	466 kWh	0.49	228

Table 5. Carbon emissions in disposal stage

Stage	Parameter	Phase	Material	Unit	LCI DB (kgCO ₂ eq/unit)	CO ₂ emission (kgCO ₂ eq)	
Disposal	GHEX	Recycle	Reinforced steel	30 kg	0.0038	0.114	
			Polyethylene	180 kg	3.41	613	
		Incineration	Cement	33 kg	1.8	59.4	
			Bentonite	8 kg	1.8	14.4	
		Landfill	Polyethylene	27 kg	0.01	0.27	
			Cement	5 kg	0.01	0.05	
			Bentonite	1 kg	0.01	0.01	
			Wastewater	Ethylene glycol	102 kg	1.17	119
		Heat pump	Recycle	Steel	171 kg	0.0038	0.65
			Incineration	Copper	44 kg	0.51	22.4
	Elastomere			20 kg	1.98	39.6	
	Landfill		Copper	7 kg	0.01	0.07	
			Elastomere	3 kg	1.57	4.71	
	Pumps		Incineration	Bronze	2 kg	0.51	1.02
		Rubber		1 kg	1.98	1.98	
	Radiant floor	Incineration	Polyethylene	118 kg	3.41	405	
	Fan coil unit	Recycle	Steel	182 kg	0.0038	0.12	
		Incineration	Polyethylene	9 kg	3.41	112	

3.4 장기 운영

지열 히트펌프 이용 난방 시스템의 전과정평가를 평가하기 위해서는 장기 운영에 따른 탄소 배출량의 정량적인 분석이 필요하다. 난방 시스템의 수명주기를 최대 20년으로 가정하였다. Table 6은 지열 히트펌프를 이용한 복사 및 대류난방의 20년 동안의 탄소 배출량을 나타낸다. 복사난방은 제조단계, 설치단계, 폐기단계에서 대류난방보다 탄소 배출량이 많았으나, 운영단계에서는 탄소 배출량을 절감할 수 있었다. 따라서, 복사난방 시스템은 대류난방 시스템보다 전과정에서 발생하는 탄소 배출량을 약 0.002% (18 kgCO₂eq) 절감하였다.

Table 6. Carbon emissions over 20 years

Stages	Radiant heating		Convective heating	
	1 years operation	20 years operation	1 years operation	20 years operation
Manufacturing	2657	2657	2506	2506
Installation	2617	2617	2129	2129
Operation	3177	63540	4127	82540
Disposal	1282	1282	989	989
Total	9734	70135	9784	88197

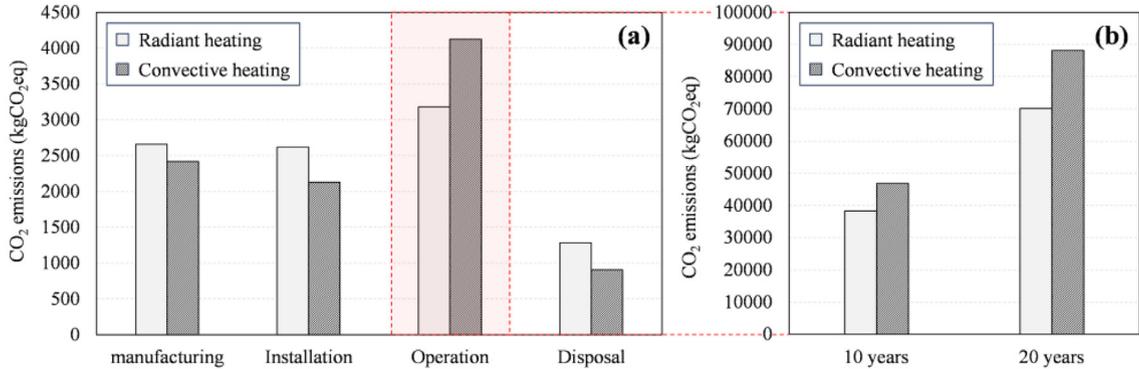


Fig. 4. Schematic diagram of radiant floor heating structure.

Fig. 3은 지열 히트펌프를 이용한 복사 및 대류난방의 각 단계별 탄소 배출량을 나타낸다. 지열 히트펌프를 이용한 난방 시스템을 10년간 이용했을 경우 복사난방과 대류난방의 탄소 배출량은 각각 38326 kgCO₂eq, 46894 kgCO₂eq로 계산되었으며, 탄소 배출량을 약 22% (8568 kgCO₂eq) 절감하였다. 최대 수명주기인 20년에서는 복사난방이 대류난방보다 탄소 배출량을 약 26% (18068 kgCO₂eq) 절감하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 제로에너지건축물 구현을 위한 기술로써 지열 히트펌프를 이용한 복사난방 시스템의 환경적 영향을 정량적으로 평가하기 위해 전과정평가 방법을 활용하여 제조, 설치, 운영, 폐기단계에서 발생하는 탄소 배출량을 분석하였다. 또한, 지열 히트펌프를 이용한 복사난방의 환경적 이점을 제시하기 위해 기존의 대류난방 방식과 탄소 배출량 결과를 비교하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- (1) 복사난방은 건축물의 공조면적만큼 열교환 파이프의 설치작업과 모르타르 마감작업이 필요하므로 대류난방보다 탄소 배출량이 제조단계에서 6%, 설치단계에서 23%, 폐기단계에서 30% 많았다.
- (2) 복사난방은 에너지 효율적인 운전으로 인해 대류난방보다 소비전력을 23% 절감하였다. 따라서, 복사난방의 운영단계 탄소 배출량은 대류난방보다 949 kgCO₂eq 감축할 수 있었다.
- (3) 복사난방은 대류난방 대비 환경적 이점은 장기 운영에서 큰 차이를 나타냈다. 복사난방과 대류난방의 1년차 탄소 배출량 차이는 0.002%이지만, 20년에는 26% (18068 kgCO₂eq)의 차이를 나타냈다.

후 기

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

1. International Energy Agency, 2022, <https://www.iea.org/energy-system/buildings>.
2. Kapıcıoğlu, A., and Esen, H., 2022, Economic and environmental assessment of ground source heat pump system: The case of Turkey, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 53, p. 102562.
3. Nikitin, A., Deymi-dashtebayaz, M., Muraveinikov, S., Nikitina, V., Nazeri, R., and Farahnak, M., 2021, Comparative study of air source and ground source heat pumps in 10 coldest Russian cities based on energy-exergy-

- economic-environmental analysis, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 321, p. 128979.
4. Sohn, B., Lim, H., and Kang, S., 2021, Comparison of Energy Performance between Ground-Source Heat Pump System and Variable Refrigerant Flow(VRF) Systems using Simulation, *Korean Society for Geothermal and Hydrothermal Energy*, Vol. 17, No. 3, pp. 30-40.
 5. Zhang, L., Huang, X., Liang, L., and Liu, J., 2017, Experimental study on heating characteristics and control strategies of ground source heat pump and radiant floor heating system in an office building, *Procedia Engineering*, Vol. 205, pp. 4060-4066.
 6. Tahersima, M., and Tikalsky, P., 2018, Experimental and numerical study on heating performance of the mass and thin concrete radiant floors with ground source systems, *Construction and Building Materials*, Vol. 178, pp. 360-371.
 7. Bae, S., Nam, Y., and Choi, J. H., 2020, Comparative Analysis of System Performance and Thermal Comfort for an Integrated System with PVT and GSHP Considering Two Load Systems: Convective Heating and Radiant Floor Heating, *Energies*, Vol. 13, No. 20, p. 5524.
 8. Romani, J., Perez, G., and Gracia, A., 2017, Experimental evaluation of a heating radiant wall coupled to a ground source heat pump, *Renewable Energy*, Vol. 105, pp. 520-529.
 9. International Organization for Standardization (ISO), 2006, *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*.
 10. Bae, S., and Nam, Y., 2021, Comparison between experiment and simulation for the development of a Tri-generation system using photovoltaic-thermal and ground source heat pump, *Energy and Buildings*, Vol. 231, p. 110623.
 11. International Organization for Standardization (ISO), 2006, *Energy performance of buildings — Calculation of energy use for space heating and cooling*.
 12. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 2004, *Energy-efficient design of low-rise residential buildings*.
 13. TRNSYS 18 Manual, 2017, *Multizone building modeling with type 56 and TRNbuild*.
 14. Korea Ministry of Environment, 2023, *Life cycle inventory database*. <https://www.keiti.re.kr>.
 15. Korea Energy Agency, 2022, *Electricity carbon emissions factor*. <https://tips.energy.or.kr>.
 16. Kang, Y., 2024, *Energy and LCA analysis of ground source heat pump with radiant heating using dynamic simulation*, M.S. Thesis, Pusan National University.