

강변여과수 시설에서의 지열에너지 활용 가능성 평가

신 지연¹⁾, 김 경호²⁾, 배 광옥³⁾, 이 강근⁴⁾, 정 우성⁵⁾, 석 희준⁶⁾, 김 형수⁷⁾

Assessment for geothermal energy utilization in the riverbank filtration facility

Jiyoun Shin, Kyung-Ho Kim, Gwang-Ok Bae, Kang-Kun Lee,
Woosung Jung, Heejun Suk

Key words : geothermal energy(지열 에너지), riverbank filtration(강변 여과수), numerical calibration (수치 보정), groundwater temperature(지하수 온도)

Abstract : Riverbank filtration is a kind of artificial aquifer recharge for the fresh water supply. By construction of several production wells penetrating the riverbank, surface water withdrawn from the river would pass riverbed. This extracted water is well known to be cooler than surface water in summer and warmer than surface water in winter, showing more constant water temperature. This characteristic of extracted water is applied to geothermal energy utilization. Prediction of the annual temperature variation of filtrated water is the major concern in this study. In Daesan-myeon, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, South Korea, riverbank filtration facility has been on its operation for municipal water supply and thermal energy utilization since 2006. Appropriate hydraulic and thermal properties were estimated for flow and heat transfer modeling with given pumping rate and location. With the calibrated material properties and boundary conditions, we numerically reproduced measured head and temperature variation with acceptable error range. In the numerical simulation, the change of saturation ratio and river stage caused by rainfall was calculated and the resulting variation of thermal capacity and thermal conductivity was considered. Simulated temperature profiles can be used to assess the possible efficiency of geothermal energy utilization using riverbank filtration facility. Influence of pumping rate, pumping location on the extracted water temperature will be studied.

Nomenclature

T : temperature, °C

t : time, s

q : groundwater velocity, m/s

$\lambda_b, \lambda_s, \lambda_l, \lambda_a$: thermal conductivity of bulk, solid, liquid and air, respectively, W/m °C

C_b, C_s, C_l, C_a : volumetric heat capacity of bulk, solid, liquid and air, respectively, kJ/m³°C

$\theta_s, \theta_l, \theta_a$: content of solid, liquid and air, respectively

1. 서론

건물의 냉난방을 위하여 지열 에너지를 활용하는 방법에는 Hot Dry Rock (HDR), Geothermal Heat Exchanger (GHE), Underground Thermal

-
- 1) 서울대학교 지구환경과학부
E-mail : jylunar@gmail.com
Tel : (02)873-3647 Fax : (02)873-3647
 - 2) 서울대학교 지구환경과학부
E-mail : raxia99@gmail.com
Tel : (02)873-3647 Fax : (02)873-3647
 - 3) 서울대학교 지구환경과학부
E-mail : gokbae@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8173 Fax : (02)873-3647
 - 4) 서울대학교 지구환경과학부
E-mail : kkleee@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8161 Fax : (02)873-3647
 - 5) 한국 수자원공사 수자원연구원
E-mail : usjung@kwater.or.kr
Tel : (042)870-7601
 - 6) 한국 수자원공사 수자원연구원
E-mail : sxh60@kwater.or.kr
Tel : (042)870-7641
 - 7) 한국 수자원공사 수자원연구원
E-mail : hskim@kwater.or.kr
Tel : (042)870-7640

Energy Storage (UTES) 등의 여러 가지 기술이 시도되어 왔다. 하지만 이러한 기술들은 지하 수백 m ~ 수 km 정도 깊이까지 관정을 직접 뚫어야 하므로 초기 설치비용이 많이 든다는 단점이 있다. 따라서 새로운 관정을 설치할 필요 없이 기존에 있는 시설을 이용할 수 있다면 매우 유용한 방법이 될 것이다. 이 연구에서는 그 중 하나로 강변여과수를 사용하는 방법에 대해 살펴보고자 한다.

강변여과수란 강 근처의 충적 대수층에 양수정을 설치하여 대수층의 인공 함양을 유도함으로써 취수한 지하수를 말한다. 강변여과수는 강과 주변 지하수로부터 대수층을 거쳐 양수정으로 유입되는 과정에서 오염물의 농도가 저감될 뿐 아니라¹⁾, 연중 온도 분포도 일정해진다는 특징을 보인다²⁾. Sheet et al. (2002)는 강변여과수의 온도가 양수 지점과 양수량에 따라 달라짐을 관찰하였으며³⁾, Su et al. (2004)는 충적 대수층의 온도 분포가 수리전도도에 매우 민감하게 변화함을 수치 실험을 통해 밝혔고, 특히 강우가 있을 때에는 불포화의 존재를 고려해야 할 것이라고 하였다⁴⁾. 이러한 연구들은 강변여과수의 온도를 추정하는 데 있어서 수리지질학적 요소가 지대한 영향을 미침을 시사하고 있다.

이 연구에서는 양수 지점과 양수량 변화에 따른 강변여과수의 온도 변화를 추정하기 위한 기초 작업으로, 수치 실험 결과를 현재 건물 냉난방을 위해 강변여과수를 활용하고 있는 창원시 대산 정수장의 사례를 비교하고 보정하였다. 여기에서 강우에 따른 불포화대의 함수량 변화를 고려함으로써, 함수량에 따른 수리적, 열적 물성 변화가 함께 반영되었다.

2. 창원시 대산면 강변여과수 시설

경남 창원시 대산면에 위치한 대산 정수장 (Fig.1)은 낙동강 하구로부터 약 65 km 떨어져 있으며, 주변 지역은 대부분 농경지로 이용되고 있다. 2002년부터 7개의 양수정에서 매일 10,000 톤 이하의 물을 취수 후 정수하여 이를 창원시에 공급하고 있다. 또한 양수된 강변여과수는 연중 약 17°C의 일정한 온도를 보이고 있어 2006년부터 시설의 일부 건물을 냉난방하는데에 사용되고 있다.

이 지역의 지층은 주산 안산암과 팔룡산 응회암 등 저투수성 암석을 기반으로 하는 50-60 m 두께의 두터운 퇴적층으로 이루어져 있으며, 2004년 코어샘플을 통하여 각 지층의 두께와 수리전도도가 table 1과 같이 추정된 바 있다⁵⁾. 이 연구에서는 이 값 외에도, 각 양수정에서의 일 평균 양수량, 시설에서 약 12km 떨어진 밀양 기상관측소에서 측정된 일 평균 대기 온도 및 강우량, 약 2km 떨어진 수산대교에서 기록된 강의 일 평균 수위가 사용되었다.



Fig. 1 Daesan riverbank filtration facility and location of 7 wells

Layer	Thickness (m)	Hydraulic conductivity (m/s)
Fine sand	18.4	2.2×10^{-4}
Medium sand	3.9	6.0×10^{-4}
Fine sand	8.6	2.8×10^{-4}
Sandy gravel	11.7	4.4×10^{-2}
Weathered zone	19.2	-

Table 1 Thickness and hydraulic conductivity of each layer from the core sample

3. 수치 모델링

격자 생성을 위해서 GMS 5.0⁶⁾이 사용되었다. 모델 면적은 약 45.9 km²이고 평균 두께는 약 65.0 m이며, 사용된 노드는 총 34,564개였다. 계산을 위해서는 HydroGeoSphere⁷⁾가 사용되었다.

3.1 지배방정식

전도와 대류를 고려하는 3차원의 열전달 방정식 (1)이 사용되었다.

$$\lambda_b \nabla^2 T - q C_i \nabla T = C_b \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기에서 열전도도와 열용량은 각 상의 부피비에 따라 아래와 같은 식 (2)와 (3)으로 나타내어진다. 포화대의 경우 열전도도와 열용량은 연중 일정하게 유지되지만, 불포화대에서는 강우에 의해 함수량이 변하면서 수리적 물성 뿐 아니라 열적 물성도 변화하게 된다.

$$\lambda_b = \lambda_s^{\theta_s} \lambda_l^{\theta_l} \lambda_a^{\theta_a} \quad (2)$$

$$C_b = C_s \theta_s + C_l \theta_l + C_a \theta_a \quad (3)$$

3.2 경계 조건 및 사용된 물성치

수치 실험에는 수리적 조건에 대한 경계조건과 열적 조건에 대한 경계조건이 동시에 필요하다. 아래의 Fig. 2는 연구 지역과 대략의 경계조건을 나타내고 있다. 사각형으로 표시된 곳이 대산정수장 시설과 양수정이 위치한 곳이다.

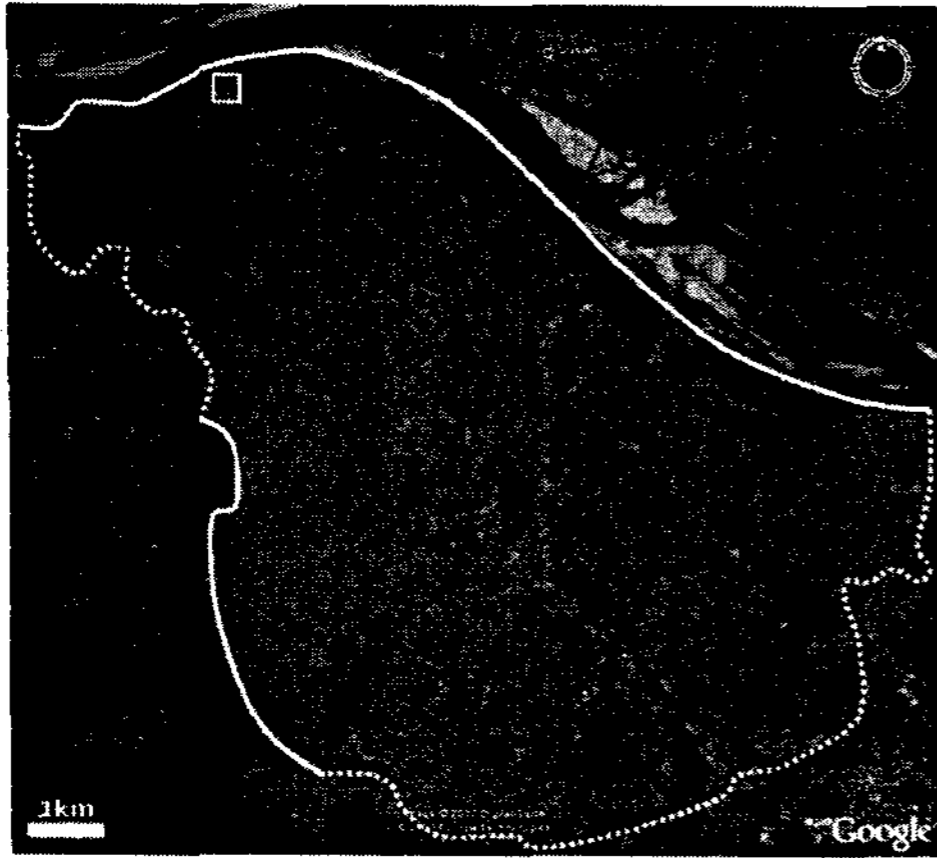


Fig. 2 Study area and boundary conditions

수리적 경계조건에 대해서는, Fig. 2의 실선에 해당하는 낙동강과 주남저수지에 대하여 일정 수두경계를 주었다. 그리고 점선은 no flow 경계를 주었는데, 도메인 서쪽에 해발고도 약 80m 가량의 구릉이 있고, 남동쪽 경계는 시설에서 10km 이상 멀리 떨어져 있어 양수에 의해서 영향을 받지 않기 때문이다. 지하 약 60 m 깊이에는 불투수성의 기반암을 고려하여 no flow 경계를 주었으며 지표에 대하여는 일 평균 강수량에 대해 이 지역의 지하수 함양률 19.68%⁸⁾를 고려하여 2차 경계를 주었다. 또한 지하 약 25 m 지점에서 PW1 부터 PW7까지 7개 관정에서의 양수량을 일 평균 하여 적용하였다.

열적 경계조건도 위와 비슷하다. Fig. 2의 실선에 해당하는 지표수에 대해서는 일정온도 값을 주었는데, 이 값은 이 지역에서 측정된 자료가 전무하므로 대기온도와 지표수 온도에 관한 경험식⁹⁾ (4)에 밀양댐 방류수의 월평균 기온으로부터 참고한 값을 적용하였다. 이를 통해 구한 지표수의 온도 분포는 Fig. 3과 같다. 마찬가지로 점선 경계에 대해서는 no heat transfer를 가정하였고, 바닥에 대해서는 18°C의 일정 온도를, 지표에 대해서는 일평균 온도를 주었다.

$$T_w = T_{min} + \frac{T_{max} - T_{min}}{1 + e^{\gamma(\mu - T_a)}} \quad (4)$$

위 식에서 T_w 는 지표수 온도, T_{max} , T_{min} 는 각각 지표수의 최고, 최저 온도이며, T_a 는 대기 온도이다. γ , μ 는 각각 그래프의 최대 기울기와 그 때의 온도를 의미한다.

사용된 열물성치는 table 2와 같다. 불포화대에 해당하는 지표 근처의 fine sand 층에서 함수량에 따라 식 (2), 식 (3)과 같이 열전도도와 열용량이 각각 달라지는 것을 반영하였다.

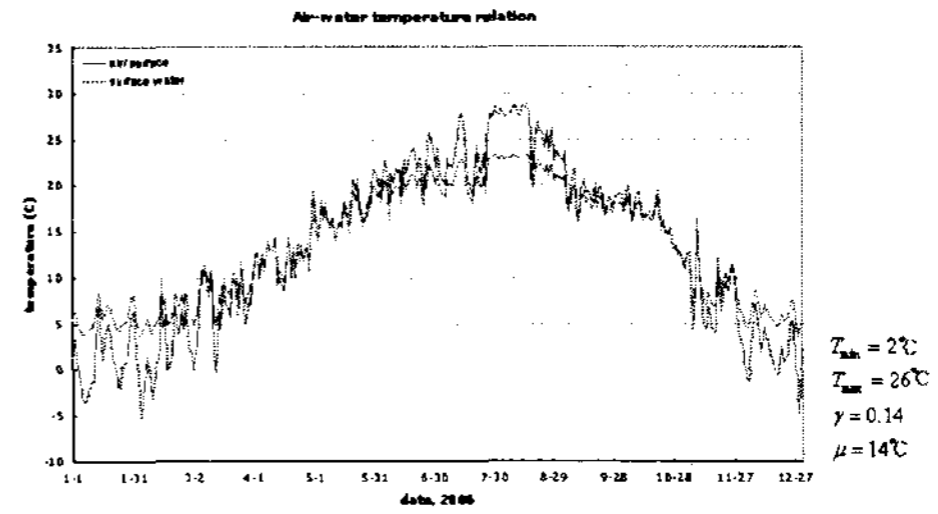


Fig. 3 Used air-water temperature relation

Layer	Solid density (kg/m ³)	Specific heat capacity (kJ/kg°C)	Thermal conductivity (W/m°C)
Fine sand	1.60 x 10 ³	1.17 x 10 ³ ~ 1.85 x 10 ³	1.94 ~ 3.27
Medium sand	1.60 x 10 ³	1.85 x 10 ³	3.27
Fine sand	1.60 x 10 ³	1.85 x 10 ³	3.27
Sandy gravel	1.60 x 10 ³	2.14 x 10 ³	2.65
Weathered zone	1.60 x 10 ³	1.56 x 10 ³	4.04
water	1.00 x 10 ³	4.18 x 10 ³	0.60
air	1.29	1.00	2.50 x 10 ⁻²

Table 2 Thickness and hydraulic conductivity of each layer from the core sample

3.3 수치실험 결과

Fig. 4는 위에서 언급한 수리적 조건을 이용하여 관측정 DS4에서 예상되는 수위 변화를 보여주고 있다. 전체적으로 최고 및 최저 수위는 거의 정확한 값을 나타내는데, 2003년 7월 중순 이후 집중 호우에 의해 급격히 올라간 수위가 떨어지는 경우에 대해서는 오차가 커지고 있음을 볼 수 있다. 계산된 결과는 측정된 결과와 비교하여 상관관계수 0.94, 평균 오차 0.54 m를 보였다.

Fig. 5는 수리적 조건과 함께 열적 조건을 반영하여 계산한 강변여과수 온도와 2006년 4월부터 6월까지의 강변여과수 온도를 측정된 값을 비교한 그래프이다. 7개 각 양수정에서 양수된 강변여과수는 각각 그 온도가 완전히 같지 않고 0.1-0.5°C 정도의 차이를 보이지만, 대신 정수장에서 냉난방을 위해 사용하는 강변여과수는 각 양수정에서 취수한 물을 한데 모은 것이므로, 정확한 비교를 위하여 각 양수정에서 예상되는 온도를 각 양수정의 양수량에 따라 가중 평균하였다. 강변여과수 온도의 측정값은 그 측정주기가 간헐적이고 불규칙하지만, 계산결과와 비교하였을 때 평균 오차가 약 0.3°C로 크지 않았다.

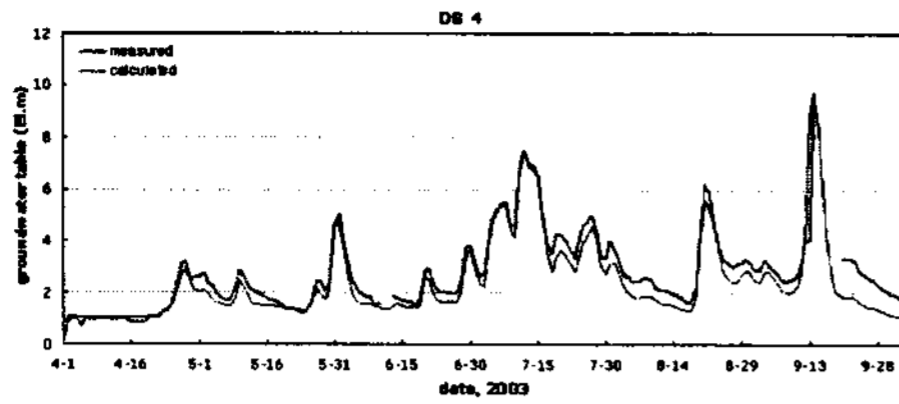


Fig. 4 Measured vs calculated water table at DS4

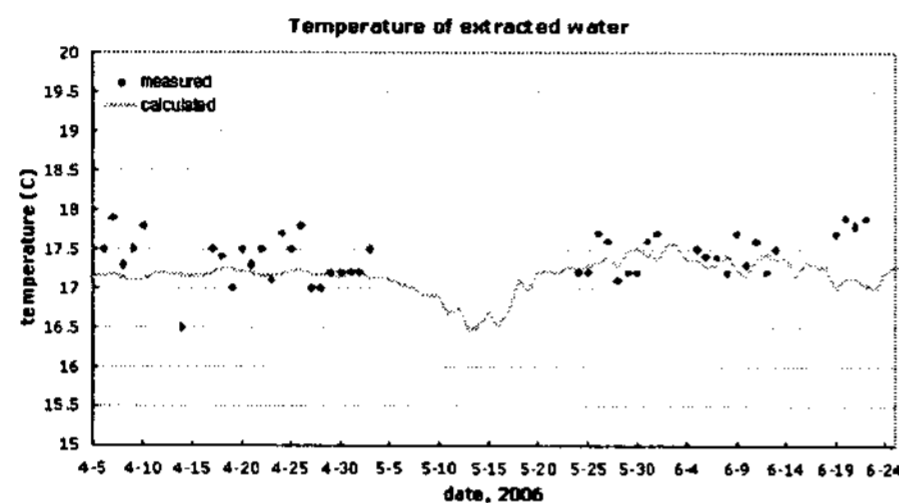


Fig. 5 Measured vs calculated temperature of riverbank filtration water

4. 결론

수치실험 결과와 측정 자료를 비교하였을 때 수위의 경우 상관계수 0.94, 평균 오차 0.54 m, 수온의 경우 0.3°C로, 수치실험에 사용한 수리적, 열적 물성치 및 경계조건은 창원시 대산면 대산 정수장 주변의 실제 환경을 비슷하게 모사하고 있는 것으로 판단되었다. 따라서 앞으로 이 조건들을 이용하여 대산 정수장 주변 층적 대수층과 양수된 물의 온도를 추정해도 큰 무리가 없을 것으로 보인다.

강변여과수의 온도는 강변여과수를 이용한 냉난방 시설의 효율을 결정하는 중요한 인자이다. 대산 정수장은 2008년부터 최대 양수 용량을 현재 10,000톤/일에서 60,000톤/일로 6배 증가시키려는 계획을 가지고 있다. 따라서 양수 위치나 양수량 변화에 의해 양수된 물의 온도가 얼마나 변할 것인지에 대한 정확한 예측이 시급하다. 앞으로의 연구에서는 이에 대한 수치실험이 행해질 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 에너지자원기술개발사업의 일환으로 에너지관리공단의 연구비지원과 교육인적자원부 두뇌한국21 (BK21) 사업에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] Bourg A.C., "Biogeochemical processes during the infiltration of river water into an alluvial aquifer, Environmental Science and Technology", Vol. 27, pp. 661-666, 1993.
- [2] Schmidt C.K., "Experiences with riverbank filtration and infiltration in Germany", DVGW - Water Technology Center (TZW), Germany, 2003.
- [3] Sheets R.A., "Lag times of bank filtration at a well field, Cincinnati, Ohio, USA", Journal of Hydrology, Vol. 266, pp. 162-174, 2002.
- [4] Su G.W., "Estimation of hydraulic conductivity in an alluvial system using temperature", Groundwater, Vol. 42, No. 6, pp. 890-901, 2004.
- [5] Kim H.-S., "Sustainable groundwater development and artificial recharge", Korea Water Resources Corporation Rep. KIWE-GG-04-1, 21C Frontier R&D Program of "Sustainable water resources research", 2004.
- [6] Brigham Young University, GMS Groundwater Modeling System, Version 5.0 Engineering computing graphics laboratory, Brigham Young University, Provo, Utah, 2005
- [7] Therrien, McLaren and Sudicky, HydroGeoSphere draft, Groundwater Simulation Group, 2005
- [8] Hamm S.-Y., "Groundwater flow modeling in a riverbank infiltration area, Daesan-myeon, Changwon-si", Economic and Environmental Geology, Vol. 38, No. 1, pp. 67-78, 2005
- [9] Mohseni O., "Nonlinear regression model for weekly stream temperatures" Water Resources Research, Vol. 34 No. 10, pp. 2685-2692, 1998.