

복수정을 이용한 지열 히트펌프 시스템의 난방 성능

임 효 제[†], 공 형 진^{*}, 송 윤 석^{**}, 박 성 구^{**}

호서대학교 기계공학과, *호서대학교 대학원 기계공학과, ** (주)지오테크

Heating Performance of Two Well Type Geothermal Heat Pump System

Hyo Jae Lim[†], Hyoung Jin Kong^{*}, Yoon Seok Song^{**} and Seong Koo Park^{**}

[†] Department of Mechanical Engineering, Hoseo University, Asan 336-795, Korea

^{*} Department of Mechanical Engineering Graduate School, Hoseo University, Asan 336-795, Korea

^{**} Geotech Inc, Seongnam 463-420, Korea

1. 서론

지표수 및 지하수 이용 열펌프 시스템(Ground Water Heat Pump System, GWHP)이란 지표수나 지하수를 건축물의 냉/난방에 열원으로 이용하는 방식이다. 이는 지열원 열펌프 시스템 중에서 가장 오래된 방법⁽¹⁾이지만 최근까지 객관적인 설계기준 없이 이용되어져 왔다. Lienau et al.⁽²⁾은 지하수 온도가 150℃ 이상이 되는 심부지열의 지하수는 전기 발전에 이용되며, 150℃ 이하의 지하수는 별도의 기기 없이 난방에만 직접적으로 이용이 가능하지만, 32℃이하의 지하수를 이용하기 위해서는 히트펌프를 이용하여 건축물의 냉/난방이나 온수로 이용이 가능하다고 하였다.

지열의 다양한 열원중 지하수는 열용량이 가장 크며 지하수 온도가 15℃ 내외로 거의 일정하여 열펌프 시스템의 열원으로 이용하여 난방 및 온수를 생산할 때의 열원으로 활용될 뿐만 아니라 냉방 및 냉수를 생산할 때의 히트싱크로도 활용할 수 있는 특징을 지니고 있어 연중 높은 효율로써 운전이 가능하고 에너지의 소비량을 절감할 수 있는 특징을 지니고 있다.

지하수 이용 시스템은 크게 직립정(Standing Column Well, SCW)방식과 복수정(two well)방식으로 나눌 수 있다. 직립정 방식은 하나의 우물에서 지하수의 공급과 배수를 동시에 이루어지게 하는 방식이고 복수정 방식은 취수정 배수정을 각각 개별적으로 시추하여 냉난방에 이용하는 방식이다.

지하수 이용 열펌프 시스템은 타 지열원 시스템에 비하여 초기 투자비 회수 기간이 가장 짧으며 또한 저렴하게 시스템 설치가 가능하다고 알려져 있다. 본 방식은 지하수원의 수질이 양호하며, 그 양이 풍부하여야 한다. 그리고 지하수위가 높아 지하수의 양정에 적은 동력이 가해져야 한다.

결보기에는 비교적 자연적이고, 간단한 시스템처럼 보일지라도 관정(well)의 설계, 지하수 유량, 열교환기의 선택을 능률적이며 신뢰할 수 있는 시스템을 구성할 목적으로 적절히 배치하여야 한다.

본 논문에서는 충북 진천에 복수정 시스템을 직접 설치하여 이용 중인 지하수 이용 히트펌프 시스템의 냉난방 시스템 성능을 평가하였다.

2. 개방형 시스템 설계 이론

개방형 시스템을 설계할 때 수증펌프, 순환펌프 그리고 열펌프에 대한 정보를 수집하고 분석하여야 설계목표에 근접시키며 시스템 최적 성능치에 적절히 도달할 수 있다. 즉 설계 초점을 히트펌프 효율에 맞추지 말고 전 시스템의 에너지 효율비 (Energy Efficiency Ratio, EER), 성능계수 (Coefficient of Performance, COP)에 설계 목표⁽¹⁾를 두어야 한다.

시스템의 구성은 열펌프 운전과 지하수 유량을 포함하여 구성하는 것이 유리하다.

지하수 이용 열펌프 시스템에서 수증 펌프의 전력량이 상승시켜 지하수 유량을 증가시키면, 시스템 에너지 효율비와 성능계수가 어느 지점까지 증가하는 반면 점차적으로 시스템 전체 전력량

도 동시 상승하여 수중펌프의 높은 전력량으로 인하여 전체 시스템 효율이 감소된다.

이에 따라 전체 시스템의 최대 성능을 유지하기 위하여 필요한 최적 지하수유량을 평가하여야 한다. 이에 고려해야 할 사항으로는 수중펌프의 동력, 순환펌프의 동력 및 히트펌프의 동력을 이용⁽³⁾하여 아래의 식 (1)을 이용하여 평가한다.

$$system\ EER = \frac{load\ (Kcal/h)}{well\ pump + loop\ pump + heat\ pump} \quad (1)$$

지하수 이용 열펌프 시스템의 설계순서는 다음과 같다. 먼저 적용 건축물의 부하를 계산하여 필요 지하수 양수량을 산정하고 안정적으로 이용 가능한 양수량을 결정한다. 그리고 시험용 우물을 설치하여 지하수위 실험을 실시한 후 적절한 펌프 규격을 선정한다.

일반적인 설계방법은 지하수 유량의 범위를 산정하여 수중펌프에 필요한 전력량에 따라 각 지하수 범위에서의 열펌프 성능을 감안한 설계 방법이다.

펌프의 전력량과 열펌프의 성능치 그리고 일반 조건에서 정밀하게 수중펌프가 제어될 때 시스템 효율 등을 고려하여 최적의 조건을 제시하여야 한다. 그리고 시스템 내에서 압력강하, 온도, 히트펌프와 열교환기의 재질 등을 감안하여 설계한다. 또한 1차 열교환기 입·출구 최저온도를 설계기준⁽³⁾으로 삼아야 한다.

많은 시스템 운전시간을 고려한다면 펌프의 낮은 운전비용을 고려하여 열교환기의 크기를 늘린다. 그리고 높은 압력강하를 선택하여 판형 열교환기의 높은 열전달을 유도한다.

2.1 우물설치

Fig. 1은 일반적인 개방형 시스템에서의 우물의 형태이다.

지하수위는 일반적인 대수층이나 수압에 의해 분출한 우물의 대수층 그리고 일반적인 정적수위를 보여준다.

펌프가 작동하게 되면 일반적으로 수위가 내려간다. 이는 저수위층이나 펌프수위(Pumping water level)라 할 수 있다. 그리고 지중에 형성된 대수층에 의하여 우물의 상태를 알 수 있다. 지하수 손실수두가 $2.1\ l/s \cdot m$ 일 때는 우물의 상태가 “양호”이고, 지하수 손실수두가 $0.1\ l/s \cdot m$ 일 때 “불량”⁽¹⁾이라고 할 수 있다.

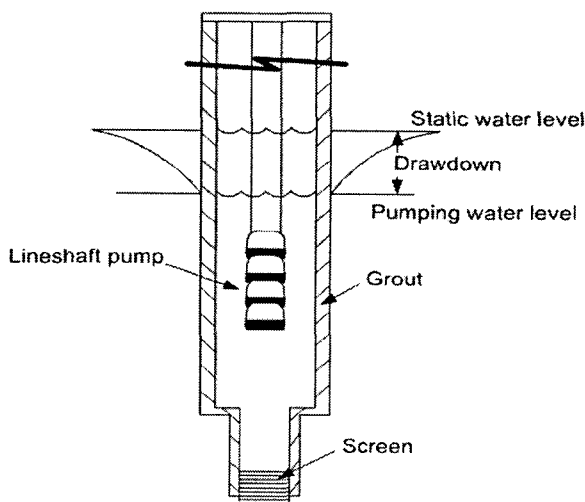


Fig. 1 Water well terminology.

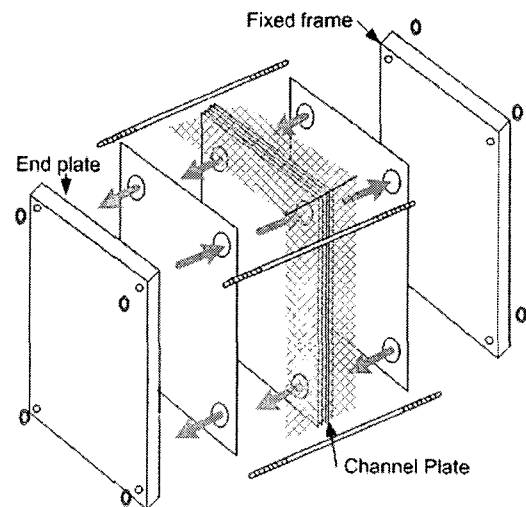


Fig. 2 Plate heat-exchanger.

우물을 설치 후에는 지표와 우물의 상부를 분리 시켜야 한다. 우물의 상부와 대기중 공기와 만나게 되면 우선 지하수원의 오염을 일으킬 수 있으며, 산소가 지하수에 녹아들어 물속에서 이산화탄소가 생성이 되어 철분과 산화하여 열교환기에 퇴적되는 결과를 낳는다.

개방형 시스템에 적용되어지는 우물의 경우 암반층이 충분히 분포되어 있어야 한다. 천공 후 암반 도달 심도까지 케이싱 처리를 하고 그 주위로 그라우팅을 한다.

그리고 우물 하부의 경우 지하수 유동을 가로 막지 않을 정도의 침투성이 좋은 자갈층 혹은 가운 입자의 모래나 얇은 퇴적암층으로 구성된 차단막이 조성되어야 한다. 그래서 일차적으로 지하수를 한번 걸러주게 되어 시스템의 성능을 한층 높여주게 된다.

2.2 판형 열교환기

개방형 시스템은 히트펌프와 지하수를 직접적으로 연결하여 지하수를 직접 열원이나, 히트싱크로 이용하는 직접식과 히트펌프와 지하수 사이에 판형 열교환기를 사용하는 간접식으로 나뉜다.

판형 열교환기의 주요능력은 히트펌프와 지하수간의 직접적인 접촉을 막아 지하수를 사용함에 있어 수질오염 등으로 인한 문제를 미연에 방지하는 것을 목적으로 한다.

이에 따라 판형 열교환기는 부식에 강한 재료로 구성되어 있으며, 분해 조립이 간단하여 누구나 유지보수를 할 수 있도록 하였다.

판형 열교환기는 Fig. 2와 같이 열교환용 판과 프레임으로 이루어져 양쪽에서 반대 방향으로 2가지 순환수가 지나가며 열 교환을 하도록 설계되어있다.

현재 설치되고 있는 대부분의 판형 열교환기는 스테인레스 재질의 304, 316 그리고 티타늄재질이 가장 많이 사용된다.

지하수 열원 히트펌프 시스템에 사용할 판형 열교환기 규격을 결정하기 위해 사용되는 열교환기 면적을 구하는 식은 다음과 같다.^(3,4)

$$A = \frac{Q}{U \times C_f \times LMTD} \quad (2)$$

A는 판형 열교환기의 면적이고, U는 종합적인 열전달계수, C_f 는 LMTD의 보정계수 값(지하수 이용 히트펌프 시스템은 0.95~1.0 값을 사용)이다. 그리고 LMTD는 아래와 같이 산정할 수 있다.

$$LMTD = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} \quad (3)$$

LMTD는 열교환기 양쪽에서 2가지 유체의 온도 입구온도(EWT), 출구온도(LWT)차를 이용하여 계산한다. 여기서 $\Delta t_1 = t_{out1} - t_{in2}$, $\Delta t_2 = t_{in1} - t_{out2}$ 이다.

2.3 현장 투수시험

지중의 투수성은 지하수위 하부 지반에 미치는 양압력을 알고, 우물 등을 설계, 시공하기 위하여 필요하다. 투수성은 투수계수의 대소로 나타내며, 투수계수를 구하는 방법에는 실험실에서 행하는 투수시험과 현장투수시험법이 있다. 여기에서는 현장에 설치될 우물의 지중 지반의 투수성을 확인하기 위하여 현장투수시험법을 이용하였다.

투수시험에는 정수위 투수시험과 변수위 투수시험이 있다. 일반적으로 우물의 투수계수를 측정하기 위해서 변수위 투수시험을 시행한다. 변수위법은 시추공을 이용하여 시험구간의 상단까지 케이싱을 삽입하고 케이싱이 상부에서 물을 주입하여 경과한 시간에 대한 공내의 수위변화를 측정

하여 투수계수를 산출하는 방법이다. 따라서 수위하강법(falling head method)을 적용하여 현장투수시험을 수행한다.

$$K = \frac{R^2}{2L(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{L}{R}\right) \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right) \quad (4)$$

K 는 투수계수이고 L 은 투수시험구간의 길이 즉 수위하락구간을 말하며, R 은 시추공의 반경, H_1, H_2 는 t_1, t_2 때의 초기상태의 수위와 최종 우물수위를 말한다.

3. 실험순서

본 연구의 대상 건물을 충북 진천군에 위치한 세화 P&C로서 화장품 공장이다. 본 건물의 냉난방을 위하여 총 120RT 용량의 지열원 열펌프 시스템이 가동되고 있으며, 지하수 이용 열펌프 시스템은 전체 50RT로 구성되어 있다. 아래의 Table 1은 대상건물의 개요와 부하조건 등을 정리하였다.

취수정은 300m 깊이로 2개가 설치되어 있으며 배수정 역시 300m 깊이로 3개가 설치되어 있다. 또한 150m 깊이의 관측정이 시추되어 있다.

세화 P&C 진천공장은 화장품 제조공장으로서 지하 1층 지상 2층으로 제조동과 분류동으로 나뉘어져 있다.

성능연구를 위하여, 설치 완료된 지하수 냉난방 시스템의 소비전력을 디지털 파워미터로 측정하였으며, 지하수 및 부하측 입·출구 온도와 유량은 k-type 열전대와 터빈유량계를 이용하였다. 데이터 획득 시스템은 NI SCXI-1000을 사용하였다.

취수정 공내에 지하수위 측정 센서를 설치하여 지속적인 수위 변화량을 측정하였고, 지하수 및 1차측 판형 열교환기 그리고 부하측 입·출구 온도를 DAQ로 저장하였다.

Table 1 Summary of the building

Categories	Contents
Total floor area	4,677 m ²
Stories	B1 ~ 2F
Production well	300m × 2
Injection well	300m × 3
Heat pump	50RT
Heat exchanger	9.3 m ²
Well pump	5.5 kw × 2

4. 실험결과 및 분석

시스템 성능평가를 위하여 실내 F.C.U와 모든 배관, 그리고 히트펌프를 작동시켜 자동 운전 모드로 실험을 수행 하였다. 1차 운전은 수직형 지열원 열펌프 시스템이 작동하고, 그 용량을 벗어나는 부하에 대해서는 지하수 이용 열펌프 시스템이 운전을 시작한다.

본 실험에서는 기계실에 설치된 판형 열교환기 입·출구 온도, 응축기 입·출구 온도와 증발기 입·출구 온도를 각각 측정하였다. 그리고 유량계를 우물에서 올라오는 배관에 설치하여 지하수

유량을 측정하였으며, 전체 시스템에 대해 8곳에서 각각의 온도를 측정하였다.

전력량 측정은 수중펌프와 순환펌프를 포함한 전체 시스템 전력량을 측정하였다.

식 (4)를 이용하여 우물에서의 투수시험결과 평균 투수계수는 2.6×10^{-4} cm/sec로 계산되었다.

Fig. 4는 우물의 수중펌프를 작동시켜 측정한 수위테스트 그림을 나타낸 것이다. 펌프 작동전 정적수위(Static water level)는 7m로 알 수 있으며, 펌프 작동시 수위강하(Draw down)가 급격히 일어나, 일정 시간 경과 후에는 지상으로부터 40m 정도로 펌프 수위를 항상 유지하고 있으며, 펌프 정지시 1시간 30분 이내에 초기 정적수위의 75%까지 도달함을 알 수 있다. 지하수의 수위 회복률은 초기 지하수의 수위강하와는 반대로 정적수위에 도달할수록 회복속도가 늦어짐을 알 수 있다.

Fig. 4는 전체 시스템 COP(Coefficient of Performance)를 나타낸 것이다. 본 연구에서의 COP는 열펌프에 공급되는 유량과 온도를 가지고 산출한 열량을 시스템의 전체소비전력량(순환펌프, 수중 펌프 포함)으로 나눈 값으로 정의하였다.

아래의 Table. 2는 각 부분에서 측정된 온도의 변화량을 나타낸 것이다.

지하수에서 1차측 열교환기로 투입되는 온도는 평균 15.2°C로 열교환후에는 14°C의 온도로 배수 정으로 버려진다. 또한 판형 열교환기를 거친 순환수는 열펌프로 16.5°C로 투입되고 15.9°C로 배출 된다. 일반적으로 정상적인 열펌프는 냉난방 공급온도가 50°C에 근접되어야 하나 본 site에서 측정 된 열펌프는 부하측으로 취출되는 순환 출구온도가 41.5°C임을 알 수 있다. 이는 상대적으로 간헐 운전에서의 손실이 있을 수 있으며, 열교환 능력의 저하로 그 능력이 초기 설계치에 미치지 못함을 알 수 있다.

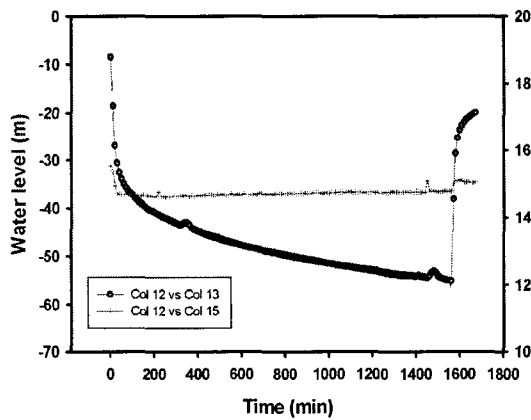


Fig. 4 Ground water level and temperature.

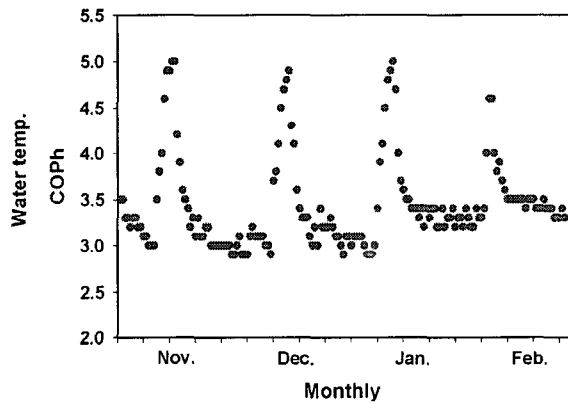


Fig. 4 Heating operation.

Table 2 Temperature variation of each part.

Categories	Temp. measurement (°C)		
	In	Out	Variation
Ground water	14.0	15.2	1.2
Plate heat exchanger	15.9	16.5	0.6
Heat pump	39.5	41.5	2.0

5. 결론

GWHP 시스템은 지중 조건에 많은 구애를 받지만 뛰어난 성능으로 인하여 점차적으로 설치지역이 늘어나는 추세이다. 또한 타 지열원 시스템에 비하여 초기 투자비의 절감으로, 더욱 힘을 받고 있다. 이에 본 연구는 최근 들어 관심이 증가하는 지열원 열펌프 시스템 중 지하수 이용 열펌프 시스템의 복수정 방식의 성능 분석을 하였다. 이상의 과정을 통하여 다음과 같은 연구결과를 얻을 수 있었다.

지하수의 온도변화를 측정한 결과 외기에 비하여 온도가 일정하여 열원으로서 좋은 특성을 가지고 있다.

간헐적 운전에서의 손실과 열교환 성능의 저하로 열펌프 성능이 적게 형성되어 있다.

50RT급 시스템 운전결과 난방 성능계수는 약 2.9~5.0의 분포를 보이며 일반적으로 COP 3.4를 보이고 있다.

초기 정적수위는 7m에서 측정되며, 펌프 작동 후 급격한 수위강하를 보이나 펌프수위는 40m를 유지하고 있으며, 시스템이 작동을 멈추면 1시간 30분 이내로 초기 수위의 75%를 회복한다.

지하수 이용 열펌프 시스템의 내구성 및 신뢰성 검증을 위하여 좀더 장기간의 운전 데이터가 필요하며, 향후 냉방 운전에 추가적인 연구가 이루어져야 한다.

후 기

본 연구는 산업자원부 산하 에너지관리공단의 실증연구사업에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

6. 참고문헌

1. Rafferty, K., Design aspects of commercial open-loop heat pump systems, Geo-Heat Center, Oregon institute of Technology, Klamath Falls, OR, U.S.A., 2000
2. Lienau, P. J., Lund, J. W., Rafferty, K, and Culver, G., Reference book on geothermal direct use, Geo-Heat center, Oregon institute of Technology, Klamath Falls, OR, U.S.A., 1994
3. Kavanaugh S. P. and Rafferty K., 1997, Ground source heat pumps - Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings, Proceedings of the ASHRAE, Atlanta Georgia, 1997, pp. 72-113.
4. Rafferty, K., Heat exchangers, Geothermal direct use engineering and design guidebook, 3rd Ed., Geo-Heat Center, Oregon institute of Technology, Klamath Falls, OR, U.S.A. 1998, pp. 261-277