

2단 가열식 지열시스템의 경제성 분석

An Economic Analysis of a Secondary Waste Heat Recovery Geothermal Heating System

신정수(Jeong Soo Shin)¹, 김선혜(Sean Hay Kim)^{2*}

¹서울과학기술대학교 일반대학원, ²서울과학기술대학교 공과대학 건축학부

¹General Graduate School, Seoul National University of Science & Technology, Seoul, 01811, Korea

²School of Architecture, Seoul National University of Science & Technology, Seoul, 01811, Korea

(Received October 31, 2016; revision received March 10, 2017; Accepted: March 23, 2017)

Abstract This paper provides an economic analysis of a new geothermal heat pump system that reuses condenser waste heat from a Ground Source Heat Pump (GSHP_{ch}) to provide energy for a hot water Ground Source heat pump (GSHP_{hw}). After conducting feasibility tests using GLD and TRNSYS simulations, the proposed system was effectively installed and thoroughly tested. We observe that 1) the Coefficient of Performance (COP) of the GSHP_{hw} and the GSHP_{ch} during cooling mode improves by up to 62% and 7%, respectively; 2) the number of bore holes can be reduced by two; and 3) the hot water supply temperature of the GSHP_{hw} increases by up to 60°C. We further conclude that 1) the reduction of two bore holes can save approximately ten million Won from the initial cost investment; and 2) the increased COP of the GSHP_{hw} can save approximately one million Won in annual electricity costs.

Key words Second stage heating-type geothermal heat pump(2단 가열식 지열히트펌프), Waste heat recovery (폐열회수), Condenser heat recovery(응축열회수), Economic analysis(경제성분석)

* Corresponding author, E-mail: seanhay.kim@seoultech.ac.kr

기호설명

GSHP_{ch} : 냉난방 지열히트펌프(Ground Source Heat Pump for cooling and heating)

GSHP_{hw} : 급탕용 부스터 지열히트펌프(Ground Source Heat Pump for hot water)

COP_{cs} : 냉난방 지열히트펌프(GSHP_{ch})의 시스템 성적계수(냉방모드)

COP_{hs} : 냉난방 지열히트펌프(GSHP_{ch})의 시스템 성적계수(난방모드)

COP_{hw} : 급탕용 부스터 지열히트펌프(GSHP_{hw})의 시스템 성적계수

EWT_{ch} : 냉난방 지열히트펌프(GSHP_{ch})의 열원 입구 온도

EWT_{hw} : 급탕용 부스터 지열히트펌프(GSHP_{hw})의 열원 입구온도

CHSP : 냉난방용 공급펌프(Cooling and Heating Supply Pump)

HWSP : 급탕용 공급펌프(Hot Water Supply Pump)

GLP : 지열원펌프(Ground Loop Pump)

C&H : 냉방 및 난방 모드

usRT : 미국 냉동톤 [3.516 kW]

1. 서론

지열히트펌프 시스템은 땅속의 암반이 보유한 열을 열원으로 사용하는 방식이다. 그러나 냉방 시 지열히트펌프의 응축열을 지중으로 버리게 되어 온열(溫熱)을 낭비하게 되고, 난방 시에는 증발열이 지중에 흡수됨에 따라 냉열(冷熱)을 낭비하게 되어 아까운 에너지를 재사용하지 못하는 비합리적 결과를 초래하게 된다.

이러한 폐열을 유용한 에너지로 재활용할 수 있는 방법들이 모색되었으나, 기존 지열히트펌프 시스템의 폐열(응축열) 회수 방법에서는 다음과 같은 문제점이 있었다.

Fig. 1에서 보면 GSHP_{ch}로 약 25℃의 열원수가 흘러 들어가면 응축기(Condenser)에서 가열되어 30℃ 정도로 토출된 후 폐열회수기(Heat recovery H/EX)에서 열을 방출하고 약 28℃로 되어 지중교환기(Geothermal heat exchanger) 측으로 흘러들어가며, 이 때 폐열회수기(Heat recovery H/EX)를 통해 얻을 수 있는 온도는 약 28℃ 수준으로, 보통의 급탕수 필요 온도인 45~50℃보다 약 20℃ 정도가 낮은 편에 속한다.

따라서 적정 온도의 급탕수 공급을 위해서 응축온도를 약 20℃ 이상 상승해 주어야 하며, 보통 3방향 밸브(3 Way valve) 등을 설치하여 GSHP_{ch}의 출구 측에서 토출된 물의 대부분을 숏 사이클(Short cycle)을 통해 다시 GSHP_{ch}의 입구측으로 흘러들어가게 하여 반복 가열하는 방식으로 승온을 행한다.

그러나 이 경우 Fig. 2의 P-h선도에서 보듯이 승온 시 응축온도선이 2-3라인에서 2'-3'라인으로 상승함으로써 압축기에 소요되는 동력이 a에서 b로 증가하게 되고, 냉방능력은 오히려 c에서 d로 다소 감소하게 되어 시스템의 성적계수(COP_{cs})가 많이 하락하게 된다. 따라서 종래의 지열히트펌프 시스템의 폐열회수 기술에서는 지중으로 버려지는 '폐열의 회수 및 재사용'이라는 큰 장점에도 불구하고, 이러한 높은 응축온도 때문에 지열히트펌프 시스템의 냉방 성적계수(COP_{cs})의 손실이 발생하여 그 효과를 반감하고 있는 실정이다.

이에 연구진은 냉난방 지열히트펌프(GSHP_{ch})의 응축열을 회수하여 급탕용 부스터 지열히트펌프(GSHP_{hw})의 증발기 가열원으로 사용하여 GSHP_{ch}와 GSHP_{hw}의 성적계수를 동시에 높이는 2단 가열식 지열시스템을 선행 연구에서 제안하였다.⁽¹⁾

2단 가열식 지열시스템은 외부 캐스케이드 폐열 회수 방식을 채택하고 있으며, 캐스케이드 냉동시스템에서 증발기의 증발온도를 상승시키면 전체 시스템의 성적계수 또한 상승한다는 점은 다음과 같은 연구에서 입증된 바 있다.

Song et al.⁽²⁾은 -7℃ 저온 외기조건에서 캐스케이드 급탕 히트펌프의 COP가 단단 사이클 대비 11.7%만큼 향상되고, 압축기의 토출온도가 낮아짐으로 압축기 냉동유의 탄화 및 열화 방지를 위한 신뢰성에도 유리함을 분석하였으며, Son⁽³⁾은 캐스케이드 냉동시스템의 증발온도를 증가시킬수록 캐스케이드 냉동사이클의 COP는 증가함을 실험을 통하여 확인하였다. Satyananda et al.⁽⁴⁾은 캐스케이드 냉동에서 COP를 향상시키는 유일한 방법은 증발온도를 올리는 것뿐이라는 것을 분석하였다. 또한, Gajendrasinh et al.⁽⁵⁾은 R744-R717의 캐스케이드 냉동방식에서 저열원측(R744) 증발기의 온도가 -55℃에서 -30℃로 상승할 때 시스템 성적계수가 1.24에서 2.08로 상승한다는 것을 보여주었다.

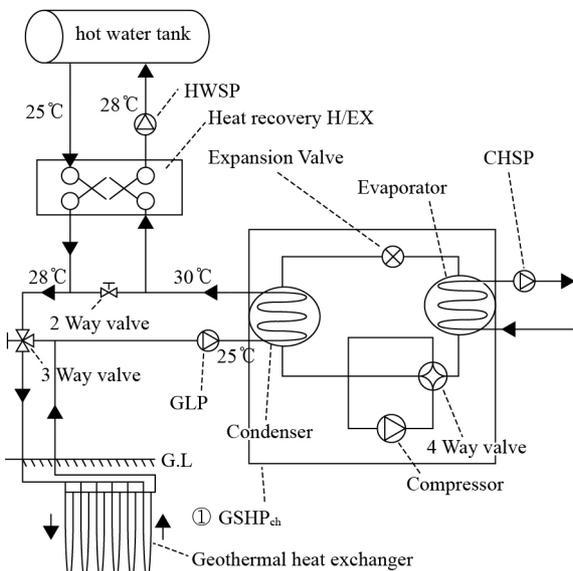


Fig. 1 Waste heat recovery in cooling mode.

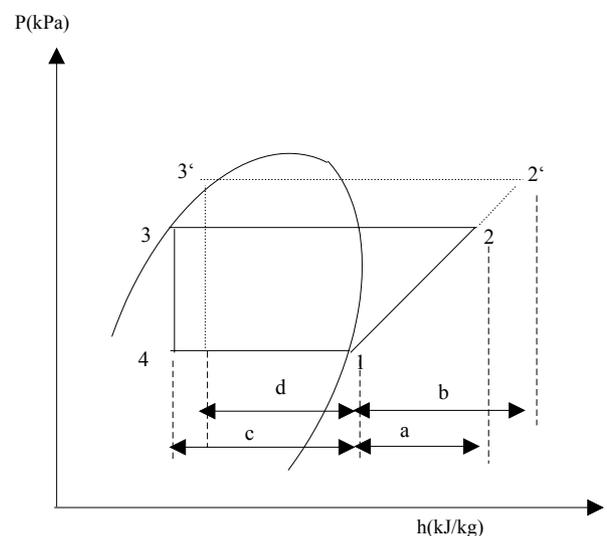


Fig. 2 P-h diagram of GSHP_{ch} in cooling mode.⁽¹⁾

본 연구에서는 기 개발된 2단 가열식 지열시스템의 시뮬레이션을 추가로 진행하여 연간 전력 소비량을 분석하여 경제성을 평가하였으며, 현장 실증시험을 통하여 시스템 성적계수의 향상을 최종 확인하였다.

2. 2단 가열식 지열시스템의 운전방식

2.1 2단 가열식 지열시스템의 냉방운전

2단 가열식 지열시스템은 Fig. 3에서 보듯이, 냉방운전 시 지중으로 버려지는 GSHP_{ch}(①)의 응축열을 회수하여 GSHP_{hw}(②)의 증발기의 가열원으로 재사용하는 구조로 되어있다.

GSHP_{ch}(①)가 냉방으로 운전되면 약 25℃의 히트펌프 입구온도(EWT : Entering Water Temperature)의 물이 응축기로 입수되며, 응축기 내부에서 작동냉매에 의해 가열되어 30℃ 수준으로 토출된다. 이때, 2방향 밸브(2 way valve)를 닫으면 30℃의 물은 GSHP_{hw}(②)의 증발기측으로 흘러들어가서 증발기 내부의 냉매를 가열할 수 있게 된다.

이때 열원수는 GSHP_{ch}(①) → GSHP_{hw}(②) → 지중열교환기(Geothermal heat exchanger) → GSHP_{ch}(①)순으로 연속 순환된다.

현재 한국에너지공단의 지열이용검토서 검토기준에서 GSHP_{hw}(②)의 EWT 설계기준이 5℃인데, 이와 같이 30℃의 온수가 입수하면 필요 응축온도 기준으로 압축기(Compressor)의 압축비를 많이 줄일 수 있고, 성적계수(COP_{hw}) 또한 상당량 상승할 것이다.

즉, Fig. 4의 P-h선도 상 증발온도선이 상승(4-1라인에서 4'-1'라인으로 상승)으로써 동일 필요 응축온도 기준으로 압축기에 소요되는 동력이 e에서 f로 줄어들어 그만큼 GSHP_{hw}의 급탕 성적계수(COP_{hw})를 상승시킬 수 있는 것이다.

다른 주목할 만한 점은, GSHP_{hw}(②)의 증발기에 의해 GSHP_{ch}(①)의 냉방 응축열이 예냉되는 효과를 가져올 수 있다는 점이다. 즉, 냉방으로 운전되는 GSHP_{ch}(①)의 응축기 방열이 땅속에서도 이루어지지만, GSHP_{hw}(②)의 증발기(열원측)에서도 동시에 이루어진다.

이로서 GSHP_{ch}(①)의 냉방 성적계수(COP_{cs}) 또한 GSHP_{hw}(②)의 증발기 흡수열의 상당량만큼 상승하며, 전체 지열시스템의 성적계수를 상승시킬 수 있다.

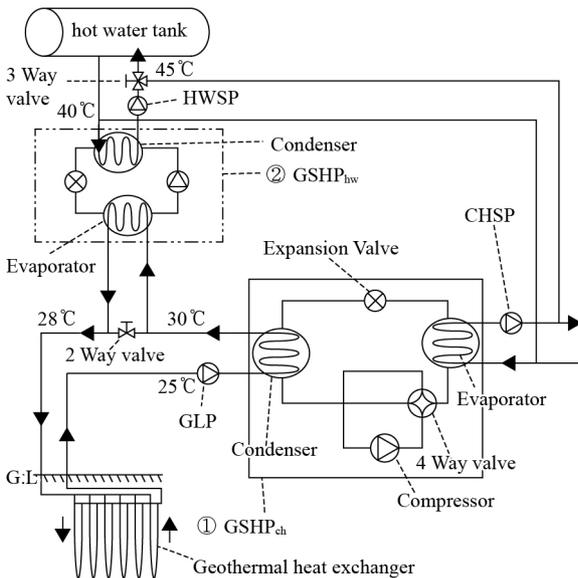


Fig. 3 Second stage heating-type geothermal heat system in cooling mode.⁽¹⁾

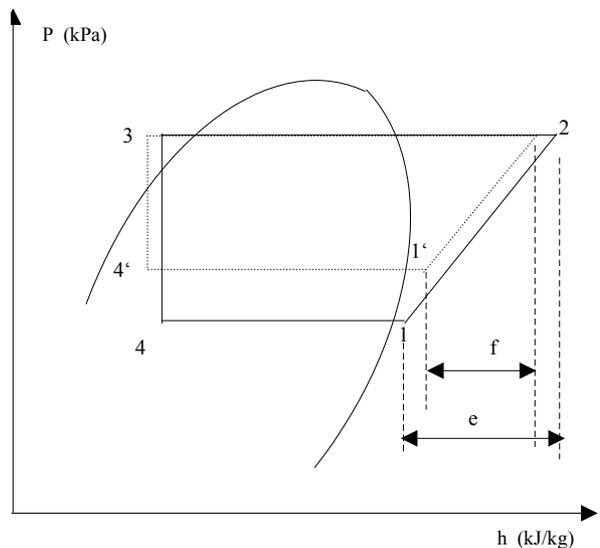


Fig. 4 P-h diagram of GSHP_{hw} at 30℃ of EWT_{hw}.⁽¹⁾

2.2 2단 가열식 지열시스템의 난방운전

GSHP_{ch}(①)의 난방운전 시 GSHP_{ch}(①)와 GSHP_{hw}(②)가 지중열교환기를 공유하여 부분부하 시에도 지중 열 에너지를 최대 사용할 수 있다(Fig. 5 참조).

이 때 고온급탕을 위해서는 열원수는 GSHP_{ch}(①) → 지중열교환기(Geothermal heat exchanger) → GSHP_{hw}(②) → GSHP_{ch}(①)로 흐른다. 지중의 열을 흡수한 열원수를 GSHP_{hw}(②)가 1차적으로 사용하여 다소 고온급탕이 가능하게 되면, 2차적으로 GSHP_{ch}가 사용하여 열의 온도 수준별 단계적 이용이 가능하게 된다.

즉, GSHP_{ch}(①)의 난방 운전 시에는 냉방 운전 시 대비 경제성은 다소 떨어지지만 고온급탕에는 효과적이다.

3. 시뮬레이션을 이용한 예비분석

3.1 모델링 조건

GLD(Ground Loop Design)⁽⁶⁾와 TRNSYS⁽⁷⁾를 이용하여 시스템의 COP 변화와 천공수 절감효과 및 연간 에너지 소요량을 각각 예비분석하였다. 그 현장 설치조건 및 주요 설비의 설치 현황은 Table 1과 같다.

또한, 실제 현장에 적용된 히트펌프의 응축온도 변화에 따른 성능(Capacity)과 동력(Power Input)변화의 특성 곡선값을 GLD와 TRNSYS의 히트펌프 속성으로 입력하였다.

3.2 GLD 시뮬레이션

3.2.1 EWT_{hw} 상승에 따른 GSHP_{hw}의 성적계수 향상

2단 가열식 지열시스템의 GLD 시뮬레이션을 위하여 먼저 입력변수를 Table 2와 같이 입력하였으며, 기타 상세 조건들은 한국에너지공단에 제출 및 승인된 ‘지열이용검토서’를 기준으로 하여 일치시켰다.

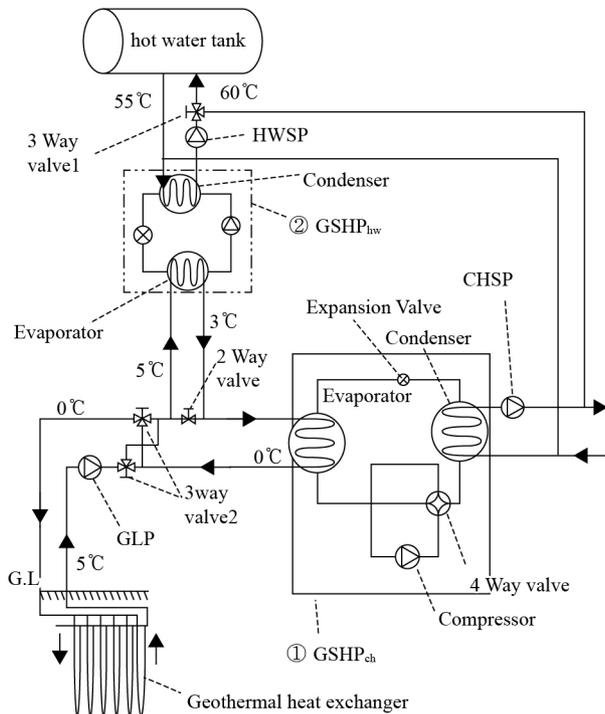


Fig. 5 Second stage heating-type geothermal heat system in heating mode.⁽¹⁾

Table 1 Modeling and test conditions

Test building	A Sports Center in Jeon Ju, Korea
Floor area	2,158 m ²
GSHP _{ch}	149,854 W×2 EA
GSHP _{hw}	150,544 W×1 EA
GLP	9,330 W×1 EA(18 kg/s)
CHSP	9,330 W×1 EA(18 kg/s)
HWSP	5,330 W×1 EA(9 kg/s)
Ethanol mixing ratio	20%
Bore holes	170 m×36 holes×Φ0.15
Pipe type	HDPE, 40 A, SDR-11

Table 2 Main input parameter of GLD

Ground Temperature(°C)	14.3
Soil Thermal Conductivity(W/m · K)	2.68
Thermal Conductivity(m ² /day)	0.063
Flow Rate/usRT(L/min)	12.9
Ethanol(%)	20
Grout Thermal Conductivity(W/m · K)	0.99
Borehole Diameter(mm)	150
Borehole Thermal Resistance(m · K/W)	0.176
Borehole Separation(m)	5
U-Tube Inner Diameter(mm)	40
U-Tube Configuration	single
Radial Pipe Placement	average

Table 3 EWT_{hw} Vs. COP_{hw} of the heat recovery operation⁽¹⁾

EWT _{hw}	5℃	20℃	30℃
COP _{hw}	3.5	4.8	5.6

GLD를 이용하여 2단 가열식 지열시스템의 GSHP_{hw}(②)의 EWT_{hw}가 5℃에서 30℃로 증가시켰을 때, 시스템 성적계수(COP_{hw})가 3.5에서 5.6으로 약 60% 정도 상승할 수 있음을 Table 3에 확인할 수 있다.

즉, 히트펌프의 열원수 입구온도(EWT_{hw})에 거의 비례하여 히트펌프의 성적계수(COP_{hw})가 개선됨을 분석해낼 수 있었다.

3.2.2 GSHP_{ch}의 냉방 운전 시 폐열회수로 인한 성적계수 향상

2단 가열식 지열시스템에서는 GSHP_{hw}의 증발기가 GSHP_{ch}의 응축기 방열량을 흡수하는 것이므로 EWT_{ch}를 그 만큼 차감(30 → 28.4℃)하여 COP_{cs}가 4.0에서 4.2로 약 5% 정도 개선되었다(Table 4 참조).

또한, COP_{cs} 개선효과를 대신하여 지열 천공수 절감 효과로 대치하였을 때의 천공수 절감량을 환산해 보았다. GSHP_{hw}의 증발기가 GSHP_{ch}의 응축기 방열을 흡수한다고 볼 수 있으므로 건물 부하 총량에서 흡수량 만큼 차감하여 GLD로 다시 분석한 결과, COP_{cs} 4.0을 유지하면서도 필요 지열 천공수가 36공에서 34공으로 감소함을 Table 5에서 보여준다.

3.3 TRNSYS 시뮬레이션

3.3.1 TRNSYS 시뮬레이션 조건

TRNSYS를 사용하여 냉난방과 급탕의 동시성을 고려한 시나리오별 성능과 연간 소비전력량을 예측해보았으며, 그 현장 설치조건 및 설비 설치 현황은 GLD에서와 동일하다. 다만 실제 진행된 전북 전주시 대신 서울시 기후데이터를 사용하였다.

3.3.2 TRNSYS를 사용한 연간 시뮬레이션

GSHP_{ch}와 GSHP_{hw}의 단독운전(Individual operation)시의 연간 소비전력량 및 시스템 성적계수를 기본값(Base-line)으로 하여 폐열회수 운전 (Heat recovery operation)과의 결과를 비교분석하였다.

Table 4 GLD result of GSHP_{ch} in cooling mode to assess a feasibility of improved COP_{cs}

EWT _{ch} (℃)	30	28.4
Total Length(m)	6,563.2	
Borehole Number	36	
Borehole Length(m)	182.3	
Ground Temperature Change(℃)	+0.3	+0.3
LWT _{ch} (℃)	34.9	33.3
Peak Load(kW)	347.9	350.8
Total Unit Capacity(kW)	307.0	307.0
Peak Demand(kW)	76.2	72.9
Heat Pump COP only	4.6	4.8
COP_{cs}	4.0	4.2
System Flow Rate(L/min)	1123.4	1123.4

Table 5 GLD result of GSHP_{ch} in cooling mode to assess a feasibility of reduced boreholes

	Cooling
Total Length(m)	5,564.0
Borehole Number	34
Borehole Length(m)	163.6
Ground Temperature Change(℃)	0.0
EWT _{ch} (℃)	30.0
LWT _{ch} (℃)	34.9
Peak Load(kW)	307.0
Total Unit Capacity(kW)	347.9
Peak Demand(kW)	76.2
Heat Pump COP only	4.6
COP _{cs}	4.0
System Flow Rate(L/min)	1,126.0

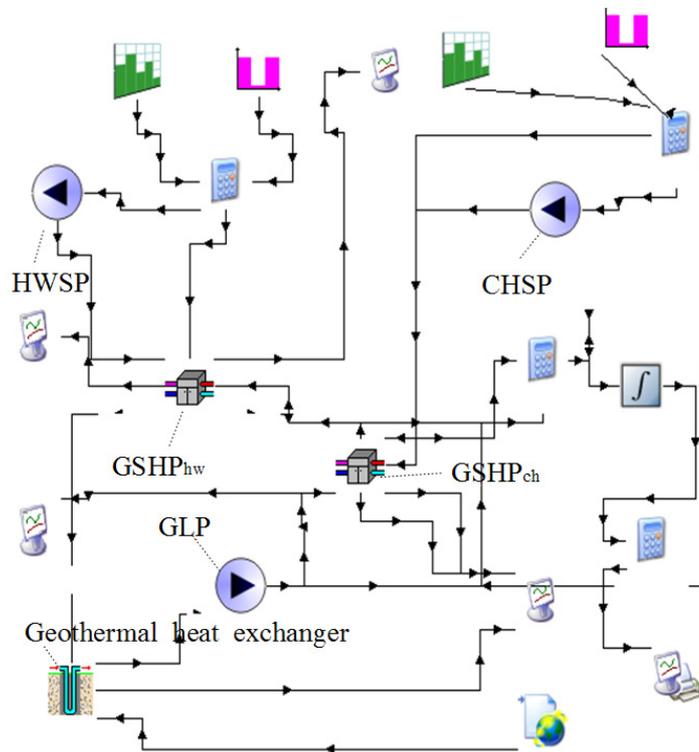


Fig. 6 Second stage heating-type geothermal heat system.

Fig. 6과 같이 GSHP_{hw} 단독운전 및 폐열회수 시의 연간 건물의 전체 냉방, 난방 및 급탕 부하를 시뮬레이션 하였다. 여기서 두 대의 히트펌프(GSHP_{ch}와 GSHP_{hw})를 직렬로 배치하여 GSHP_{ch}의 응축기 폐열(응축열)을 GSHP_{hw}의 증발기 가열원으로 활용할 수 있게 된 점이 가장 큰 특징이다.

냉난방 및 급탕을 위해 부하 측의 냉난방용 공급펌프(CHSP)와 급탕용 공급펌프(HWSP)에서 GSHP_{ch}와 GSHP_{hw}로 각각 환수되는 냉수와 온수의 온도는 한국에너지공단의 설비인증기준에 맞게 각각 12℃와 40℃로 맞추었으며, 각 펌프의 유량은 지열이용검토서상의 설계 유량값(Table 1)을 적용하였다.

시뮬레이션 결과, Table 6에서 보이듯 여름철 폐열 회수 운전 시 GSHP_{hw}와 GSHP_{ch}의 소비전력량이 각각 40.3%와 28.9% 절감되고, 전체 연평균 전력량 측면에서도 21.8% 절감되었다. 난방기에는 폐열회수 모드가 아니지만 GSHP_{hw}와 GSHP_{ch}의 감소전력이 각각 21.1%와 2.8%로 예상 밖으로 감소량이 높은 것으로 나타났다. GSHP_{hw}의 감소전력은 열원펌프(GLP)의 단일화(2대 → 1대)로 인한 효과(-942 kWh)와 지중열교환기의 통합화 및 열원수 회로의 역전(-4,576 kWh)에 기인하는 것으로 보이며, GSHP_{ch}의 감소전력 역시 열원펌프의 단일화로 인한 효과(-1,337 kWh)와 지중열교환기의 통합화 및 열원수 회로의 역전(+169 kWh)에 기인하는 것으로 사료 된다(Fig. 5 참조).

Table 6 Annual electricity uses of the Second stage heating-type geothermal heat system

	Annual Electricity Consumption(kWh)				Total
	GSHP _{ch}		GSHP _{hw}		
	Cooling season	Heating season	Cooling season	Heating season	
Individual operation	71,163	41,664	16,702	26,124	155,653
Heat recovery operation	50,581	40,496	9,968	20,606	121,651
Reduced electricity	20,581 (-28.9%)	1,168 (-2.8%)	6,734 (-40.3%)	5,518 (-21.1%)	34,002 (-21.8%)

Table 7 Increased COP's of GSHP_{hw} and GSHP_{ch}

		Individual operation	Heat recovery operation
Cooling season	COP _{hw}	3.43	5.75(+67.6%)
	COP _{cs}	3.94	5.54(+40.6%)
Heating season	COP _{hw}	3.43	4.35(+26.8%)
	COP _{hs}	3.49	3.59(+2.9%)

또한, GSHP_{ch}의 난방운전 시 응축기의 폐열을 회수하여 GSHP_{hw}의 증발기 가열원으로 사용함에 따라 COP_{hw}가 약 3.43에서 5.75로 상승함을 확인할 수 있었고, COP_{cs} 역시 3.94에서 5.54로 상승함을 확인하였으며, 난방운전 시에는 폐열회수 운전이 아님에도 불구하고 열원펌프의 단일화와 지중열교환기의 통합화 및 열원수 회로의 역전으로 인하여 COP_{hw}가 약 3.43에서 4.35로, COP_{hs}가 3.49에서 3.59로 다소 상승함을 확인하였다(Table 7 참조).

4. 실증

4.1 실증시험의 조건

시뮬레이션 예비 분석을 바탕으로 2016년 7월 22일부터 8월 2일까지 난방기간에 해당하는 12일 동안 2단 가열식 지열시스템이 실제 설치된 현장에서 검증을 진행하였으며, 현장 설치조건 및 설비 설치현황은 Table 1과 일치하며, 실증건물의 부하 분석 결과를 Table 8에 명시하였다.

4.2 EWT_{hw} 변화에 따른 GSHP_{hw}의 시스템 성적계수 향상

GSHP_{hw}가 GSHP_{ch}의 폐열을 회수하여 GSHP_{hw}의 EWT_{hw}가 7.7℃, 11.4℃, 20.5℃로 상승함에 따라 COP_{hw}는 2.57, 2.87, 3.34로 거의 선형으로 향상됨을 확인하였다(Fig. 7 참조).

또한, 한국에너지공단의 난방 혹은 급탕운전 시 EWT_{hw}의 기준이 되는 5℃와 폐열회수 가능 온도인 약 30℃ 까지 구간의 범위로 확장하여 보간하면 COP_{hw}가 2.41에서 3.91까지 최대 62%까지 상승할 수 있음을 추정할 수 있다(Table 9 참조).

Table 8 Load analysis of the test building

Site	A Sports Center in Jeon Ju, Korea
Peak cooling load	299,708 W
Peak heating load	301,088 W
Peak hot water load	150,544 W
Annual cooling load	280,384 kWh
Annual heating load	145,407 kWh
Annual hot water load	146,892 kWh

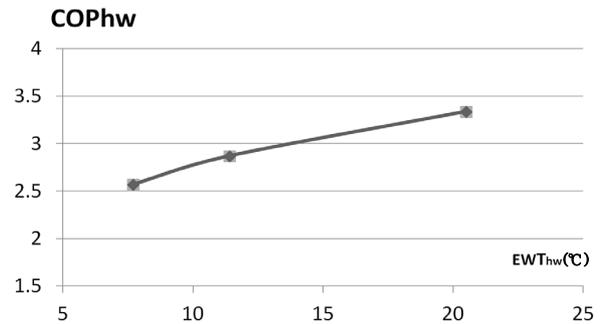


Fig. 7 Increased COP_{hw} of GSHP_{hw} upon increased EWT_{hw}.

Table 9 Increased COP_{hw} of GSHP_{hw} upon increased EWT_{hw}(with regressions)

EWT _{hw}	5	7.7	11.4	20.5	25	30
COP _{hw}	2.41*	2.57	2.87	3.34	3.61*	3.91*

* extrapolated.

4.3 폐열회수 유무에 따른 GSHP_{ch}의 시스템 성적계수의 향상

체육관이 운영되는 시간 동안 GSHP_{hw}를 끄고 GSHP_{ch}만 운전을 진행하여 1시간 30분을 가동한 뒤(단독운전 EWT_{ch} = 약 16°C), GSHP_{ch}와 GSHP_{hw}를 약 1시간 30분 정도 동시 운전하는 방식으로(동시운전 EWT_{ch} = 약 15°C, EWT_{hw} = 약 19°C) 비교 실증시험을 진행하였다(Fig. 8 참조).

GSHP_{ch}는 GSHP_{hw}와의 동시운전 기간 동안에는 GSHP_{ch}가 GSHP_{hw}의 증발기를 활용하지만, GSHP_{ch} 단독 운전의 경우에는 응축열 모두가 지중열교환기의 부하로 작용하게 되기 때문에 EWT_{ch}가 약 1°C 정도 차이가 나게 되고, COP_{cs}가 2.67(동시운전)에서 2.5(단독운전)로 감소하게 된다.

Table 10과 Table 11에서는 실증시험, GLD, TRNSYS 결과를 서로 비교하였다. 특히 Table 11에서 TRNSYS의 COP_{cs} 증가율이 높은 이유는, 실증시험과 GLD 대비 열원펌프의 단일화와 지중열교환기의 통합화로 EWT_{ch}가 상당히 저하되었기 때문이라 사료된다. 또한 GLD, TRNSYS의 COP 범위가 실증시험의 COP 범위보다 높은 이유는 실증시험에서는 GSHP_{hw}로 환수되는 온수의 온도가 GLD나 TRNSYS에서의 값인 40°C보다 6°C 높은 46°C, 즉 현장조건에 맞추었기 때문이다. 이러한 시뮬레이션과 실증시험의 차이는 후속연구에서 더 심도 있게 다룰 예정이다.

5. 경제성 분석

5.1 경제성 분석의 조건

경제성 분석 측면에서 시뮬레이션(GLD, Trnsys)보다 다소 보수적이고 실질적인 평가를 하기위해서 실증 시험 결과를 기준으로 평가하였다.

5.2 초기투자비 절감

제 3.2.2절에서 2단 가열식 지열시스템은 기존 시스템에 비해 약 2개의 천공을 줄일 수 있는 것으로 분석되었다. 이를 통하여 절약할 수 있는 금액은, 국내 평균 지열 천공 실행가를 기준으로 1공(Hole)에 소요되는 상당 비용(천공, 그라우팅, 지중열교환기 설치비용 등 포함)을 약 5백만 원으로 산정 시 약 1천만 원을 절약 가능하다. 단, 약간의 우회배관 공사비나 밸브류 공사비가 증가될 수 있으나, 급탕펌프나 열교환기 등에서 감소되는 공사비가 있어 전체적으로 공사비의 변화폭은 미미하여 계산에서 제외하였다.

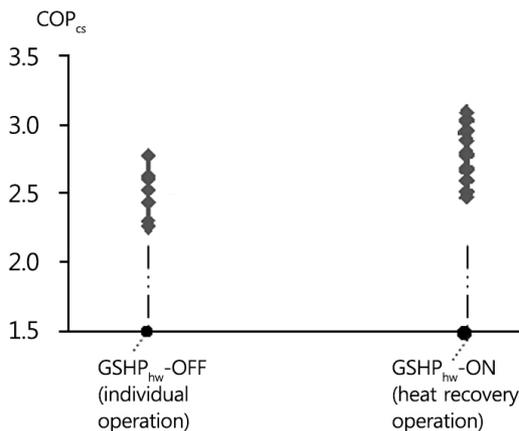


Fig. 8 Increased COP_{cs} of GSHP_{ch} in the heat recovery operation(from avg. 2.5 to avg. 2.67).

Table 10 Improved COP_{hw} during cooling mode of the heat recovery operation in three test situations

	Actual experiment	GLD	TRNSYS
COP _{hw}	2.41 → 3.91 (62%)	3.5 → 5.6 (60%)	3.43 → 5.75 (67.6%)
EWT _{hw}	5 → 30°C	5 → 30°C	Avg. 4 → 31°C

Table 11 Improved COP_{cs} during cooling mode of the heat recovery operation in three test situations

	Actual experiment	GLD	TRNSYS
COP _{cs}	2.5 → 2.67 (7%)	4.0 → 4.2 (5%)	3.94 → 5.54 (40.6%)
EWT _{ch}	16 → 15°C	30 → 28.4°C	Avg. 35 → 27°C

5.3 운전유지비 절감

실증시험의 결과를 기준으로 냉방운전시 연간 운전유지비 절감량을 계산하였다. 단, 난방운전시에는 경제적 효과가 비교적 적다고 분석하였으므로 생략하였다. 또한, 2단 가열식 지열시스템은 기존 시스템 대비 추가적인 투자비가 거의 없다고 분석하였으므로 ROI 분석은 제외하고 계산적 방법을 적용하여 아래와 같이 그 효과를 산출하였다.

- (1) 실증 건물에서 2단 가열방식을 활용 가능한 지열이용검토서 기준 급탕 총부하량 = 57,255 kWh(폐열회수 운전기간 : 5월~10월)
- (2) 기존 방식의 소비전력량 = 연간 급탕 부하/기존 COP_{hw} = 57,255 kWh/2.41 = 23,757 kWh
- (3) 2단 가열방식의 소비전력량 = 연간 급탕 부하/개선된 COP_{hw} = 57,255 kWh/3.91 = 14,643 kWh
- (4) 연간 절감된 급탕 소비전력량 = (23,757 kWh - 14,643 kWh) = 9,114 kWh
- (5) 연간 절감금액(전기로 = 평균 120원/kWh 가정) = 9,114 kWh × 120원/kWh = 약 1,093,680원/년 절감(단, GSHP_{ch}의 성적계수 개선으로 인한 운전유지비 절감은 천공수 축소로 이미 해석하였으므로 중복 평가를 피하기 위하여 생략하였다.)

6. 결 론

냉난방 지열히트펌프(GSHP_{ch})의 응축열을 회수하여 급탕용 부스터 지열히트펌프(GSHP_{hw})의 증발기 가열원으로 사용하여 GSHP_{ch}와 GSHP_{hw}의 성적계수를 동시에 높이는 2단 가열식 지열시스템을 선행연구에서 제안하고, 본 연구에서는 시뮬레이션과 현장 실증시험을 통하여 시스템 성적계수의 향상과 경제성을 평가하였다.

- (1) 일반적 지열히트펌프시스템(냉난방용 지열히트펌프와 급탕용 지열히트펌프를 각각 따로 설치하는 방식) 대비 2단 가열식 지열시스템 적용 시 급탕용 부스터 지열히트펌프의 성적계수(COP_{hw})와 냉난방용 지열히트펌프의 성적계수(COP_{cs})가 모두 개선되어 연간 소비전력량이 약 22% 절감되었다.
- (2) 보통 지열히트펌프 시스템에서 지중 냉방 열원부하가 지중 난방 열원부하보다 약 30% 큰 경우가 많기 때문에 주로 냉방부하 기준으로 천공수가 결정되는데, 2단 가열식 지열시스템에서는 천공수가 약 5% 정도 감소 가능하다. 만약 건물의 냉방부하와 난방부하(급탕부하 포함)의 불균형이 심한 건물일 경우에는 그 효과가 더 커질 수 있음을 예상된다.
- (3) 2단 가열식 지열시스템은 GSHP_{hw}의 증발온도를 상승시키므로 지열히트펌프의 가장 큰 약점 중의 하나이었던 고온수 취득이 비교적 용이하다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Shin, J. S. and Kim, S. H., 2016, Second Stage Heating-type Geothermal Heat System using Geothermal Energy, Proceedings of 2016 Summer Annual Conference of the Korea Society of Geothermal Energy Engineers, pp. 71-74.
2. Song, J., Jung, H., Park, J. W., Kang, H., and Kim, Y., 2013, Numerical Study of the Performance Characteristics of a Cascade Heat Pump Water Heater at Low Ambient Temperatures, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 25, No. 5, pp. 225-232.
3. Son, C., 2009, Performance Characteristics of a Cascade Refrigeration System with Internal Heat Exchanger using Carbon Dioxide (R744) and Propane (R290), Transactions of the Korean hydrogen and new energy society, Vol. 20, No. 6, pp. 526-533.

4. Satyananda, T., Jibanananda, J., Dillip, K. P., and Manmatha, K. R., 2014, Thermodynamic Analysis of a Cascade Refrigeration System Based On Carbon Dioxide and Ammonia, *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 4, No. 7, pp. 24-29.
5. Gajendrasinh, G. P. and Kapadia, Dr. R. G., 2015, Thermodynamic Analysis of Cascade Refrigeration System using a Natural Refrigerants for Supermarket Application, *Int. Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 4, pp. 1839-1846.
6. Park, J. I. and Park, K. S., 2013, Study on Capacity Alteration of Geothermal Heat Exchanger by Changing Design Condition, *Transactions of the Korea Society of Geothermal Energy Engineers*, Vol. 9, No. 4, pp. 9-14.
7. Kang, E. K., 2014, Dynamic Simulation of Heat Pump Gravel Charged SCW, *Seoul National University of Science & Technology*, Korea.