

지하수 히트펌프 시스템의 대수층 활용 사례 연구

심 병완¹⁾, 이 철우²⁾

Study on the aquifer utilization for a ground water heat pump system

Byoung Ohan Shim, Chulwoo Lee

Key words: groundwater source heat pump, hydrogeothermal, aquifer, heat transfer modeling, pumping well, injection well

Abstract: The validation of a groundwater source heat pump system installation site is estimated by hydrogeothermic modeling. The hydraulic characteristics of the aquifer system is evaluated from pumping and recovery tests. In addition, the temperature distribution by the pumping and the injection of groundwater, and water level fluctuations are simulated by numerical modeling. The total cooling and heating load for the building is designed as 120RT(refrigeration ton) and the ground water source heat pump system covers 50RT as a subsidiary system. The scenario of heat pump operation is organized as pumping and injection of groundwater that is performed for 8 hours per day in cooling mode for 90 days during the summer season. The heat transfer by the injected warm water is limited near the injection wells in the simulated temperature distribution. The reason is that the given operation time is too short to expect broad thermal diffusion in large volume of the aquifer in the simulation time. The simulated groundwater level and temperature distribution can be used as important data to develop an energy effective pumping and injection well system. Also it will be very useful to evaluate the hydraulic capacity of a target groundwater reservoir.

1. 서론

국내 지열을 이용한 냉난방 시스템은 2005년 3월 현재, 전국에 90 여개에 설치되는 등 급속하게 보급되고 있으나 국내 지반조건을 고려하지 않은 시공기술로 인하여 기술 의존도가 높고 관련 기술 수준이 외국에 비하여 낮다(박용부 등, 2006). 천부 지열에너지를 이용하는 방법 가운데 천부지하수의 열원을 이용한 지하수 히트펌프 시스템은 개회로형(open loop) 시스템으로서 지중 천공면적의 축소로 인한 공간 및 설치비용의 감소와 함께, 지하수가 유지하고 있는 일정 온도를 이용하여 높은 성적계수(EER, COP)를 얻을 수 있기 때문에 최근 국내에 많은 기술적 소개가 이루어져 왔다(김영일, 2006; 문영치, 2006; 심병완, 2005; 천영신, 김동윤, 2006; 한정상, 2004; Lee, 2006). 그러나 시스템의 설계시 지반내 수리지열학적 특성을 제대로 고려하지 못한 경우 냉난방 용량의 부족 또는 심지어 시스템을 포기해야하는 경우도 발생할 수 있기 때문에 폐회로형(closed loop) 시스템보다 사전 기술적 검토가 더욱 절실하다(문영치, 2006). 따라서 효율적이고 신뢰성 있

는 시스템을 구성하기 위해서는 냉난방 용량을 고려한 우물 설계(well design), 대수층 특성 파악 및 양수량에 따른 열교환기(heat exchanger) 선정, 지하수 수질 등에 대한 사전 검토가 필요하다. 그리고 수리적 영향에 의하여 발생 가능한 결과로서 지하수 히트펌프나 대수층 에너지 저장과 같이 지하수를 양수하거나 주입하는 열에너지 추출 시스템은 지하수환경에 영향을 줄 수 있다. 따라서 시스템의 지속적인 효율성 확보 및 대수층의 오염방지를 위해서는 설계시 수리지열학적 검토 및 환경적인 조사가 필수적이다.

본 연구에서는 지하수원 히트펌프 시스템을 운영하고 있는 대수층의 수리적 특성을 파악하고, 열 거동 모델링을 통하여 양수정과 주입정간의 열적 간섭 및 수위변동을 추정하여 시스템의 효율성을 검토하고자 한다.

- 1) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
E-mail : boshim@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3055 Fax : (042)861-9721
- 2) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
E-mail : lcw@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3085 Fax : (042)868-3358

2. 본 론

연구 지역은 충청북도 진천군 초평면 은암리에 위치한 화장품 공장의 지하수 히트펌프 시스템이다(Fig. 1). 이 시스템이 위치한 주변 지질은 녹회색 세일, 사암, 자색 세일 및 응회암으로 구성되어 있으며, 주입 및 양수정들이 굴착된 기반암은 자색 세일로서 매우 세립질이며 석영, 방해석, 소량의 운모류와 불투명 광물로 구성된다(이중혁, 김정환, 1971).

이 건물의 냉난방을 위해 두 종류의 지열 히트펌프 운영 방식이 이용되었으며, 전체 평면적 4,677m²를 냉난방하기 위한 총설계 용량은 120RT(refrigeration ton)이다. 지중열교환기를 이용한 시스템은 70RT로 설계되어 있으며, 보조냉난방 장치로서 지하수 히트펌프 시스템은 50RT로 설계되어 있다. 취수정과 주입정은 직경이 8 inch이며, 300m 심도로 각각 2개(H-1, H-4)와 3개(H-3, H-5, H-6)가 설치되었고, 150m 깊이의 관측정(H-2 호공)이 있다.

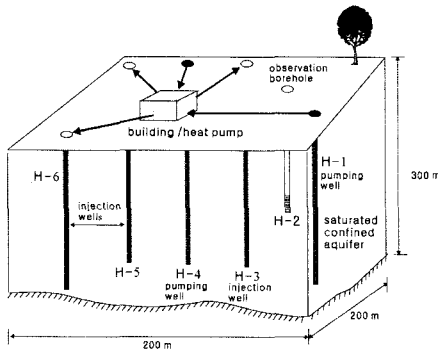


Fig. 1. Schematic diagram of a groundwater source heat pump system in the study site. It is assumed that each well screen is installed from top to the bottom of aquifer boundary.

수리상수를 구하기 위한 양수시험은 H-1호공과 H-4호공에서 1,440분간 양수가 진행되었으며, 주위의 공들에서 경과시간별 수위를 관측하였다. 양수시험시 양수율은 H-1호공이 245m³/day이며, H-4호공이 189m³/day이다. 양수시험은 지하수원 히트펌프의 시스템 설치후 양수시험을 실시하였으며, H-1호공과 H-4호공에서 동시에 진행되었다. 따라서 H-1호공의 양수는 가장 가까이에 위치한 H-2호공을 관측공으로 이용하였으며, H-4호공에서 양수시에는 H-3, H-5 및 H-6호공을 관측공으로 이용하여 간섭에 의한 영향을 최소화하였다. Table 1은 양수시험시 측정된 시간별 수위강하 자료들

반대수(semi-log) 그래프에 나타나어 각 우물에서의 수리상수를 Jacob의 간이 도해법에 의해 계산된 결과이다.

H-1, H-4호공에서 양수중지후 회복되는 지하수위를 분석하여 구한 수리상수는 양수시험에 의한 수리상수와 함께 Table 1에 나타내었다. 양수시험시와 회복시험시에 구한 투수량계수를 비교하여 보면 H-1, H-5호공에서 많은 차이를 보이고 있다. 이는 주로 양수시 양수율을 일정하게 유지하지 못하는 등의 이유로 발생된 오차로 생각되며, 회복시험을 통해 구한 투수량계수가 비교적 정확할 것으로 판단된다. 저류계수에 있어서는 H-3호공의 값이 다른 공들의 값보다 많은 차이를 보이고 있는데, 이의 원인은 H-1호공과 H-4호공에서 동시에 양수함으로써 발생하는 간섭에 의한 영향으로 판단된다.

측정된 기반암의 대수성은 대수층의 수리상수는 회복시험을 기준으로 투수량계수가 1.1 ~ 8.4m²/day이며, 저류계수는 0.000169 ~ 0.000579의 범위를 나타내었다. 이 수리상수들로서는 지반의 대수성이 낮은 편으로서, 대규모 양수를 위한 우물로 이용하기에는 어려울 것으로 생각된다(Freeze and Cherry, 1979).

Table 1. Transmissivities and storativities at the pumping (P.) and recovery (R.) tests.

Parameter	Test	H-1	H-2	H-3	H-4	H-5	H-6
Transmissivity (m ² /day)	P.	0.90	5.19	3.07	1.20	3.39	15.95
	R.	3.83	4.74	2.84	1.10	4.16	8.44
Storativity (×10 ⁴)			5.79	16.9		4.05	4.77

지하수 히트펌프 시스템 이용시 지중 열 거동을 파악하기 위한 모델의 수리지질조건은 단층으로 이루어진 피압대수층으로 가정하였다. 3차원 모델링을 실시하기 위한 시물레이션 영역은 200(x) × 200(y) × 300(z)m 크기의 성질이 같은 공극율이 3%인 대수층 모델을 설정하였으며, 설정된 초기 지하수위는 지표면하 3m이다. 그리고 지표에서의 경계조건은 두 우물에서 같은 양의 주입과 양수 이외의 수평적인 지하수 유동에 의한 유출이나 유입은 없으며, 대수층 상부와 하부는 불투수층으로 가정하였다. 수리전도도는 수리시험을 통한 각 공에서의 수리상수를 산술평균한 0.014 m/day를 이용하였으며, 수직방향의 수리전도도는 수평수리상수의 1/10의 값을 이용하였다. 그리고 열적 경계조건도 대수층 상부와 하부 및 측면으로부터의 열유속(heat flux)이 없는 것으로 가정하였다. 설정된 열전도도는 참조값(Beardsmore and Cull, 2001)으로서 세일의 열전도도 범위 2.1 ±

0.4W/m-K를 고려하여 2.1W/m-K로 설정하였다. 전체 시뮬레이션 구간은 10,374 개의 유한요소와 7,088 개의 격자로 구성되어 있으며, 삼각 프리즘 형태의 유한요소 형태를 이용하였다(Fig. 2). 그리고 보다 정밀한 형태의 계산을 가능하게 하고, 오차를 감소시키기 위하여 우물에 가까울수록 격자 크기를 작게 설정하였다. 모델내 온도 조건은 대수층의 초기온도를 15°C로 설정하고, H-1, H-4 우물에서 양수한 지하수를 히트펌프를 통과시켜 데워진 24°C 물을 H-3, 5, 6 우물에서 대수층으로 재주입하는 것으로 설정하였다.

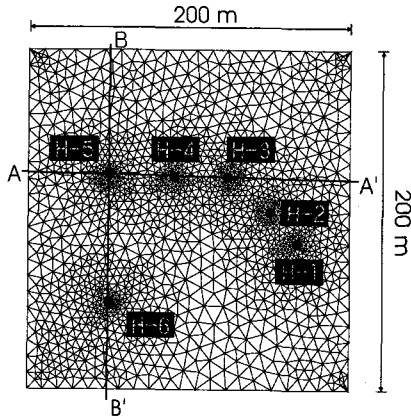
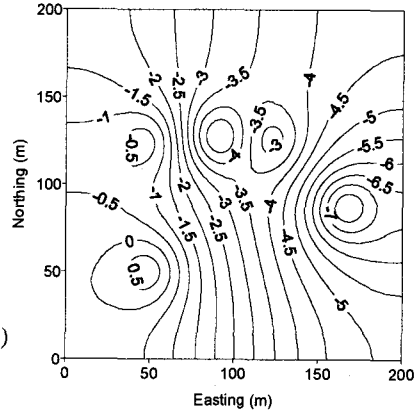
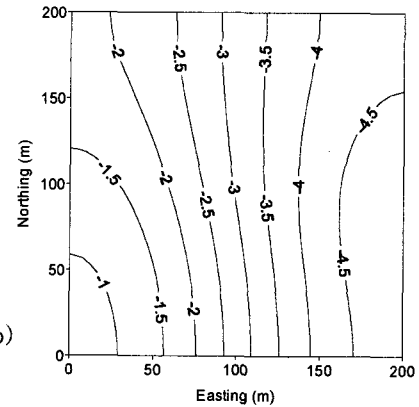


Fig. 2. Generated finite element mesh and well locations for numerical simulation and input of boundary conditions.

각 공에서의 지하수위는 일단위의 주기적인 변동곡선을 나타내었으며, 90일의 시스템 운영기간 동안 양수정 H-1 및 H-4에서는 수위가 양수시 각각 최저 -21.6m와 -19.1m까지 하강하며, 양수 중단시 -7.0, -4.0m까지 회복된다. 이와같이 지하수위 변동곡선의 진폭이 각각 14.6, 15.1m의 값을 나타내지만 전체적으로 일정한 값을 유지하고 있으며, 지하수위가 시간에 따른 안정적(stationary) 형태를 나타내었다. H-3, 5, 6 주입정에서는 시스템 운영기간동안 최대 6.2, 9.6, 10.0m까지 지하수위가 상승하는 것으로 나타났으며, 주입중단시 7시간 경과후에 -3.4, -0.9, 0.2m까지 수위가 하강하는 것으로 나타났다. 각 주입정의 지하수위변동 진폭은 9.6, 10.5, 9.8m를 나타내며, 주입중단시에는 급격히 수위가 하강하는 형태를 나타낸다. 시스템 운영이 종료된 뒤에는 각 공에서의 지하수위가 급격히 초기 지하수위로 수렴하는 경향을 보인다. H-2 관측공에서는 양수정 H-3의 영향을 받고 있으며, 지하수위가 지속적으로 하강하므로 H-3 주입정보다 H-1 양수정의 영향을 크게 받고 있는 것을 알 수 있다(Fig. 3).



(a)



(b)

Fig. 3. Simulated groundwater level after 90 days groundwater source heat pump system operation (a) and that after 10 days system operation stop (b).

3. 결론

대수층의 수리상수는 회복시험에 의하여 투수량계수가 1.1 ~ 8.4m²/day이며, 저류계수는 0.000169 ~ 0.000579의 범위를 나타내었다. 시뮬레이션 결과 대수층내 주입수의 열적 확산이 매우 느리게 진행되므로, 주입수의 온도 영향반경이 주입정과의 거리가 약 10m 내외로 매우 제한적으로 나타난다. 따라서 주입정으로부터 양수정의 온도 간섭 현상이 나타나지 않으므로 온도변화에 의한 지하수 히트펌프의 효율성의 감소는 주어진 시뮬레이션 기간내에는 없을 것으로 판단된다. 그리고 겨울철에는 다시 냉수가 대수층으로 주입되게 되므로 온도 간섭에 의한 장기적인 시스템의 성능저하는 우려되지 않는다. 그 이유는 지반의 수리전도도 및 공극율이 낮기 때문에 90일간의 주입기간은 전체적인 대수층내 온도 분포에 영향을 주기에는 매우 짧기 때문이다. 지하수 주입시 주입공의 수위는 지표보다 최소 6.2m에서 최대 10m 정도 높게 형성되는 것으로 추정되므로 공의

제원이나 주입정 설계에서 이러한 수압의 영향을 상쇄시켜주어야 될 것으로 판단된다. 이러한 지하수위 변동 시뮬레이션을 통하여 추정된 지하수위 자료를 이용하면 적절한 양수 및 주입 펌프를 선택하여 전력사용량을 최소화하여 시스템의 효율을 최대화할 수 있다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 '심부 지열에너지 개발 사업' 과제의 일환으로 수행되었습니다. 현장 자료 및 실험 자료 등 많은 도움을 주신 호서대학교 임효재 교수님과 (주)지오테크 박성구 사장님께 감사드립니다.

References

- [1] 김영일, 2006, 공기, 지열 및 지하수 열원 열 펌프의 시뮬레이션, 지열에너지 시스템 기술 자료, 한국설비기술협회 설비저널 2006년 3월호, p. 92-100.
- [2] 문영치, 2006, 지하수 이용 지열히트 펌프 시스템 기술, 지열에너지 시스템 기술자료, 한국설비기술협회 설비저널 2006년 3월호, p. 125-135.
- [3] 박용부, 박중배, 임해식, 백성권, 2006, 지열 냉난방시스템의 적용현황 및 전망, Huri Focus 12호, 주택도시연구원, 21p.
- [4] 심병완, 2005, 대수층 축열 에너지(ATES) 활용 시스템 모델의 설계인자 추정을 위한 시뮬레이션, 10(4), p. 54-61.
- [5] 이종혁, 김정환, 1971, 증평 지질도폭 설명서, 국립지질조사소, 과학기술처, 35p.
- [6] 천영신, 김동윤, 2006, 지하수 열원 지열시스템, 지열에너지 시스템 기술자료, 한국설비기술협회 설비저널 3월호, p. 115-124.
- [7] 한정상, 한규상, 한혁상, 한찬, 2004, 친환경 대체에너지인 천부 지중열을 이용한 지열펌프 냉난방 시스템, 한림원.
- [8] Beardsmore, G. R., and Cull, J. P., 2001, Crustal heat flow, Cambridge University Press, 324p.
- [9] Lee, J. Y., 2006, Geoscience Journal, Characteristics of ground and groundwater temperature in a metropolitan city, Korea: considerations for geothermal heat pumps, 10(2), p. 165-174.
- [10] Freeze, R. A., and Cherry, J. A., 1979, Groundwater, Prentice-Hall, 604p.