

Balancing Well 교차혼합 지중열교환기의 스마트 냉난방 히트펌프 시스템의 성능평가에 관한 연구

이창희^{1)*} · 김동규¹⁾ · 유병석¹⁾ · 김부일²⁾

Study on the Performance Evaluation of Smart Heating and Cooling Heat Pump System in a Balancing Well Cross-Conditioned Ground Heat Exchanger

Changhee Lee^{1)*} · Donggyu Kim¹⁾ · Byeoungseok Yu¹⁾ · Booil Kim²⁾

Received 22 July 2020 Revised 27 September 2020 Accepted 28 October 2020 Published online 5 November 2020

ABSTRACT This study performed a single hole operation method using a balancing well-cross-mixed underground heat exchanger, and conducted thermal performance studies of an SCW-type underground heat exchanger using a two-well. The study attempted to change the existing operating method of the two adjacent SCW underground heat exchangers with one ball each. The SCW-type geothermal heat exchanger is considered to enable up to 20% of bleed discharge at maximum load, which makes groundwater usage unequal. The efficiency factor of the geothermal system was improved by constructing the discharged water by cross-mixing two balancing wells to prevent the discharge of groundwater sources and keep the temperature of the underground heat exchanger constant. As a result of the cooling and heating operation with the existing SCW heat exchange system and the balancing well-cross-mixed heat exchange system, the measured performance coefficient improved by 23% and 12% in cooling and heating operations, respectively. In addition, when operating with a balanced cross-mixing heat exchange system, it has been confirmed that the initial basement temperature is constant with a standard deviation of 0.08 to 0.12°C.

Key words Balancing well(밸런싱 웰), Standing column well(SCW, 스탠딩 웰 컬럼), Aquifer groundwater flow(대수층 지하수 유동), Geothermal heat exchanger(지중열교환기)

1. 서론

국내에 설치된 지열냉난방시스템은 2000년대 정부의 신 재생에너지 보급정책으로 인하여 꾸준히 설치 및 시공이

확대되고 있다. 이러한 지열냉난방 시스템 증가에 따라 다양한 문제점이 대두되고 있다. 문제점으로는 설계오류, 부실 관리 및 시공 등으로 인한 환경문제가 발생하고 있다. 특히 개방형 설치할 때 수리 지질학적 특성 및 지하수 활용 능력을 고려하지 않아 각 지열 공에 대한 에너지의 불균형 사례가 보여주고 있다^[1~3].

Kim^[4]은 이러한 문제점을 해결하기 위하여 개방형 지열 공의 페어링 기술을 적용함으로써 수리 지질학적인 연구를 수행하였다. 또한 수리지질학 적 특성을 갖는 병렬식 페어

1) Professor, Department of Mechanical and Shipbuilding
Convergence Engineering, Pukyong National University

2) Professor, Department of Electrical, Electronics and Software
Engineering, Pukyong National University

*Corresponding author: leomech@pknu.ac.kr
Tel: +82-51-629-7816

링 관으로 연결하여 지하수의 범람 현상 방지, 주변 기반암과 열교환을 할 수 있는 구간을 증가함으로써 열에너지 회복 능력을 증가시킬 수 있는 방식임을 제안하였다.

개방형 지중 열교환기를 활용하여 도시 지역의 발달이 증가함에 따라, 최근에는 오염 방지 및 대수층 개선에 관한 관심이 높아지고 있다. 이러한 새로운 정책으로 수문 지질 학자들은 영향 반경, 포획 구역, 영향 구역 및 이동 시간과 같은 몇 가지 기본 매개 변수를 더 정확하게 정의하는 데 연구에 집중하였다. 이러한 매개 변수를 알면 펌핑 우물 주변의 보호 영역을 현장에서 묘사할 수 있으며, 실제적인 관점에서 볼 때 펌핑에 의해 영향을 받는 대수층의 크기 또는 물 공급이 잘되지 않는 곳에서 거리를 아는 것이 중요하다. Cooper-Jacob 등식을 적용함으로써 거의 제로-드롭 다운 거리를 영향 반경이라고 한다^[5]. 또 다른 중요한 개념은 포획 구역의 묘사에 기초한 Wellhead Protection의 개념이다^[6]. 일정 시간 동안 지하수가 펌핑 우물로 흐르는 양이다^[7]. 포획 구역 경계의 범위는 수문 지질학 매개 변수와 간단한 실험실에서 복잡한 분석 및 수치 모델에 이르기까지 다양한 절차를 사용하여 결정할 수 있다. 1987년부터 USEPA는 이 포획 구역의 규제 버전인 WHPA(Well Head Protection Area)를 정의했다. WHPA는 “우물 또는 우물 주변의 지표면과 지하 지역, 공공 수질 시스템을 제공하여 오염 물질이 합리적으로 그러한 우물 또는 우물로 이동하여 도달 할 수 있는 공공 수계 제공”이라고 설명할 수 있다^[8].

이론적인 관점에서, 초기 평평한 전위차 표면을 갖는 한정된 균질 대수층에서, 완전히 관통하는 우물은 일정한 부피의 함몰 원뿔을 생성한다. 평면에서 볼 때 원뿔의 바닥인 압전 표면의 원형 영역은 Fig. 1의 영향 반경 (R)이라고 하는 반경으로 정의된 치수를 갖는다. 이 거리에서 드로우 다운은 0과 같다. 비평형 상태에서, R은 재충전과 방전 사이의 불균형으로 인해 연속적으로 변한다. 우물 및 인근 압도계의 수위는 특정 거리 내에서 드로우 다운이 작은 유사 평형에 도달할 때까지 시간에 따라 변동된다.

이처럼 개방형 지중열교환기를 활용 시 지하수의 대수층의 영향을 파악하여 설치 및 시공이 이루어져서 한다고 판단된다. Kim^[9]은 기존 개방형 지열 시스템(SCW)을 활용하여 안정적인 성능 유지 및 수리 지질학적 조건에 미치는 영향을 최소화하기 위해 지하수를 제어할 수 있는 페어링

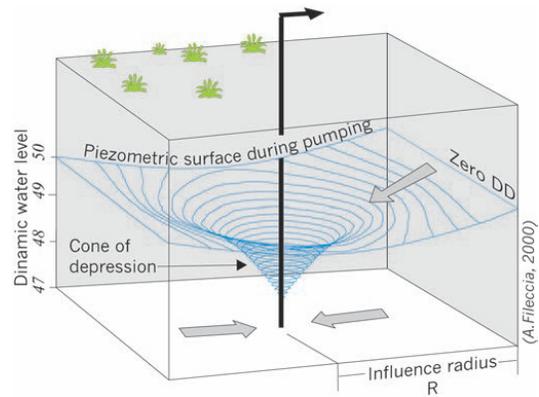


Fig. 1. Depression cone for a confined, homogeneous, isotropic aquifer with flat initial piezometric level and a fully penetrating well, without well bore storage^[6]

시스템을 활용했으며, Park^[10]은 수치해석적 방법을 통해 지중열교환기에 대한 해석을 수행하였다.

Lee^[11]은 개방형 지중열교환기를 이용하여 기존의 SCW 및 복수 공을 활용하여 한 공에서 취수한 물을 다른 공을 환수하는 블리딩을 통하여 유효열전도도가 3배 이상의 성능을 계측하였다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서 활용된 블리딩 효과와 비슷한 특성을 활용할 수 있다고 판단된다.

본 연구에서는 블리딩 배출수를 버리지 않고 이용할 수 있도록 재주입을 통한 수위 차를 형성하였고, 교차 운영을 통해서 지중열교환기의 막힘 현상을 방지하는 밸런싱 웰 (Balancing Well) 방식의 지중열교환기 운영기술을 적용하여 냉방 및 난방 운전 시의 초기 지열 축의 온도 분포 특성 및 성능계수를 분석을 분석하였다. 본 기술에서는 한국 화학융합시험연구원의 시험을 통해서 밸런싱 웰 방식의 교차혼합에 의한 지중열교환기 적용에 따른 시스템 성능계수를 확인해 보고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 대수층 지하수 흐름

시험대상 밸런싱 웰 교차혼합 열교환기시스템은 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 2개의 SCW방식의 지중 열교환기에서 운전 방법을 달리하는 특징이 있는데, 공급량은 각각의 지중열교환기에서 100%를 펌핑하되, 환수량은 서로 다르게 유지하도록 하였다. 즉, 2개의 SCW방식 지중열교환기에

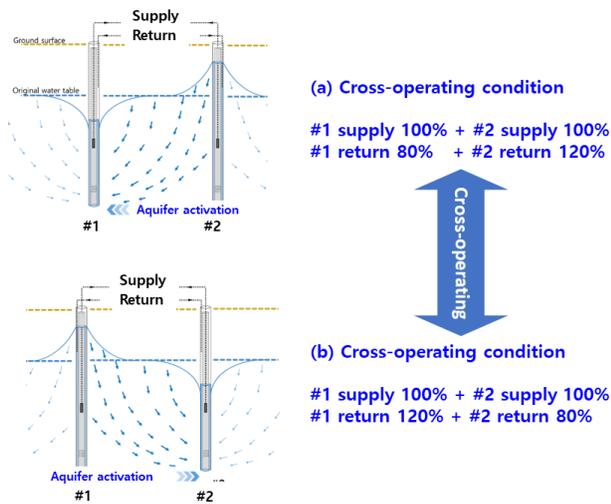


Fig. 2. Groundwater flow in aquifers when crossing a balancing well

서 운전 수위 차가 발생하도록 하여 지하 대수층에서 지하수의 유동을 발생시키는 원리를 적용하였다.

2.2 실험장치

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 물-물 지열원 열펌프 유닛 (KS B 8292 ; 2015) 시험방법을 일부 인용하여 현장 시험에 적합한 지열시스템의 에너지효율(시스템 성능계수)을 평가하기 위하여 기존 개방형 지중열교환기와 냉·난방 운영에 따른 비교시험을 시행하였으며, 밸런싱 웰 방식의 지중열교환기가 최적의 열원공급 상태를 유지하도록 관리하는 교차운전 자동제어 시스템의 작동도 확인하였다.

밸런싱 웰 교차혼합 열교환 지열히트펌프시스템은 지열

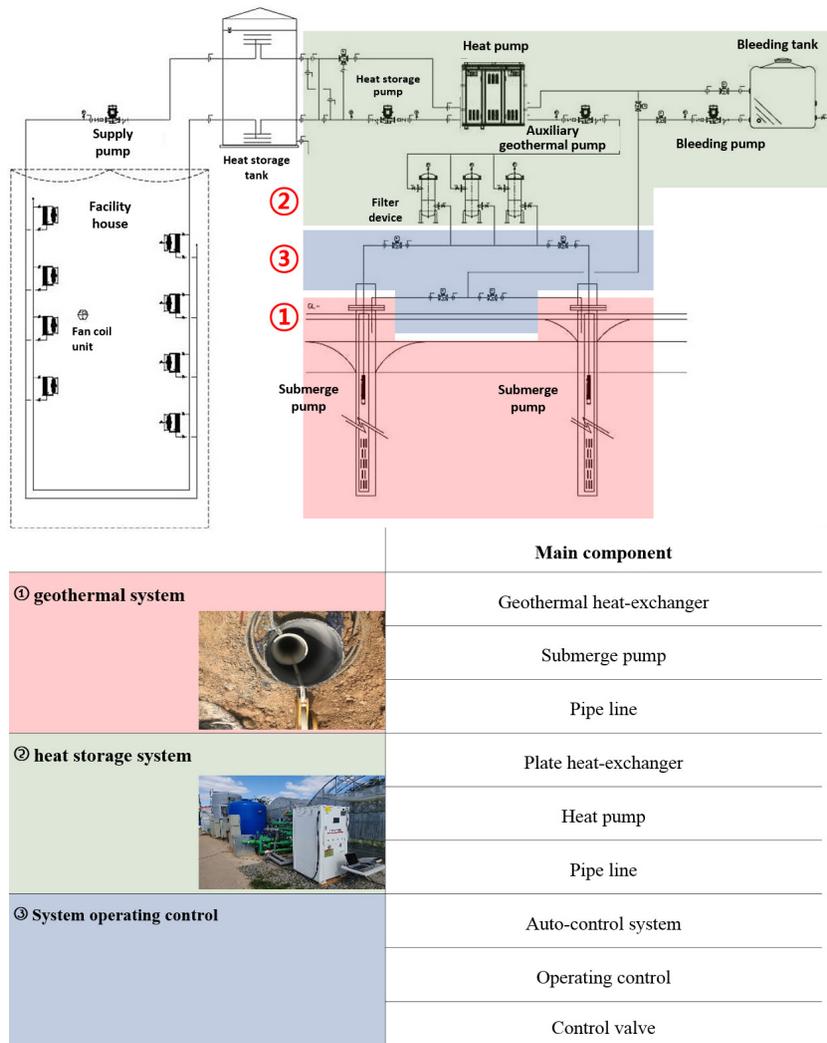


Fig. 3. Experimental apparatus

원 히트펌프와 지중열교환기로 구성되었으며, 이를 연결하는 기계배관 및 순환펌프와 시스템제어장치 중 교차운전제 어기를 포함한다.

시험대상 현장은 전남 강진군 병영면 소재의 시설재배 하우스가 설치된 장소로, 30RT급 냉·난방용 물-물 지열원 히트펌프 1대와 직경 10인치, 깊이 300 m로 설치된 통상의 SCW방식의 지중열교환기 2공이 기본적으로 설치되어 있는 현장을 대상으로 하였다. SCW방식 지중열교환기는 자연수 위 -4.7 m 수준, 최대 양수량 350톤/일의 사양을 갖는다.

2.3 밸런싱 웰 교차제어 방법

Fig. 4는 밸런싱 웰 교차제어 방법을 나타낸 프로우 차트이다. 지중열교환기(A)와 중열교환기(B)에서 동시에 공급된 순환수가 열교환을 하고 환수될 경우 지중열교환기(A-Zone)에 120%를 환수하고, 나머지 순환수는 다른 지중열교환기(B-Zone)로 80%를 환수시켜 자연 블리딩과

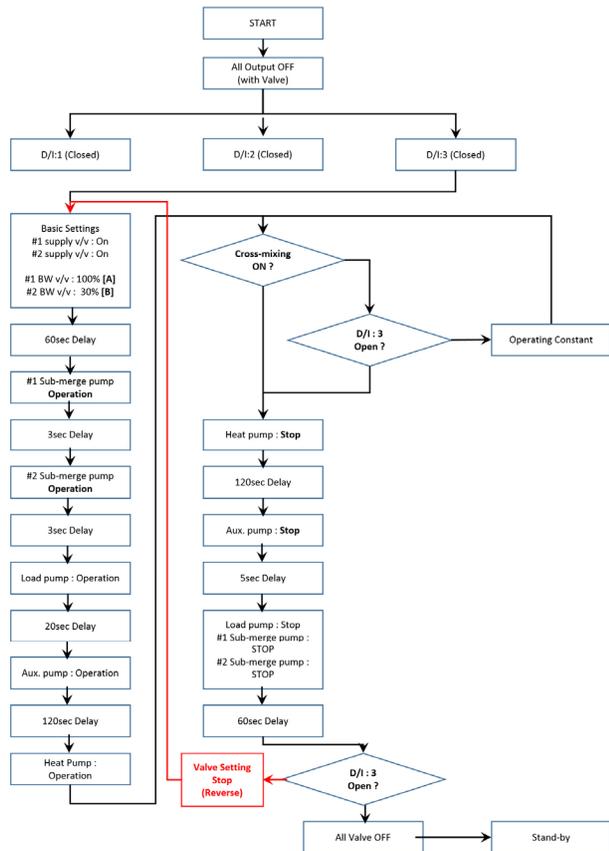


Fig. 4. Balancing well cross-mixing system controller setting and control sequence

함양이 이루어지고, 지하수 수위치를 형성하여 대수층을 활성화시키는 시스템으로 설정된 교차운전 주기에 따라 블리딩과 함양이 교번으로 운전하도록 제어된다.

2.4 시스템의 불확실도

실험 장치 Fig. 3에 대한 실험값의 불확실도를 합리적으로 검정이 필요하다. 본 연구에서는 열 정산 방정식의 가장 간단한 표현은 다음과 같다.

$$q_i = V \cdot C_p \cdot (T_o - T_i) \tag{1}$$

여기서 q_i [W]는 온수기 요소 및 펌프에 대한 측정된 열 입력입니다. V [분당 리터, LPM]은 유속입니다. C_p 는 물의 비열이다. 주석과 T_o 은 온도 조절기로 측정된 온도이다.

모든 교정 방정식을 측정장치에 적용한 후 Eq. (1)은 측정된 전원 입력과 비교할 수 있다.

온도 측정의 불확실성은 프로브의 경우 $\pm 0.01^\circ\text{C}$, 아날로그 신호를 사용하는 디지털 디스플레이의 신호 컨디셔너의 경우 $\pm 0.04^\circ\text{C}$ 이다. 방정식 (2) 나타낸 바와 같이 온도에 대한 전체 불확도를 계산할 수 있다.

$$\Delta T = \sqrt{(\pm 0.01)_i^2 + (\pm 0.04)_i^2} + \sqrt{(\pm 0.01)_o^2 + (\pm 0.04)_o^2} \approx \pm 0.0825^\circ\text{C} \tag{2}$$

각 테스트의 ΔT 가 약 5°C 임을 고려하면 온도 측정으로 인한 불확실성은 약 $\pm 1.65\%$ 를 얻었다.

$$\text{Error} = \frac{\pm 0.0825^\circ\text{C}}{5^\circ\text{C}} \times 100\% = \approx \pm 1.65\% \tag{3}$$

Table 1의 유량계에 데이터는 $\pm 2.03\%$ 의 가장 높은 오

Table 1. Results from the flowmeter calibration

Actual flow [LPM]	Calibration flow [LPM]	Error [%]
3,316	3,292	0.73
15.87	16,032	1.01
100.90	102.99	2.03
350.62	355.41	1.35

차와 온도센서의 불확실도 $\pm 1.65\%$ 를 사용하여 열 균형 방정식의 총 불확도는 약 2.62%의 값을 얻었다.

$$Total\ Error = \sqrt{(\pm 0.0165)^2 + (\pm 0.0203)^2} \approx 2.62\% \quad (4)$$

2.5 시스템 성능계수(COP)

Fig. 5는 성능계수 산출을 위한 시스템 개략도를 나타내 있었다. 시스템 에너지효율은 통상적인 물-물 열펌프의 냉방 운전을 수행하여 열원 측과 부하 측의 액체 엔탈피 시험 방법을 적용해서 얻은 생산 열량 결과값과 열펌프 및 순환 펌프류에서 소비한 전력 값의 비율을 시스템 성능계수로 산출하며, 기존 SCW 지열시스템과 비교하였다. 액체 엔탈피법은 열펌프의 열원 측과 부하 측의 열교환기 입구와 출구에서 순환수의 온도 및 유량, 소비전력량 등을 Data Logger를 통하여 수집하고, 다음 식을 적용하여 지열 시스템의 생산열량을 산정하였다.

3. 결과 및 토의

본 연구는 기존의 SCW 지중열교환기와 Balancing well

교차혼합 열교환기를 활용하여 지중의 초기온도에 대한 특성과 냉방 및 난방운전시의 성능계수 특성을 분석하였다.

3.1 냉방운전

본 연구에 적용된 지중열교환기를 수행하기 위해 30분 동안 시험가동 안정화 후, 6시간 동안 가동하여 Data logger를 통해 얻은 결과를 도출하였다.

Fig. 6은 기존의 SCW 운전과 밸런싱 웰 방식 운전을 통해 지열 측과 부하 측의 온도특성을 분석하였다. Fig. 6(a)의 결과는 기존의 SCW 방식 운전을 수행한 결과이다. 6시간 동안 SCW 운전 수행시 지열 측의 출구 온도가 25°C에서 40°C까지 증가하는 특성을 보여주고 있다. 이는 지중에 열원이 쌓여 열교환이 늦어지는 결과를 얻을 것으로 예상된다.

반면 Fig. 6(b)는 냉방운전시의 밸런싱 웰 방식 운전을 통해 얻은 지중과 부하측의 온도 분포 특성을 보여주고 있다. 이 결과를 통하여 Fig. 6(a) 보다 지열측 출구에 열부하가 적체되지 않고 온도가 일정하게 유지되는 특성을 보여주고 있다. 이는 밸런싱 웰의 혼합교차 운전을 통해 지중의 지하수의 흐름으로 인하여 열전달 특성이 향상되는 특성을 보여주고 있다.

Fig. 7은 냉방운전시의 COP(성능계수) 특성을 사용전

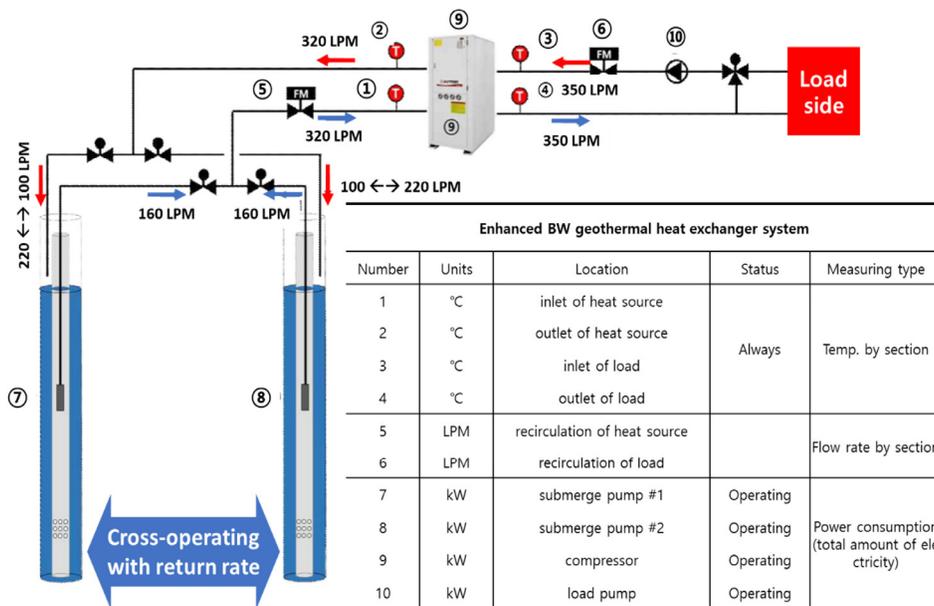
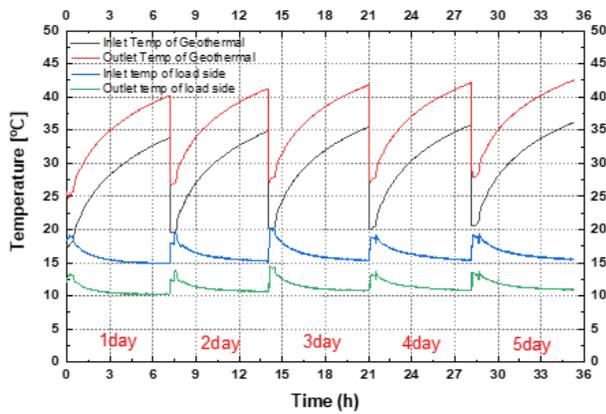
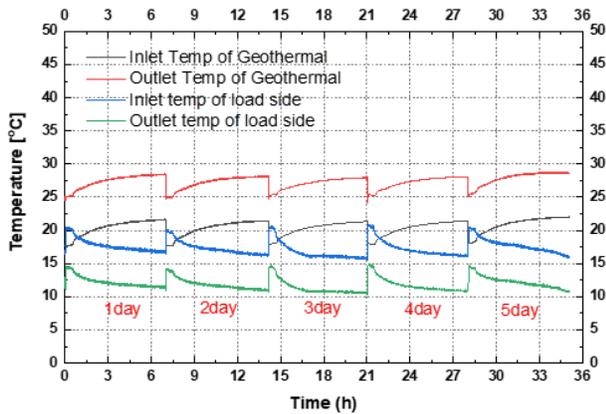


Fig. 5. System overview for calculating performance coefficients



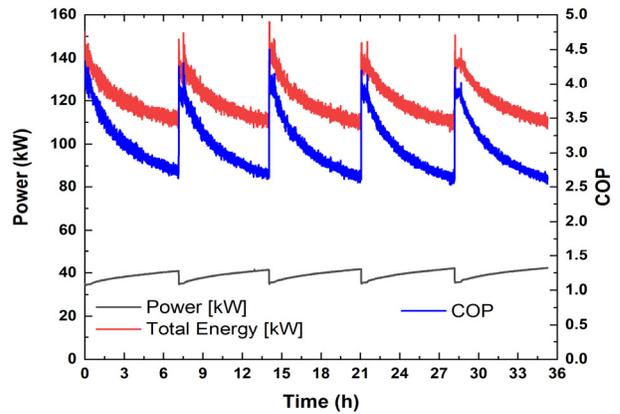
(a) SCW operating



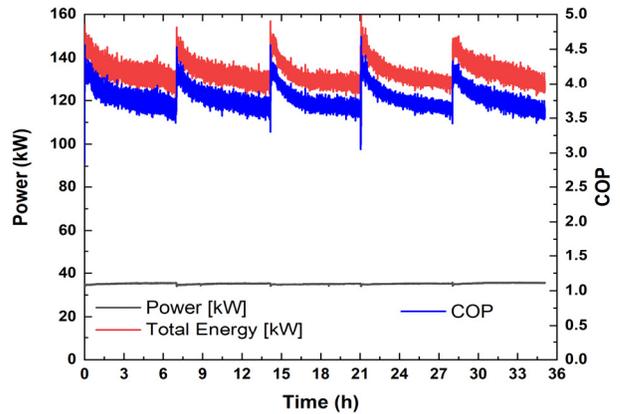
(b) Balancing well SCW operating

Fig. 6. Temperature change during cooling operation

력과 비교하여 나타낸 결과이다. 앞서 Fig. 6에서 언급하였듯이 COP의 변화특성이 밸런싱 웰 혼합교차 운전시가 안정화된 특성을 보여주고 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 7(a)는 SCW 운전할 경우에 대한 사용전력과 COP특성을 보여주고 있다. 반면 Fig. 7(b)는 혼합 교차 운전을 수행하는 SCW 운전시의 특성을 보여주고 있다. 두 운전조건을 통하여 보면 혼합교차 운전할 때의 경우가 COP가 안정적이며, COP특성이 향상되는 결과를 보여주고 있다. 이러한 결과는 혼합교차 방식의 열교환 시스템이 초기 지중온도가 일정하게 유지되는 특성과 추후 장기적인 시스템 가동에 따른 건물측 부하 증가와 편중된 부하 사용으로 인한 SCW 방식의 지속적인 온도상승 또는 하강 문제로 인한 것으로 판단된다.



(a) SCW operating



(b) Balancing well SCW operating

Fig. 7. COP characteristics during cooling operation

3.2 난방운전

Fig. 8은 기존의 SCW 운전과 밸런싱 웰 방식 운전을 통해 지열측과 부하측의 온도 특성을 분석하였다. Fig. 8(a)의 결과는 기존의 SCW 방식 운전을 수행한 결과이다. 지열순환수의 온도가 Fig. 8(b) 보다 온도 상승이 증가하는 결과를 보여주고 있다. 이러한 원인은 지하수의 열누적 현상으로 지열 순환수의 온도차가 낮아짐에 따라 성능이 저하되는 특성을 보일 것으로 예상된다.

3.3 초기 지중온도 특성

Table 2는 기존 SCW 및 밸런싱 웰 지중열교환기의 냉방 및 난방운전시의 지중의 온도특성을 분석한 결과이다. 최적의 열원공급 상태를 유지할 수 있도록 설정된 교차운전 주기에 따라 블리딩 배출수의 인공함양이 교번으로 운전되는 것을 순환펌프 유량을 통하여 확인하였는데, 연속 5일

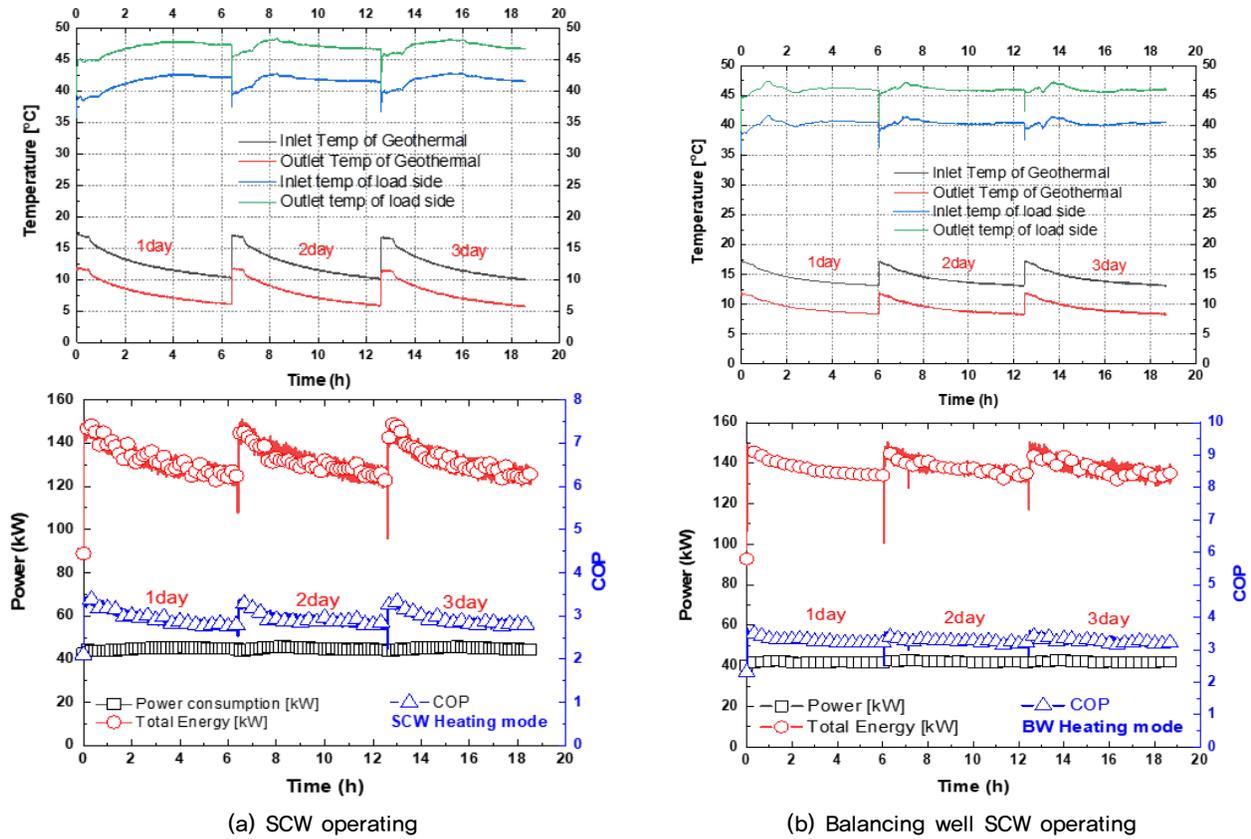


Fig. 8. Temperature, Power and COP during cooling operation

Table 2. Initial ground water temperature

Initial Temp.	Cooling mode (°C)		Heating mode (°C)	
	SCW	BW	SCW	BW
1	17,72	17,75	16,99	16,98
2	19,94	17,63	16,15	16,85
3	19,98	17,91	15,84	16,85
4	20,09	17,64	-	-
5	20,54	17,84	-	-
Standard Deviation	1,11	0,12	0,60	0,08

및 연속 3일의 냉·난방운전 과정동안에 밸런싱 웰 방식의 열교환시스템이 초기 지중온도가 일정하게 유지하는 것을 확인하였다.

3.4 성능계수

시스템 에너지효율은 통상적인 물-물 열펌프 시스템의 냉방운전을 수행하여 열원측과 부하측의 액체 엔탈피 시험 방법을 적용해서 얻은 생산열량 결과값과 열펌프 및 순환펌

프루에서 소비한 전력값의 비율로 시스템 성능계수로 산출 하였으며, 본 기술에서는 개선 전인 기존 SCW방식의 지열 시스템과 비교하였다.

Table 3은 밸런싱 웰 교차혼합열교환에 의한 냉·난방히트펌프시스템의 성능평가를 위해 Fig. 1과 같은 개념으로 가동을 시켜 얻은 시험결과이다. 밸런싱 웰 방식의 열교환 시스템이 기존 SCW방식의 열교환시스템을 이용한 히트펌프시스템의 성능계수가 전반적으로 높게 측정되었으며, 특히 냉방운전의 효율이 약 23% 향상된 것으로 나타났다.

Table 3. Comparison on coefficient of performance (COP)

COP	Cooling mode		Heating mode		Remarks	
	SCW	BW	SCW	BW	Cooling	Heating
Min	2,58	3,45	2,08	2,21	+23%	+12%
Max	3,96	4,29	3,44	3,66		
Average	3,05	3,76	2,92	3,27		

4. 결론

본 연구는 현장에 설치된 30RT급 물-물 지열원 히트펌프와 2개의 SCW방식 지중열교환기 및 기계배관, 순환펌프류, 교차운전제어기 등에 대해 검·교정된 온도계, 유량계와 전력분석계 등의 측정장치를 설치하여 시험 및 분석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 통상의 SCW방식 열교환시스템 방식에 비해 개선된 밸런싱 웰 교차혼합 열교환시스템으로 운전한 결과, 평균 성능계수는 냉방운전에서 3.76, 난방운전에서 3.27로 나타나, 기존 SCW방식 열교환시스템 보다 23% 및 12%의 성능향상이 있었다.
- 2) 또한, 초기 지중온도는 밸런싱 웰 교차혼합 열교환시스템을 사용할 경우, 연속운전 3~5일 동안, 표준편차 0.08~0.12℃로 일정한 지중초기온도를 확보할 수 있어, 상대적으로 안정적인 열원공급이 가능한 것으로 나타났다.
- 3) 측정결과에서 알 수 있듯이 통상의 SCW방식의 열교환시스템에서 운전방법을 밸런싱 웰 교차혼합 열교환시스템 방식으로 달리 할 경우, 지열 냉·난방시스템의 성능계수를 향상시킬 뿐만아니라, 초기온도를 일정하게 유지하여 안정적인 지열원 공급이 가능하며, 버려지는 블리딩 배출수를 원천적으로 없앨 수 있는 방법으로 유용할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2020학년도 부경대학교 국립대학육성사업 지원비에 의하여 연구되었습니다.

References

- [1] Jo, Y.J., Lee, J.Y., Lim, S.Y. and Hong, G.P., 2009, "A review on potential effects of installation and operation of ground source heat pumps on soil and groundwater environment", *J. Soil Groundw. Environ.*, **14**(3), 22-31.
- [2] Park, Y., Yu, J.Y., Kim, N. and Lee, J.Y., 2015b, "Evaluation of possibility for precipitation of carbonate minerals by change of groundwater temperature and pressure in open loop geothermal cooling and heating systems", *J. Geological Soc. Korea*, **51**(6), 623-628.
- [3] Bak, H.M., 2016, "Estimation of yield capacity of fractured rock aquifer for multi-well groundwater heat pump system", M.S. thesis, Chonnam National University, Gwangju.
- [4] Kim, N.J., Park, J., Kim, C.H., and Park, Y., 2018, "Hydrological study for groundwater source heat pump using a pairing of two wells", *J. Geological Soc. Korea*, **54**(2), 205-213.
- [5] Cooper, H.H., and Jacob, C.E. 1946, "A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history", *Am. Geophys. Union Trans.*, **27**(4), 526-534.
- [6] Fileccia, A., 2015, "Some simple procedures for the calculation of the influence radius and well head protection areas (theoretical approach and a field case for a water table aquifer in an alluvial plain)", *Acque Sotteranee-Italian Journal of Groundwater*, **4**(3), 7-23, <https://doi.org/10.7343/AS-117-15-0144>.
- [7] Hansen, C.V., 1991, "Description and evaluation of selected methods used to delineate Wellhead protection areas around public supply wells near Mt. Hope, Kansas", USGS Water-Resources Investigation Report 90-4102, <https://doi.org/10.3133/wri904102>.
- [8] US EPA Office of Ground Water Protection, 1987, "Guidelines for delineation of wellhead protection areas", Washington, DC.
- [9] Kim, H., Bae, S., Lee, B., Nam, Y., 2018, "Heating performance analysis of open-loop geothermal system applying pairing technology based on verification experiment", *J. Korea Inst. Ecol. Archit. And Environ.*, **18**(2), 25-31.
- [10] Park, J.H. and Choi, H.K., 2017, "Numerical study on flow and heat transfer characteristics for vertical ground heat exchangers of various shapes", *New. Renew. Energy*, **13**(4), 39-48.
- [11] Lee, C.H., 2019, "Thermal performance of a standing column well geothermal heat exchanger system using re-injection of bleeding water", *Geothermics*, **82**, 73-80.