

수치 시뮬레이션을 이용한 복수정(Two-Well) 개방형 지열 시스템의 열원수 온도 변화 검토

A Study on the Characteristics of Heat Source Temperature for Two-Well Geothermal System Using Numerical Simulation

조정흠(JeongHeum Cho), 남유진(YuJin Nam)[†]

부산대학교 건축공학과

Department of Architecture Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Republic of Korea

(Received December 15, 2014; revision received February 9, 2015; Accepted: February 16, 2015)

Abstract The use of groundwater and ground heat is one of the ways to use natural and renewable energy, and it has been considered as a technology to reduce greenhouse gas emissions and increase energy-saving. There are a few researches on the optimum design for the open-loop geothermal system. In this study, to develop the optimal design method numerical simulation of the open-loop geothermal system with two-wells was performed by a groundwater and heat transfer model. In this paper, a study was performed to analyze the system performance according to well distance and pumping flow rate. In the result, average heat exchange rate and heat source temperature were calculated and it was found that they were dependent on the pumping rate.

Key words Geothermal heat pump system(지열 히트펌프 시스템), Groundwater(지하수), Numerical simulation(수치 시뮬레이션), Heat source(열원)

[†] Corresponding author, E-mail: namyujin@pusan.ac.kr

기호설명

α : 고체, 액체, 기체의 상태
 i, j : 오일러 공간좌표계의 지수
 ε : 체적비율 [$0 \leq \varepsilon \leq 1$]
 ρ : 밀도 [kg/m^3]
 g_i : 중력 벡터 [m/s^2]
 v_i : 각 상의 속도 벡터 [m/s]
 k_{ij} : 투수텐서(permeability tensor) [m^2]
 μ : 점성계수 [kg/ms]
 E : 내부(열)에너지
 Q_T : 에너지 발생량
 j_{iT} : 열플럭스
 Q_p : 질량 발생량

1. 서 론

국내 에너지소비 해외 의존도는 2012년 기준 96%⁽¹⁾로 그 중 건물부문의 에너지소비는 전체 에너지소비 중 약 22.3%를 차지하고 있다. 건물부문의 에너지 절약을

위하여 정부는 2014년 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법을 개정하였다. 연면적 1,000 m^2 이상의 공공기관 건축물에 대하여 예상에너지 사용량 대비 신재생에너지 공급의무 비율을 12%로 하여 이에 따라 의무적으로 신재생에너지를 공급하는 정책이 시행되고 있다. 아울러 국내 신재생에너지공급의무화 제도(RHO, Renewable Heating Obligation)가 도입예정임에 따라 신재생에너지에 대한 관심이 증가하고 있다.

건축물에 활용되는 다양한 신재생에너지 중, 지중열 및 지하수를 이용한 지열히트펌프 시스템은 크게 개방형(Open-Loop)과 밀폐형(Closed-Loop)으로 나뉘어진다. 그 중 개방형 지열 시스템은 연중 항온성을 지닌 지하수와 직접 열교환을 함으로써 히트펌프 시스템의 높은 효율을 기대할 수 있는 기술이다. 개방형 지열히트펌프 시스템은 다시 복수정(Multi-Well) 방식과 SCW(Standing Column Well) 방식으로 나눌 수 있다. Fig. 1은 두 개의 관정을 이용한 복수정(Two-Well) 방식을 나타낸 것으로 동일한 대수층에서 취수정과 주입정을 별도로 설치하여 냉·난방 열원으로 사용한다. 취수정에서 지하수를 취수하여 히트펌프의 열원으로 활용한 후, 주

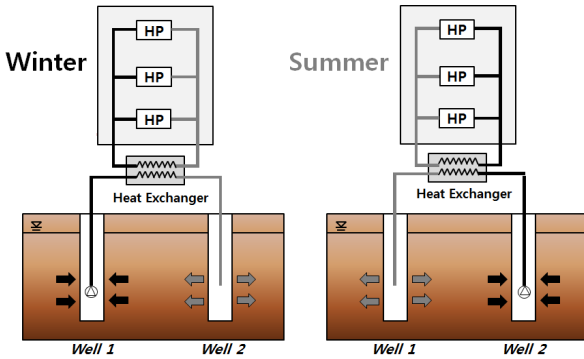


Fig. 1 Geothermal heat pump system using Two-Well.

입정으로 재주입하는 방식이다.

Russo et al.⁽²⁾은 대형 상업 건물의 개방형 지열 시스템을 대상으로 우물정기 지중, 지하수에 미치는 영향을 분석하였다. Al-Sarkhi et al.⁽³⁾은 SCW형 지열 히트펌프 시스템을 대상으로 유한요소법을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 지열 히트펌프 시스템의 채열성능 해석을 위한 응용 프로그램을 개발하였다. Nam et al.⁽⁴⁾은 개방형 지열히트펌프 시스템의 현장 실험 데이터와 지하수-지중열 동시해석 시뮬레이션틀을 활용한 시뮬레이션 결과값을 비교하여 시뮬레이션 모델의 타당성을 확인하였으며, 이를 통하여 개방형 지열히트펌프 시스템의 냉난방 부하에 따른 최적설계 및 운전성능을 검토하였다.

국내에서는 개방형 지열히트펌프 시스템 사용에 따른 지하수의 지질화학적 특성 변화에 관한 연구⁽⁵⁾가 있었으며, 이와 관련하여 개방형과 밀폐형 지열 히트펌프 시스템이 수리지질학적 특성에 미치는 영향에 관한 연구⁽⁶⁾가 있었다. Kim et al.⁽⁷⁾은 지하수 수위가 히트펌프 시스템 성능에 미치는 영향에 관한 연구를 하였으며, Lim et al.⁽⁸⁾은 복수정(Two-Well) 지열히트펌프 시스템의 성능에 관한 실험적 연구를 하였다. 이 외에도 개방형 지열히트펌프 시스템에 대한 다양한 연구 결과들이 발표되었지만, 지하수-지중열 이동 동시해석 모델을 이용한 해석이나 개방형 지열 시스템의 최적설계법에 대한 연구는 미비한 실정이다. 아울러 현재 국내에서 개방형 시스템은 선진국의 개방형 지열히트펌프 시스템의 가이드라인^(9, 10)을 참고하고 있으나, 밀폐형 시스템에 비하여 국내 실정에 맞는 연구 및 기술 표준화가 확립되지 않은 상황이다.

따라서 본 연구에서는 개방형 지열 시스템 중 복수정(Two-Well) 시스템을 대상으로 지하수-지중열 이동 동시해석 모델을 이용한 수치시뮬레이션을 수행하여 양수량 및 이격거리 변화에 따른 열원수 온도 변화 분

석을 하였으며, 향후 개방형 지열히트펌프 시스템의 최적설계법 개발의 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 시뮬레이션 개요

개방형 지열 히트펌프 시스템의 성능을 정확하게 예측하기 위해서는 지중열 이동 및 지하수 유동 해석과 지중 열교환기 및 토양의 모델링을 적절하게 수행해야 한다. 본 연구에서는 토양을 매체로 모델화하고 포화상태 또는 불포화 상태에서의 열 이동과 지하수 이동을 유한요소법에 근거하여 해석하였다. 본 해석 방법은 지하수를 이용하는 개방형 지열시스템의 관정 내 열매체 온도 변화와 지중과의 열교환량을 계산할 수 있는 장점이 있다.⁽¹¹⁾ 수치해석을 위하여 토양을 3상(고체, 액체, 기체상태)으로 구분하여 식(1)~식(3)의 방정식(질량보존의 법칙, 운동량보존의 법칙, 에너지보존의 법칙)을 각각의 상태에서 모두 만족시키도록 하는 3차원 지하수-지중열 이동 모델링을 실시하였다.

$$\frac{\delta}{\delta t}(\epsilon_\alpha \rho^\alpha) + \frac{\delta}{\delta x_i}(\epsilon_\alpha \rho^\alpha v_i^\alpha) = \epsilon_\alpha \rho^\alpha Q_p^\alpha \quad (1)$$

$$v_i^\alpha + \frac{k_{ij}^\alpha}{\epsilon_\alpha \mu^\alpha} \left(\frac{\delta \rho^\alpha}{\delta x_i} - \rho^\alpha g_i \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\delta}{\delta t}(\epsilon_\alpha \rho^\alpha E^\alpha) + \frac{\delta}{\delta x_i}(\epsilon_\alpha \rho^\alpha v_i^\alpha E^\alpha) + \frac{\delta}{\delta x_i}(J_{iT}^\alpha) = \epsilon_\alpha \rho^\alpha Q_T^\alpha \quad (3)$$

본 해석 방법의 신뢰성 검토는 선행연구⁽¹²⁾에서 실험 결과와 해석 결과의 비교분석을 통해 확인되었다.

2.2 시뮬레이션 조건

시뮬레이션 모델과 해석조건은 Fig. 2와 Table 1에 나타내었다. 지반조건으로 초기온도 17°C, 운전시간은 평일 9시부터 18시까지로 하였으며, 운전 기간은 18개월로 실시하였다. 취수정과 주입정 사이의 거리는 20 m와 40 m로 설정하였으며, 순환수의 온도차(ΔT)는 5°C로 설정하였다.

Case별 유량의 변화를 주어 Case 1은 50 m³/d, Case 2는 75 m³/d, Case 3는 100 m³/d, Case 4는 150 m³/d, Case 5는 200 m³/d, Case 6은 300 m³/d로 설정하였으며, 운전 시간은 평일 9시부터 18시까지로 하였으며, 운전 기간은 18개월로 실시하였다. 시뮬레이션 스케줄에 따라 난방시에는 Well 1에서 양수하여 Well 2에 주입하며, 냉방시에는 Well 2에서 양수하여 Well 1에 주입한다.

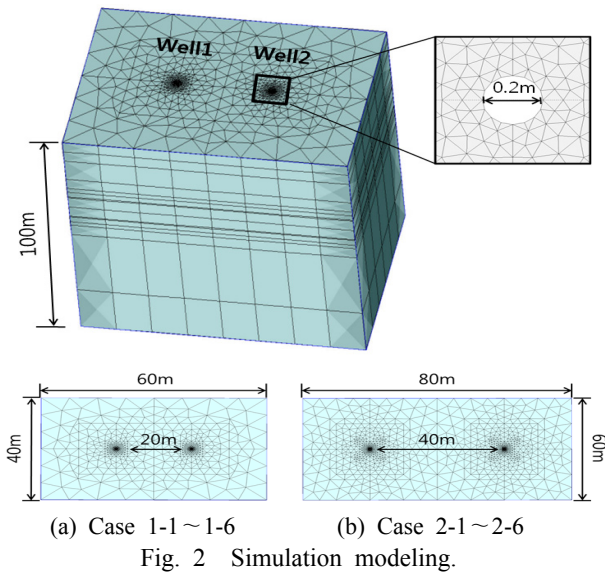
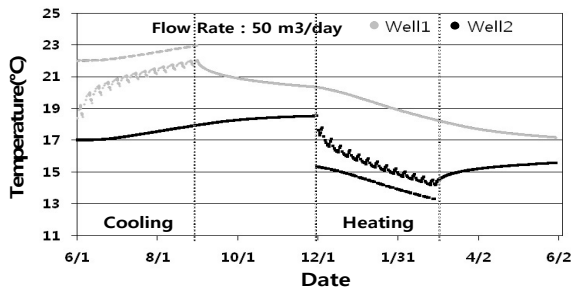


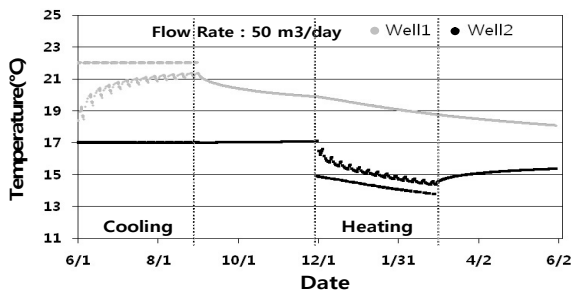
Fig. 2 Simulation modeling.

Table 1 Simulation condition

Initial Temperature (°C)	Initial Water Level (m)	Porosity (-)	Hydraulic Conductivity (10^{-4} m/s)	Thermal Conductivity (W/mK)
17	-5	0.3	1.0	0.8



(a) Well Distance-20 m



(b) Well Distance-40 m

Fig. 3 Underground temperature change of well surrounding.

3. 결과 및 고찰

3.1 지중온도변화 분석

Fig. 3은 복수정(Two-Well) 시스템에서 관정주변 지중온도 변화를 보여준다. 지중온도는 지하 40 m지점의 각 Well로부터 50 cm 떨어진 지점의 온도를 나타내며, 운전 스케줄에 따른 지중온도 변화를 확인할 수 있다. 이격거리 20 m에서 지중온도 변화는 각 운전기간 내에 크게 나타남을 확인하였으나 이격거리 40 m는 각 운전기간 내에 지중온도는 변화가 작음을 확인하였다. 이것은 관정간의 이격거리가 짧아지면, 주입정에서 방출된 열이 관정간 동수구배에 의해 취수정으로 이동하여 취수온도에 영향을 줄 수 있음을 시사한다. 또한 이러한 관정간의 열간섭 현상은 양수량이 많아질수록 현저하게 나타난다.

3.2 이격거리에 따른 열원수 온도변화 분석

Fig. 4는 이격거리 20 m의 유량변화에 따른 열원수 온도 분석 결과로서 운전 개시 후 1개월간의 열원수 출입구 온도변화를 나타낸다. 열원수 온도는 운전시간이 지남에 따라 주입정에서 방출된 열이 취수정의 온도에 영향을 미쳐 EWT(Enter Water Temperature)의 start line과 비교하였을 때, 1개월 후의 열원수 온도변화량은 난방 운전시 0.63°C(Case 1-1)~2.63°C(Case 1-6)까지 변화하였으며 냉방 운전시 0.48°C(Case 1-1)~2.23°C(Case 1-6)로 변화하는 것을 확인하였다.

한편, 이격거리 40 m에서는(Fig. 5) 열원수 온도변화 EWT의 start line과 비교하였을 때, 난방 운전시 0.43°C(Case 2-1)~0.6°C(Case 2-6)로, 냉방 운전시 0.29°C(Case 2-1)~0.35°C(Case 2-6)로 변화하여 이격거리 20 m에 비해 전 시즌의 지중방열로 인한 양수온도의 차이가 미미함을 확인하였다.

3.3 평균 열원수 온도 및 평균 채열량 분석

Fig. 6과 Table 2는 냉방 및 난방 각각 3개월간의 평균 열원수 온도 및 평균 채열량 결과를 나타낸다. 평균 열원수 온도는 양수량이 증가함에 따라 일견 상승하는 것으로 보이나, 이것은 전체 계산 스케줄이 냉방-난방-냉방의 순으로 수행되어 난방 운전시는 전시즌(냉방)에 방출된 열이 취수온도에 영향을 주게 되며, 양수량이 많을수록 전시즌에 방출된 열이 많아져 평균 온도가 높아지는 결과를 나타낸다.

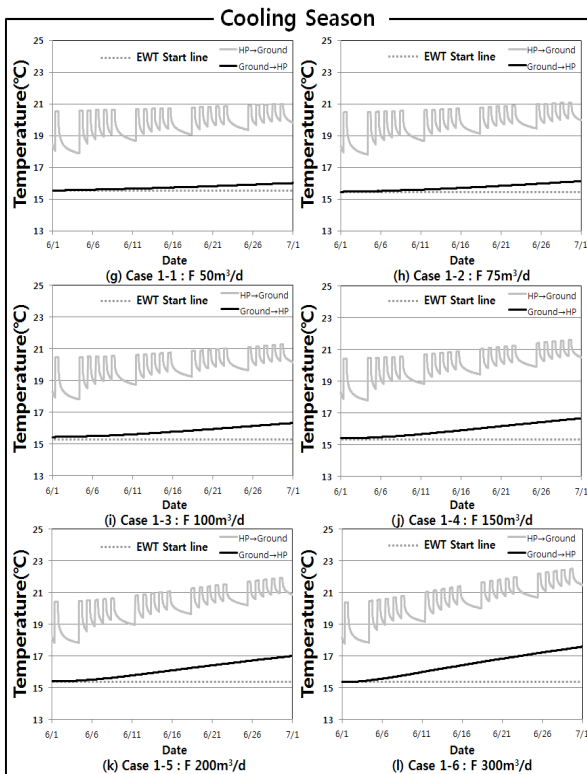
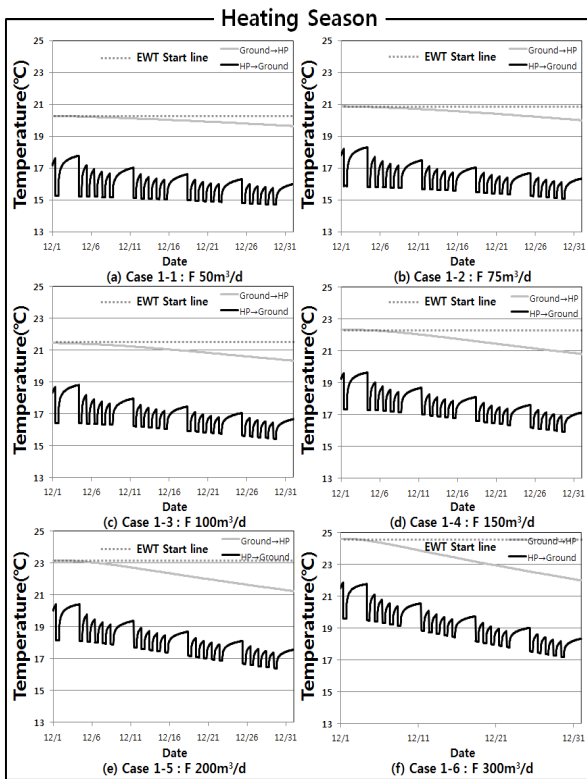


Fig. 4 Heat source water temperature of well distance 20 m.

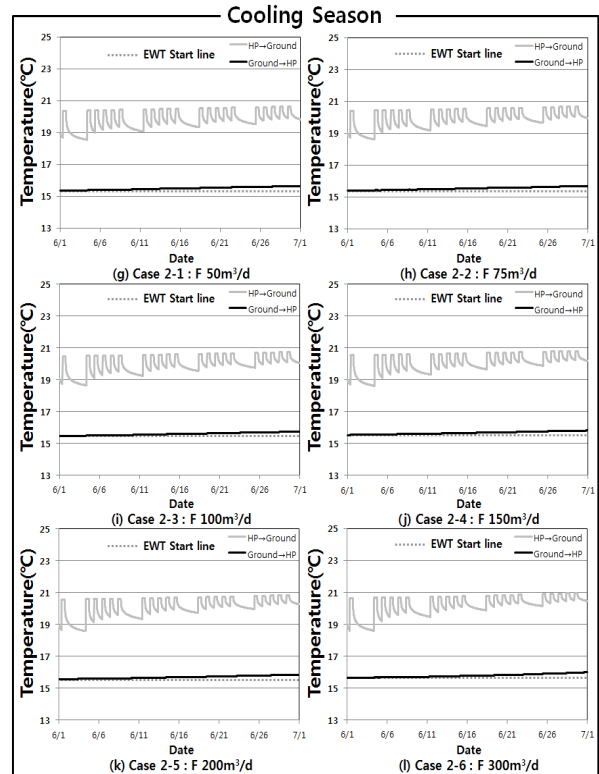
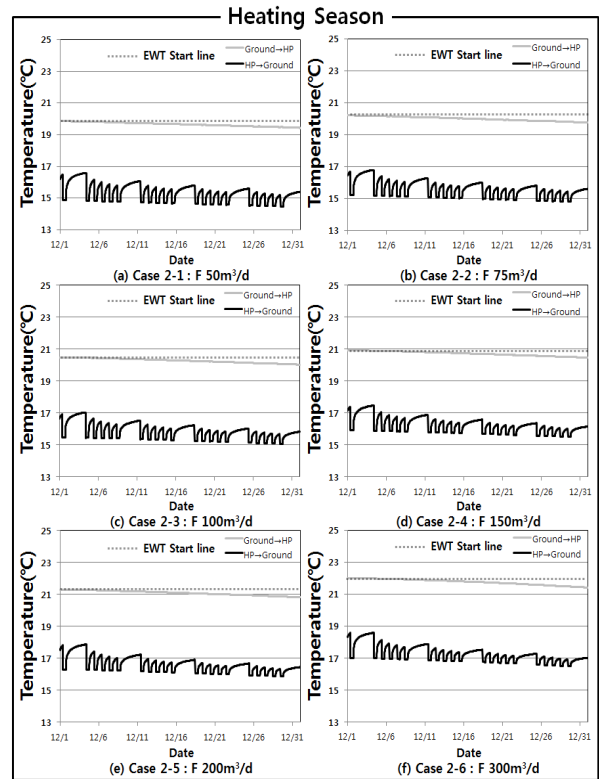


Fig. 5 Heat source water temperature of well distance 40 m.

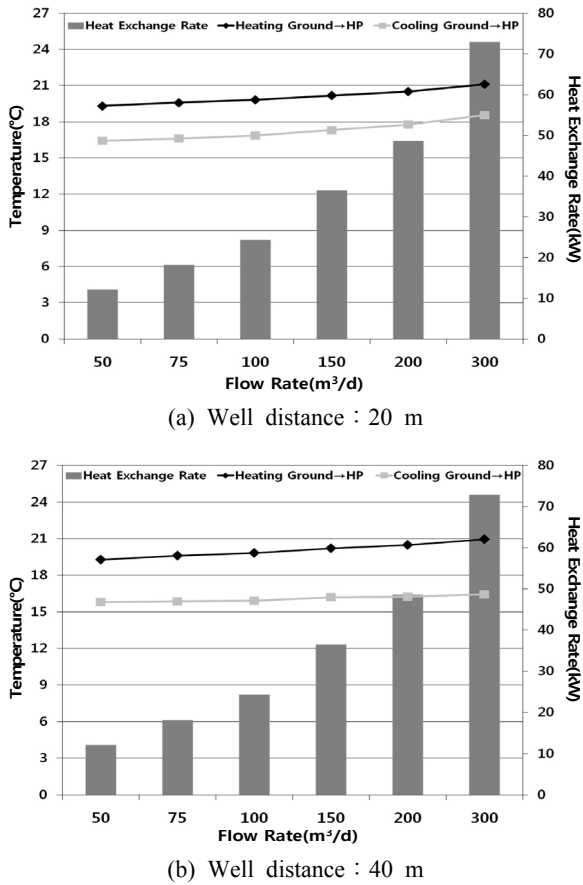


Fig. 6 Average heat source water temperature and heat exchange rate.

Table 2 Simulation results

Case	Well distance (m)	Flow Rate (m ³ /d)	Heating(°C)		Cooling(°C)		HER* (kW)
			Ground → HP	HP → Ground	Ground → HP	HP → Ground	
1-1	20	50	19.31	14.31	16.41	21.40	12.15
1-2		75	19.59	14.59	16.61	21.61	18.13
1-3		100	19.82	14.82	16.85	21.85	24.31
1-4		150	20.18	15.18	17.31	22.31	36.46
1-5		200	20.51	15.51	17.76	22.76	48.61
1-6		300	21.10	16.10	18.55	23.55	72.90
2-1	40	50	19.28	14.28	15.80	20.80	12.15
2-2		75	19.60	14.60	15.85	20.85	18.13
2-3		100	19.83	14.83	15.91	20.91	24.31
2-4		150	20.20	15.20	16.20	21.20	36.46
2-5		200	20.48	15.48	16.24	21.24	48.61
2-6		300	20.94	15.94	16.43	21.43	72.90

* HER : Heat Exchange Rate.

각 Case별 평균 채열량(HER)은 관정간 이격거리에 관계없이 양수량에 비례하여 증가하는 것을 볼 수 있으나, 평균 열원수 온도는 이격거리가 멀수록 양수량 변화에 의한 영향이 작아지는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 개방형 지열 시스템의 최적설계법을 개발하기 위해, 복수정(Two-well) 개방형 지열 시스템을 대상으로 지하수-지중열 이동 동시해석 모델을 이용한 수치시뮬레이션을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 관정간의 이격거리가 짧아지면, 주입정에서 방출된 열이 관정간 동수구배에 의해 취수정으로 이동하게 되어 열원수 온도에 큰 영향을 줄 수 있음을 확인하였다.
- (2) 이격거리 20 m에서 3개월간의 EWT 열원수 온도 변화는 양수량 50 m³/d의 조건에서 start line 온도 기준 난방 2.06°C, 냉방 1.70°C의 변화를 보였으며, 양수량 300 m³/d의 경우 난방 6.65°C, 냉방 3.12°C로 변화하는 것을 확인하여 양수량이 증가할수록 열원수 온도에 미치는 영향이 커지는 것을 확인하였다.
- (3) 이격거리 40 m의 EWT 열원수 온도변화는 start line 에서 난방 운전시 최대 2.48°C, 냉방 운전시 최대 3.09°C로 변화하는 것을 확인하였다. 이것은 관정간의 이격거리가 멀어지면 지중방열로 인한 열원수 온도에 미치는 영향이 미미해진다는 것을 시사하며, 관정간 적정 이격거리가 필요함을 의미한다.

향후 개방형 복수정 지열 시스템의 최적설계법을 개발하기 위해 채열량에 따른 적정 이격거리를 제시하고, 토양 열물성치에 따른 열원수 온도변화 및 채열량 분석을 실시할 예정이다.

후 기

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(NO. 20123040110010).

References

1. Korea Energy Economics Institute, 2013, Yearbook of Energy Statistics, Download site of <http://www.keei.re.kr>, pp. 4-5.
2. Russo, S. L. and Civita, M. V., 2009, Open-loop groundwater heat pumps development for large buildings

- : A case study, *Geothermics*, Vol. 38, pp. 335-345.
3. Al-Sarkhi, A., Abu-Nada, E., Nijmeh, S., and Akash, B., 2008, Performance evaluation of standing column well for potential application of ground source heat pump in Jordan, *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, pp. 863-872.
 4. Nam, Y. J. and Ryoza, O., 2011, Development of potential map for ground and ground water heat pump systems and the application to Tokyo, *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp. 677-685.
 5. Park, Y. Y., Kwon, K. S., Kim, N. J., Lee, J. Y and Yoon, J. G., 2013, Change of geochemical properties of groundwater by use of open loop geothermal cooling and heating systems, *Geological Society of Korea*, Vol. 49, No. 2, pp. 289-296.
 6. Park, Y. Y., Mok, J. K., Jang, B. J., Park, Y. C., and Lee, J. Y., 2013, Influence of open and closed loop geothermal cooling and heating systems on hydrogeological properties, *Geological Society of Korea*, Vol. 49, No. 6, pp. 649-659.
 7. Kim, J. S. and Nam, Y. J., 2013, A study of the influence of groundwater level on the system performance of open loop geothermal system, *Korea Society of Geothermal Energy Engineers*, Vol. 9, No. 3, pp. 1-10.
 8. Lim, H. J., Kwon, J. T., Kim, C. E., Kong, H. J., and Park, S. K., 2009, An experimental study of ground water source two well type geothermal heat pump system, *Journal of SAREK*, Vol. 21, No. 8, pp. 468-474.
 9. New York City Department of Design and Construction, 2012, *Geothermal Heat Pump Manual-A Design and Installation Guide for New York City*, pp. 25-26.
 10. Jeffrey, D. S., Simon, J. R., Zheng, D. and Andrew, C., 2002, R&D Studies Applied to Standing Column Well Design, ASHRAE 1119-RP.
 11. WASY GmbH, 2002, *FEFLOW Reference manual*, pp. 16-18.
 12. Nam, Y. J. and Ryoza, O., 2010, Numerical simulation of ground heat and water transfer for groundwater heat pump system based on real-scale experiment, *Energy and Buildings*, Vol. 42, pp. 69-75.