



동적 시뮬레이션을 이용한 수직밀폐형 및 에너지파일 지열시스템의 탄소배출량 분석

Comparative Analysis of Carbon Emissions of Energy Piles and Vertical Ground Heat Exchange Systems Based on Dynamic Simulation

강연주* · 김원예** · 남유진***

Yeonju Kang* · Kwonye Kim** · Yujin Nam***

* Main author, Graduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea (yj kang@pusan.ac.kr)

** Coauthor, Graduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea (ellie20@pusan.ac.kr)

*** Corresponding author, Professor, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea (namyujin@pusan.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: In the building sector, carbon emissions account for approximately 38% of the whole industry, hence solutions to reduce carbon emissions are needed. In order to achieve reduce carbon emissions, the use of renewable energy sources is essential, and quantitative calculation of the environmental load of renewable energy systems is necessary. Therefore, in this study, the performance analysis and carbon emissions calculation of the vertical heat exchanger (VHEX) system and the Energy Pile (EP) System were conducted. **Method:** The system's performance evaluation was conducted using dynamic energy simulation, and carbon emissions were calculated using the Life Cycle Assessment method based on ISO 14040. **Result:** As a result of the performance analysis, the VHEX system showed improved performance in both heating and cooling periods. As a result of the carbon emissions analysis, it is determined that the EP system can reduce emissions by approximately 19% in the manufacturing stage, approximately 99% in the construction stage, and 27% in the disposal stage compared to the VHEX system. Overall, the system performance of the VHEX system is higher than that of the EP system, but in terms of the environmental load, it is believed that the EP system can reduce the carbon emissions by about 1.2% compared to VHEX system.

KEYWORD

지열
수직밀폐형 열교환기
에너지파일
트랜시스
전과정평가

Ground Source
Vertical Heat Exchanger
Energy Pile
TRNSYS
Life Cycle Assessment

ACCEPTANCE INFO

Received Nov. 5, 2023

Final revision received Nov. 27, 2023

Accepted Dec. 1, 2023

© 2023. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

최근 전 세계적으로 이상 기후 문제에 대처하고자 전 산업 부문에서 온실가스 배출량을 감축하기 위한 국가 온실가스 감축목표(Nationally Determined Contribution, NDC)의 상향을 실시하고 있다. 건물 부문의 경우 탄소 배출량이 총 산업의 약 38%를 차지하여 탄소 배출량 저감 대책이 요구되고 있다. 이에 따라, 청정에너지를 열원으로 사용하여 온실가스 저감에 유리한 신재생에너지시스템이 주목받고 있다. 그 중, 지열 히트펌프 시스템을 활용한 에너지파일 시스템은 건물 기초부 말뚝에 지중열교환기를 삽입하여 설치하는 시스템으로 기존 시스템처럼 지중열교환기 설치를 위한 천공 작업이 불필요하다. 이에 따라 천공 시간 및 비용이 절감 가능하며, 환경적 측면에서 이산화탄소 배출량 저감 또한 가능하며 지열 히트펌프 시스템과 더불어 많은 연구가 진행되고 있다.

Li et al.은 3차원 수치모사를 통해 토양의 열특성이 지열 히트펌프 시스템의 운영에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과, 10년차의 냉난방 성능계수(Coefficient of Performance, COP)는 1년차에 비해 각각 1.67%, 29.01% 감소했음을 확인하였다[1]. Li et al.은 지

중열교환기(Geothermal Heat Exchanger, GHEX)의 3차원 동적 열전달 과정을 고려한 GSHP 시스템(Geothermal Source Heat Pump, GSHP)의 장기 성능 평가를 실시하였다. GHEX의 출구 수온은 10.7 °C 증가한 반면 열 불균형 비율은 76% 증가함을 확인하였다. 또한 토양 열 불균형으로 인해 냉각 COP가 절반으로 감소하고 시스템 수명도 단축되었음을 확인하였다[2]. Choi et al.은 장기 간 GSHP 운영이 도시 지역의 지하 열 상태에 미치는 영향을 조사하였다. 지하 열 상태는 10년 작동 후 초기 온도에 비해 전체적으로 7 °C 증가하였음을 확인하였다. 이로 인해 인접한 건물 부지에 열 침입이 발생하였다. 토양 열 불균형은 GSHP 시스템의 성능 저하 및 운영 수명의 주요 원인이며, 주변 토양에 부정적인 환경 영향을 유발함을 확인하였다[3]. Li et al.은 수치 시뮬레이션 모델을 통해 추운 지역 산업용 온실에 적용되는 GSHP 시스템의 장기 성능과 환경 영향을 평가하였다. 장기간 운전함에 따라 열추출 성능과 지반온도가 점차 감소하였다. 수심 40 m에서의 지반온도는 8.5 °C 감소하였다. 반면, GSHP의 CO₂ 배출량은 ASHP 및 등유 시스템에 비해 각각 20%, 22% 낮은 것으로 계산되었다. GSHP의 성능을 개선함으로써 배출량을 절감할 수 있음을 확인하였다[4]. Han et al.은 MicroPCM와 C50에 기반한 에너지파일을 제안하고 재료 특성부터 에너지 성능 분석에 이르기까지 체계적인 분석을 수행하였다. 그 결과 MicroPCM을 C50 콘크리트 시편에 통합하는 것을 제안하였다. 예

너지 파일의 기계적 및 열적 성능을 모두 고려할 때 W형 GHE와 MicroPCM이 첨가된 에너지 파일이 이 시나리오에 가장 적합한 옵션임을 확인하였다[5]. Haridy et al.은 에너지파일의 열성능을 극대화하기 위해 에너지파일의 열전도도에 영향을 미치는 8가지 요소를 조사하였다. 튜브 직경, 튜브 두께, 파일 열전도도, 튜브 열전도도, 토양 열전도도 및 U-튜브 내 순환수의 속도 등의 요인의 유의성을 통계적으로 평가하고 반응 표면 방법론을 사용하여 유의미한 요인의 최적 값을 얻고자 하였다. 결과적으로 튜브 두께, 물 속도 및 토양 전도성이 에너지 파일의 열 전도도에 미미한 영향을 미치는 반면 다른 요인은 상당한 영향을 미침을 확인하였다[6].

이처럼 에너지파일 지열 히트펌프 시스템의 성능분석 및 최적 설계 수법에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있으며, 최근 환경에 미치는 영향에 대한 연구들도 진행되고 있다[7, 8]. 하지만, 대부분 국외를 기준으로 환경영향평가를 진행하여 국내 실정에 맞는 연구는 드물다. 또한, 기존에 진행된 환경영향평가에 관한 연구들은 시스템의 생산, 설치, 운영, 폐기 전체적인 단계에 따른 포괄적 해석을 수행하였을 뿐 건축물 냉난방 에너지사용을 실질적으로 고려하여야 하는 운영단계에서의 에너지 사용량에 대한 구체적인 분석은 거의 없다. 따라서, 본 연구에서는 지열 히트펌프 시스템 중 에너지파일 시스템(Energy Pile System, EP System)과 수직밀폐형 시스템(Vertical Heat Exchanger System, VHEX System)의 성능을 정량적으로 분석하고 환경영향평가를 수행하여 두 시스템을 비교하였다. 시스템의 성능 평가는 동적 에너지 시뮬레이션 트랜시스(TRaNsient SYstem Simulation, TRNSYS)를 활용하여 수행하였으며, 환경영향 평가는 ISO 14040에 기반한 전과정영향평가(Life Cycle Assessment, LCA) 방법을 적용하여 탄소배출량을 산출하였다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 TRNSYS를 이용하여 VHEX 시스템 및 EP 시스템의 성능 예측 모델을 구축하였다. 예측 모델은 기상 조건과 건물 부하, 운전 스케줄을 고려하여 시스템 성능을 동적으로 해석하였다. 탄소 배출량의 산정은 시스템의 내구연한을 20년으로 설정하여 전 생애주기 동안 발생하는 탄소배출량을 산출하였다. 전과정평가를 수행하기 위해 제조 단계, 시공단계, 운영 단계, 폐기 단계의 시나리오를 설정하여 데이터를 수집하였으며, 수집된 데이터를 기반으로 각 단계별 해당되는 물질수지, 에너지수지, 물수지에 부합하는 환경성적표지 평가계수를 고려하여 탄소배출량을 산정하였다.

2. 시뮬레이션 개요

Fig. 1.은 수직밀폐형 지열 시스템과 에너지 파일 시스템의 개요도를 나타내며, Fig. 2.는 부하 모델의 형상 및 연간 부하 분석 내용을 나타낸다. 각 기기 효율 및 히트펌프 성능곡선은 기존 제품 카탈로그 및 선행연구 자료에 근거하여 설정하였다. VHEX 시스템은 수직밀폐형 지중열교환기(Ground Heat Exchanger, GHEX), 물-물 히트펌프(Geothermal heat pump system, GSHP), 팬코일유닛(Fan Coil Unit, FCU), 축열조(Heat Storage Tank, HST) 등으로 구성되

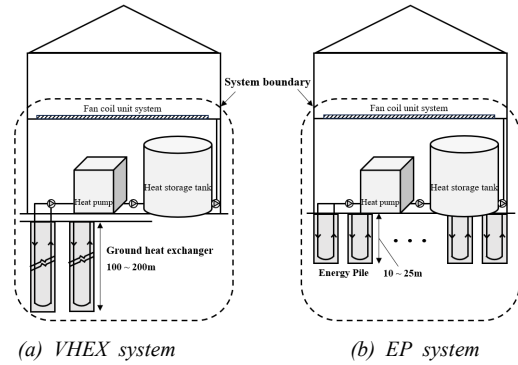


Fig. 1. System diagram

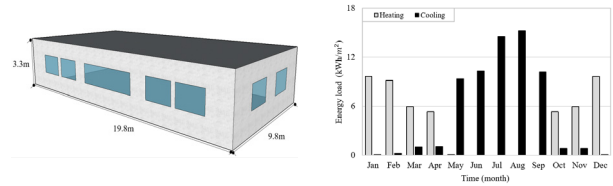


Fig. 2. Building load model

Table 1. Component conditions in TRNSYS 18

Component	Parameter	Specification
VHEX	Borehole depth	150m
	Quantity	2EA
	Flow rate	60LPM
Energy pile	Borehole depth	15m
	Quantity	20EA
	Flow rate	60LPM
Heat pump	Type	Water-to-water
	Capacity	20kW
	Heating COP	3.4
	Cooling COP	4.2
Circulating pump	Flow rate	60LPM
	Power	0.14kW
FCU	Capacity	22kW
	Power	0.35kW
HST	Volume	0.5m ³
	Set temperature	45°C

며 건물 운영 시간에 따라 냉난방 운전을 실시한다. EP 시스템 또한 동일한 사양의 설비기기로 냉난방 운전을 수행하며 에너지파일을 통해 지열 에너지를 획득한다는 점이 상이하다. Table 1.은 시스템 설비 기기의 사양을 나타낸다.

3. 시뮬레이션 결과

3.1. 냉난방기간 대표일 선정

연중 난방 기간은 11월부터 3월로 설정하였으며, 냉방 기간은 5월에서 9월로 설정하였다. 난방 기간의 대표일자는 1월 15일부터 1월 21일로 설정하였으며, 냉방 기간의 대표일자는 8월 15일부터 8월 21일로 설정하였다. 대표일자 선정 기준은 기상청 1년 기온 데이터 상 가장 기온이 낮고, 높은 날 일자 전후로 하여 선정하였다.

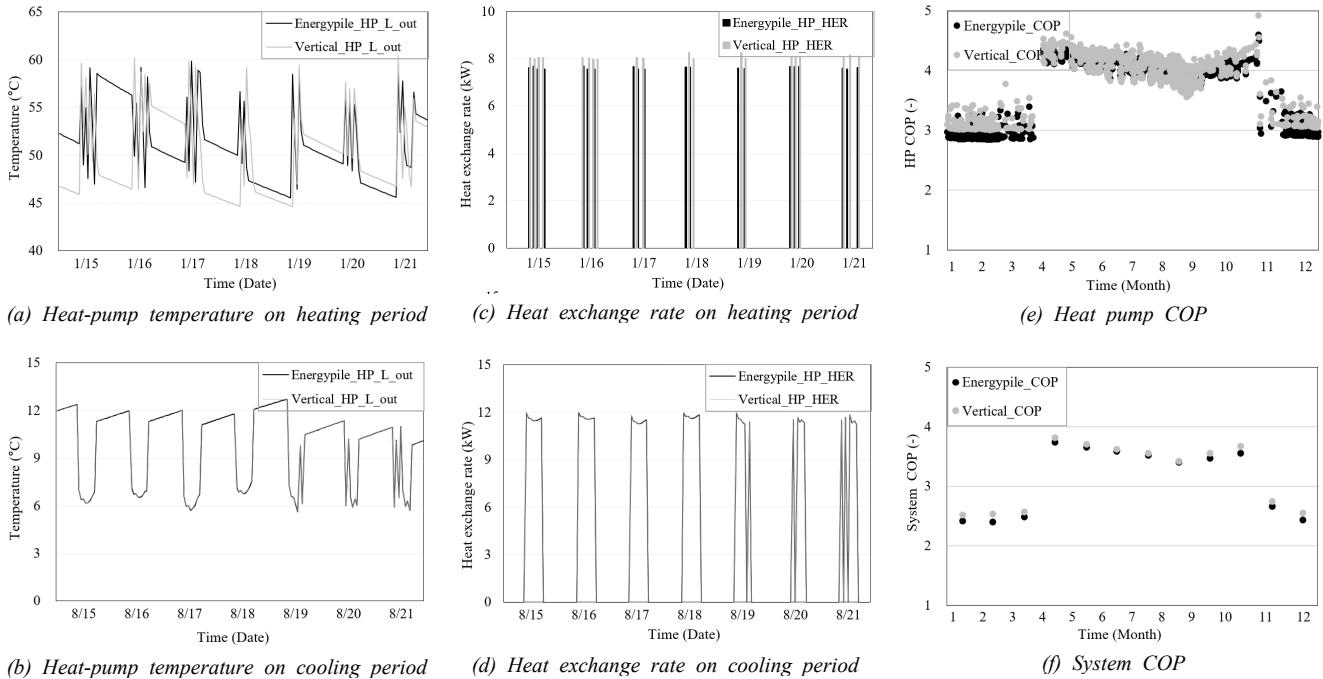


Fig. 3. Results of VHEX and EP system simulation by TRNSYS

3.2. 히트펌프 출수 온도

Fig. 3.은 TRNSYS의 VHEX 및 EP 시스템 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 난방 기간 대표 일자의 평균 히트펌프 출수 온도는 VHEX 시스템이 EP 시스템에 비해 약 2°C 높은 것으로 확인된다. TRNSYS 시뮬레이션 결과 에너지 파일 시스템 GHEX의 AST(Average Storage Temperature)는 약 16°C, 수직밀폐형 GHEX의 AST는 약 18°C로 확인되었다. 이는 VHEX 시스템의 지중열교환기의 삽입 길이가 약 150 m로 열교환이 이루어지는 지중의 온도가 상승하는 것으로 사료된다. 냉방 기간 대표 일자의 평균 히트펌프 출수 온도는 EP 시스템이 약 0.02°C 낮게 나타났다. 이는 에너지파일의 순환수가 더 낮은 지중온도와 열교환을 하여 출수 온도가 더 낮은 것으로 사료된다. 하지만 냉방 기간 동안 출수 온도 차이는 미미한 것으로 확인된다.

3.3. 열교환량 및 소비전력

난방 기간의 열교환량(Heat Exchange Rate, HER) 은 수직밀폐형 지열 시스템 8.06kW, 에너지 파일 시스템 7.61kW 으로 산정되었다. 냉방 기간의 열교환량은 수직밀폐형 지열 시스템 11.570kW, 에너지 파일 시스템 11.569kW 으로 산정되었다. 각 시스템의 히트펌프의 소비전력은 EP 시스템이 233kW 더 많이 소비되는 것으로 확인된다.

3.4. 히트펌프 COP

난방 기간의 히트펌프 COP는 VHEX 시스템이 더 높게 나타났다. 난방 기간에는 EP 시스템에 비해 온도차가 커 열교환량이 많고, 출수 온도가 높아 히트펌프 가동에 소요되는 전력량이 적어 높은 성능이 나타난 것으로 사료된다. 냉방 기간에는 히트펌프 출수 온도,

열교환기의 온도차, 열교환량, 히트펌프 전력 사용량 등의 차이가 적어 히트펌프 성능은 그 차이가 미미하였다.

3.5. 시스템 COP

난방 기간 대표 일자의 평균 시스템 COP는 VHEX 시스템 2.59이며, EP 시스템 2.49로 산출되었다. 냉방 기간 대표 일자의 평균 시스템 COP는 VHEX 시스템은 3.59이며 EP 시스템은 3.54로 산출되었다. 난방 기간 VHEX 시스템의 성능이 더 높게 나타난 이유는 EP 시스템에 비해 깊은 심도로 인하여 열원 온도가 높고, 이에 따른 열효율 상승으로 히트펌프 운전 횟수가 감소되어 소비되는 전력량이 절감되기 때문으로 사료된다. 냉방 기간 시스템 COP는 0.05의 다소 낮은 차이를 나타냈다. 에너지 파일 시스템은 심도가 얇아 외기 및 일사 등 외부환경요인에 대한 영향이 비교적 크게 나타나 상대적으로 수직밀폐형 지열 히트펌프 시스템에 비해 시스템 성능이 불리하다고 알려져 있다. 하지만 본 연구 결과 냉방 기간에는 두 시스템 성능이 약 1% 차이로 매우 미미한 차이를 보이는데, 이는 에너지 파일이 건물 구조체 바로 밑에 위치하기 때문에 외기 온도 영향을 덜 받게 되어 성능 저하가 미약한 것으로 사료된다.

4. 탄소배출량 결과

4.1. LCA 산정 범위

Fig. 4.는 VHEX 시스템과 EP 시스템의 전과정평가에 필요한 데이터 수집 범위를 나타낸다. 전과정평가란 제품 및 시스템의 전 생애주기 동안 발생하는 환경부하물질에 따른 환경 영향을 정량적으로 산정하는 방법이다. 평가 대상의 전 생애주기를 제조, 시공, 운영, 폐기 단계로 분류하여 각 단계별 환경 부하를 산정하고, 종합적인 평가

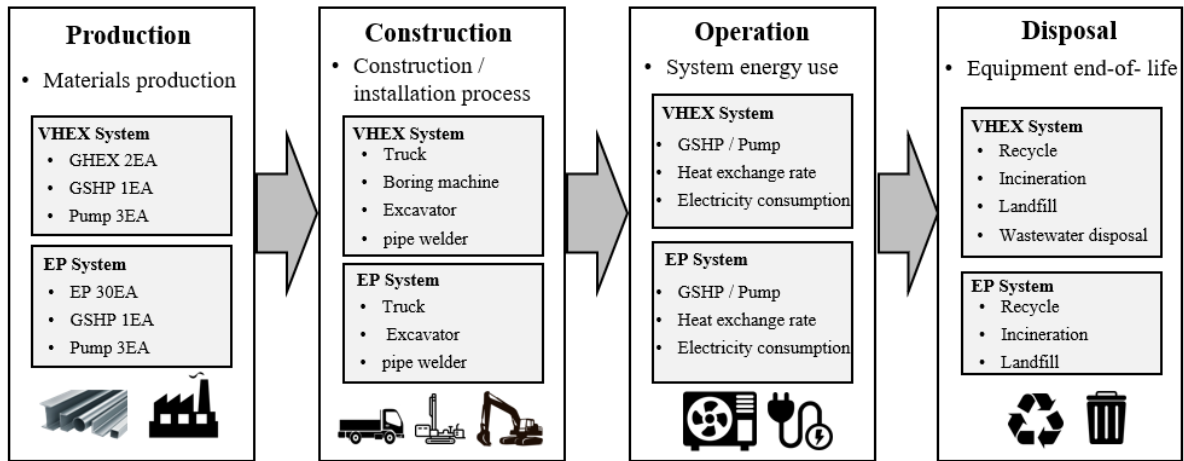


Fig. 4. LCA system boundary

를 실시한다.

본 연구에서는 VHEX 시스템과 EP 시스템의 환경영향평가를 위해 전과정평가기법을 적용하여 탄소배출량을 산출하였다. 제조, 시공, 운영, 폐기 단계별 산출을 수행하였으며, 단계별 탄소배출량 환경성적표지 계수는 환경성적영향평가표지(Life Cycle Inventory Database, LCI DB)에 근거하였다.

본 연구에서는 건물의 에너지 시스템에 해당되는 부분의 탄소배출량 산정을 실시하였다. 단계별 산정 범위는 다음과 같다. 제조 및 폐기단계의 설비 기기들의 자재 구성에 대한 데이터 수집은 제품 카탈로그 및 선행연구를 참고하여 수행하였다[9]. 시공단계는 시스템 구성 설비 기기의 운반 및 설치 과정을 고려하였다. 운반 과정은 이동 거리에 따른 트럭 연료 사용량을 참고하여 산출하였으며, 설치 과정에서는 시스템 설치에 사용되는 건설 기계들의 연료 사용량에 기반하여 탄소배출량을 산출하였다. 운영 단계의 경우 시뮬레이션 결과값을 토대로 산출된 전력 사용량에 따른 탄소배출량을 산출하였으며, 폐기단계는 시스템의 사용이 완료되어 폐기되는 과정에서 발생하는 탄소배출량을 산출하였다. 폐기단계에는 시스템에 포함된 기기의 재활용, 매립, 소각 등의 과정에서 발생하는 탄소배출량을 산출하였다.

4.2. 제조 단계

제조단계 탄소배출량 산정 시 에너지 파일 시스템의 경우 지중열교환기로 사용되는 에너지 파일 내 HDPE (High Density Polyethylene, HDPE) 파이프, 지열 히트펌프, 순환 펌프를 고려하였다. 에너지 파일은 PHC (Pretensioned spun High strength Concrete, PHC) 파이프를 사용하는 것으로 가정하였다. PHC파일은 천공홀의 빈 공간에 시멘트 페이스나 벤토나이트 같은 그라우팅 재료를 채우게 된다.

한편 에너지 파일은 기초부 말뚝에 설치되어 기존의 지열용 채움재 대신 콘크리트가 활용되므로, 지열용 채움재에 해당하는 벤토나이트 미사용으로 탄소배출량이 수직밀폐형 지열 시스템에 비해 약 305kgCO₂-eq 적게 배출되었으며, 탄소배출량은 1,223kgCO₂-eq로 산정되었다[10].

4.3. 시공 단계

에너지 파일 천공 시 파일 드라이버를 활용한 케이싱, 오거를 활용한 천공 과정, 천공 후 해머 타격을 통한 PHC파일 삽입 과정을 포함한다. 하지만 본 연구에서는 에너지 시스템에 해당되는 부분의 시공 과정만 고려하여 탄소배출량을 산정하였으므로, 파일의 천공 과정은 생략하였다. 따라서 해당 시스템의 설비기기의 운반, 에너지 파일 내부의 HDPE 파이프 설치 및 시공 과정을 고려하였으며 탄소배출량은 약 20kgCO₂-eq로 산정되었다.

수직밀폐형 지열 시스템의 경우 150 m의 지중열교환기를 2공 천공하는 것으로 설정하였다. 사용된 천공기는 시간당 약 90 L에 달하는 연료를 사용하여 총 탄소배출량은 약 2,102kgCO₂-eq로 산정되었다.

4.4. 운영 단계

에너지 파일 시스템의 1년 운영 소비 전력은 히트펌프의 경우 5,177kWh, 순환펌프 1,242kWh, 팬코일유닛 784kWh으로 산출되었다. 수직밀폐형 지열시스템의 1년 운영 소비 전력은 히트펌프의 경우 5,030kWh, 순환펌프 1,221kWh, 팬코일유닛 780kWh으로 산출되었다. VHEX 시스템 히트펌프의 경우 에너지 파일 시스템 히트펌프에 비해 높은 COP를 확보하여 20년 주기의 운영 단계 탄소배출량 산정 시 VHEX 시스템이 약 2.3% 만큼의 탄소배출량 저감이 이루어진 것으로 확인된다.

4.5. 폐기 단계

폐기 단계 탄소배출량은 제조 단계에서 사용된 재료들의 재활용 비율, 소각 비율, 매립 비율을 고려하여 산정하였다[11].

수직밀폐형 지열 시스템의 설비 기기 중 HDPE 파이프 폐기 시 가장 높은 탄소배출량을 나타내는 것으로 보이며, 특히 소각 시 배출량이 높게 산정되었다. HDPE 파이프는 폐기 시 생분해되지 않는 특성으로 환경오염도가 높아 상대적으로 큰 배출계수를 나타내는 것으로 확인된다[12]. 또한 에틸렌 글리콜이 주성분인 폐부동액은 비교적 높은 화학적 산소요구량(COD)을 나타낼 뿐만 아니라 소량의 산

Table 2. Carbon emission results in LCA stages

Production stage									
System	Component	Materials		Unit [kg]	LCI DB [kgCO ₂ -eq/unit]	Emission [kgCO ₂ -eq]	Total [kgCO ₂ -eq]		
VHEX system	GHEX	Polyethylene		180	2.03	365	1,527		
		Ethylene glycol		102	1.37	140			
		Reinforcing steel		33	3.19	105			
		:		:	:	:			
	GSHP	Steel		190	3.18	604			
Copper		44	4.57	201					
:		:		:	:	:			
EP system	Energypile	HDPE		166	2.03	338	1,223		
	GSHP	Steel		190	3.18	604			
		Copper		44	4.57	201			
		Elastomere		20	2.03	41			
	:		:		:	:		:	
Construction stage									
System	Machine	Capacity	Energy type	Unit [L/hr]	Hour	LCI DB [kgCO ₂ -eq/unit]	Emission [kgCO ₂ -eq]	Total [kgCO ₂ -eq]	
VHEX system	Boring machine	Borehole diameter 1000mm	Diesel oil	90	8	2.59	1,872	2,102	
	Excavator	6ton	Diesel oil	20	4	2.59	209		
	:	:	:	:	:	:	:		
EP system	Truck	1ton	Diesel oil	9	1	2.59	20	20	
	Pile driver	1.5ton	Diesel oil	7	20	2.59	-378		
	Pipe welder	1kW	Electricity	1	1	0.49	0.5		
	:	:	:	:	:	:	:		
Operation stage									
System	Component	EA	Capacity	Power [kW]	Energy	Power use [kWh]	LCI DB [kgCO ₂ -eq/unit]	Emission [kgCO ₂ -eq]	Total [kgCO ₂ -eq]
VHEX system	Circulating pump	3	60LPM	0.14	Electricity	1,221	0.49	598	3,445
	Geothermal heat pump	1	20kW	4.93/3.71	Electricity	5,030	0.49	2,465	
	Fan coil unit	1	20kW	0.35	Electricity	780	0.49	382	
EP system	Circulating pump	3	60LPM	0.14	Electricity	1,242	0.49	609	3,529
	Geothermal heat pump	1	20kW	4.93/3.71	Electricity	5,177	0.49	2,537	
	Fan coil unit	1	20kW	0.35	Electricity	784	0.49	384	
Disposal stage									
System	Phases	Component	Materials	Unit [kg]	LCI DB [kgCO ₂ -eq/unit]	Emission [kgCO ₂ -eq]	Total [kgCO ₂ -eq]		
VHEX system	Incineration	GHEX	Polyethylene	180	3.41	614	879		
			Cement	33	1.80	59			
	:	:	:	:	:	:			
EP system	Incineration	Energypile	HDPE	166	3.41	568	639		
	Landfill	GSHP	Elastomere	20	1.98	40			
	:	:	:	:	:	:			

화방지제 외에 다량의 중금속과 페놀, 아민 등도 포함되어 있어 폐기 과정에서 높은 배출계수를 나타내는 것으로 확인되어, HDPE 배출량에 뒤이어 높은 탄소 배출량을 발생시키는 것으로 파악된다[13].

에너지 파일 시스템의 에너지 파일은 수직밀폐형 지중열교환기와 다르게 벤토나이트와 같은 채움재가 사용되지 않고 시멘트 채움

재가 사용된다. 이에 따라 채움재에 해당하는 벤토나이트 미사용으로 인한 폐기 배출량이 삭감되어, 에너지 파일 시스템이 수직밀폐형 지열 시스템에 비해 약 240kgCO₂-eq 적은 탄소가 배출되는 것으로 파악된다. 폐기 단계에서의 시스템별 탄소배출량은 수직밀폐형 지열시스템은 879kgCO₂-eq, 에너지 파일시스템 639kgCO₂-eq로

Table 3. Carbon emission results

LCA stage	VHEX system		EP system	
	1 year operation	20 years operation	1 year operation	20 years operation
Production (A)	1,527	1,527	1,223	1,223
Construction (B)	2,102	2,102	20	20
Operation (C)	3,445	68,904	3,529	70,589
Disposal (D)	879	879	639	639
Total	7,954	73,412	5,411	72,471

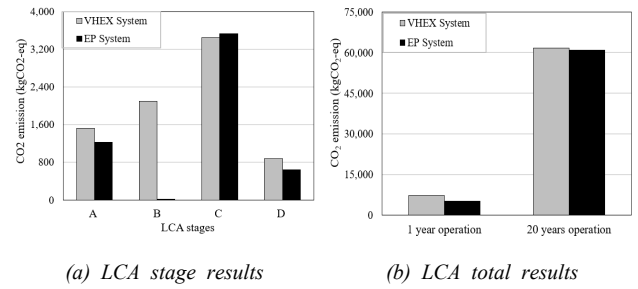


Fig. 5. Carbon emission result comparison

산출되었다. 전과정단계 배출량 중 폐기 단계 배출량은 VHEX 시스템의 경우 약 1.2%, EP 시스템은 약 0.8%를 차지한다. 폐기 단계의 배출량은 두 시스템 모두 전과정단계 배출량 중 가장 낮은 비율을 나타내는 것으로 확인된다.

5. 결론

본 연구는 수직밀폐형 지열 시스템과 에너지 파일 시스템의 성능을 분석하고, 전과정평가법을 활용하여 탄소배출량을 산정하였다. 분석 내용은 다음과 같다.

(1) 성능 분석 결과 냉난방 기간 모두 VHEX 시스템이 향상된 성능을 나타냈다. 산정된 난방 기간 VHEX 시스템의 평균 COP은 2.59이며, 에너지파일 시스템의 평균 COP은 2.49로 산출되었다. 냉방 기간에는 VHEX 시스템의 평균 COP은 3.59이며, 에너지 파일 시스템의 평균 COP은 3.54로 산출되었다.

(2) 탄소배출량 분석 결과 에너지 파일 시스템이 VHEX 시스템에 비해 제조단계에서 약 19%, 시공단계에서 약 99%, 폐기단계에서 27% 감축시킬 수 있는 것으로 파악된다. 에너지 파일 시스템은 에너지 시스템 구축을 위한 천공 과정이 따로 필요하지 않아 천공 과정에서 발생하는 탄소배출량을 절감할 수 있어, VHEX 시스템에 비해 비교적 높은 배출량 감축이 가능한 것으로 확인된다.

본 연구 결과 수직밀폐형 지열 시스템이 에너지 파일 시스템에 비해 시스템 성능은 더 높지만, 시스템의 환경부하적인 측면에서는 전생애주기 탄소배출량이 에너지 파일 시스템이 수직밀폐형 지열 시스템에 비해 약 1.2% 감축이 가능한 것으로 사료된다. 하지만, 본 연구에서 적용된 시나리오에서는 운영 단계에서 유지 보수에 관한 고려는 되어 있지 않다. 향후, 시스템의 유지 보수에 대한 환경 부하 산정을 수행하고 여러 신재생에너지 열원을 고려하여 신재생에너지 시스템의 성능 우위성 및 이산화탄소 배출량 저감 효과에 대한 정량적 평가를 실시할 예정이다.

Acknowledgement

이 논문은 2022년도 교육부 및 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다.(NRF-No.2022R1A4A1026503, No.2021R1A2C2014259)

References

- [1] B. Li et al., The influence of soil thermal properties on the operation performance on ground source heat pump system, *Renewable Energy*, 141, 2019.10, pp.903-913.
- [2] Z. Liu et al., Investigation on the feasibility and performance of Ground Source Heat Pump (GSHP) in three cities in cold climate zone, China, *Renewable Energy*, 84, 2015.12, pp.89-96.
- [3] W. Choi, R. Ooka, Y. Nam, Impact of long-term operation of ground-source heat pump on subsurface thermal state in urban areas, *Sustainable Cities and Society*, 38, 2018.04, pp.429-439.
- [4] H. Li et al., Evaluating the performance of a large borehole ground source heat pump for greenhouses in northern Japan, *Energy*, 63, 2013.12, pp.387-399.
- [5] C. Han et al., Characteristics and energy performance of novel MicroPCM C50 energy pile in cooling mode, *Energy and Buildings*, 274, 2022.11, 112442.
- [6] S. Haridy et al., Optimizing the thermal performance of energy piles using response surface methodology, *Case Studies in Thermal Engineering*, 41, 2023.01, 102637.
- [7] M. Smith et al., Life Cycle Analysis (LCA) of residential ground source heat pump systems: A comparative analysis of energy efficiency in New Jersey, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 2021.10, 101364.
- [8] A. Violante et al., Comparative life cycle assessment of the ground source heat pump vs air source heat pump, *Renewable Energy*, 188, 2022.04, pp.1029-1037.
- [9] 강연주 외 3인, 소규모 건물을 대상으로 한 태양광열-지열 융복합 시스템의 탄소배출량 분석, *설비공학논문집*, 제35권 제5호, 2023.05, pp.215-223. // (Y. Kang et al., Life cycle analysis of photovoltaic-geothermal hybrid system for a small office, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 35(3), 2023.05, pp.215-223.)
- [10] 박상우 외 3인, 병렬 U형 현장타설 에너지파일의 열교환 효율 및 적용성 평가, *대한토목학회논문집*, 제35권 제2호, 2015.04, pp.361-375. // (S. Park et al., Evaluation of heat exchange efficiency and applicability for parallel U-type cast-in-place energy pile, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 35(2), 2015.04, pp.361-375.)
- [11] 한국철강협회, 철강슬래그 2022년 재활용 실적 및 2023년 재활용 계획, 2023. // (Korea Steel Association, steel slag recycling performance in 2022 and recycling plan in 2023, 2023.)
- [12] 에너지단열경제, 플라스틱과 재활용, <https://kienews.com/news/newsview.php?ncode=1065602929635029>, 2019.11.06. // (Energy Insulation Economy, "Plastics and recycling", <https://kienews.com/news/newsview.php?ncode=1065602929635029>, 2019.11.06.)
- [13] 송양현, 에틸렌 글리콜을 포함한 폐기물로부터 옥살산과 옥살산염의 제조방법, <https://patentimages.storage.googleapis.com/d6/fb/78/f97061a976252f/KR100193011B1.pdf>, 1995.09.27. // (Y. Song, "Method for producing oxalic acid and oxalate from waste containing ethylene glycol", <https://patentimages.storage.googleapis.com/d6/fb/78/f97061a976252f/KR100193011B1.pdf>, 1995.09.27.)