

토조 및 수치모형을 이용한 개방형 지중 열교환 시스템 모의

이 성순¹⁾, 배 광옥²⁾, 이 강근³⁾

Simulation of Open-Loop Borehole Heat Exchanger System using Sand Tank Experiment and Numerical Model

Seong-sun Lee, Gwang-Ok Bae, Kang-Kun.Lee

Key words : Geothermal heat pump system (지열히트펌프시스템), open-loop borehole heat exchanger (개방형 시추공 열교환기), Sand tank model (토조모형)

Abstract : Understanding the thermohydraulic processes in the aquifer is necessary for a proper design of the aquifer thermal energy utilization system under given conditions. Experimental and numerical test were accomplished to evaluate the relationship between the geothermal heat exchanger operation and hydrogeological conditions in the open-loop geothermal system. Sand tank experiments were designed to investigate the open-loop geothermal system. Water injection and extraction system as open-loop borehole heat exchanger was applied to observe the temperature changes in time at injection well, extraction well and ambient groundwater. The thermohydraulic transfer for heat storage was simulated using FEFLOW for two cases of extraction and injection phase operation in sand tank model. As one case, the movement of the thermal plume was simulated with variable locations of injection and extraction well. As another case, the simulation was performed with fixed location of injection and extraction well. The simulation and experimental results showed that the temperature distribution depends highly on the injected water temperature and the length of injection time and the groundwater flow and pumping rate sensitively affect the heat transfer.

Nomenclature

η : porosity
 c_s, c_w : specific heat of solid and water, J/(kg-K)
 v_i : average linear groundwater velocity vector, m/s
 D_{ij} : hydrodynamic dispersion tensor, m²/s
 ρ_w, ρ_s : density of water and solid, g/cm³
 T, T_o : temperature and reference temperature, K
 λ : aquifer thermal conductivity, J/(m-s-k)
 Q_h : discharge rate, m³/d
 v_i/R : convective velocity of heat front, m/s
 $\lambda/c_s\rho_s$: heat conduction coefficient
 $R = c_s\rho_s/\eta c_w\rho_w$: thermal retardation coefficient

에너지 개발에 관한 연구가 활발히 수행되고 있는 가운데 관련 기술 및 제품들이 개발·보급되고 있는 실정이다.

지열펌프는 지표하 수십m 이내의 지각이나 수체(Water body)에 저장된 연중 일정한 지열을 추출하여 난방이 필요한 동절기에 난방용으로 이용하고, 반대로 여름철에는 실내 열을 추출하여 실내 냉방을 시킨 후 실내에서 추출한 폐열은 주변의 지중에 저장하여 겨울철에 다시 난방용으로 재이용하는 즉 폐열을 100%로 활용하는 신재생 냉난방장치이다¹⁾. 국내에서는 공공 건물 대체에

-
- 1) 서울대학교 지구환경과학부
E-mail : bbangson@nate.com
Tel : (02)873-3647 Fax : (02)873-3647
 - 2) 서울대학교 지구환경과학부
E-mail : gokbae@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8173 Fax : (02)873-3647
 - 3) 서울대학교 지구환경과학부
E-mail : kkleee@snu.ac.kr
Tel : (02)880-8161 Fax : (02)873-3647

1. 서론

현재 고유가에 따른 에너지 절약 및 신·재생

너지설비 의무화제도의 시행과 더불어 현실적으로 건축물에 용이하게 적용할 수 있는 지열 이용 열펌프(Ground-Source Heat Pump : 이하 GSHP) 냉난방 시스템에 대한 관심은 물론 보급도 크게 증가하고 있다²⁾. 특히, 천부 지중열 활용 냉난방 시스템은 지반의 상태 및 특성, 그 이용량에 따라 경제적 측면에서 효율성이 높은 신 대체 에너지로 주목받고 있다. 우리나라의 경우 지열펌프의 효율에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 지표하 천부에 분포된 지하수와 지중온도가 연중 거의 일정하다는 지열수문학적 특성이다. 또한 지하수가 풍부한 지역이 많아 개방형 열교환기 시스템을 구축하는데 매우 유리하며, 저비용으로 냉난방에 있어 고효율을 기대할 수 있다.

본 연구에서는 개회로형 지열펌프(open-loop geothermal heat pump) 시스템 가동과 관련 실제 현장과 같은 조건을 갖는 실내 수조를 제작하여 수리구배, 주입수 온도와 주입 및 추출 펌프율을 변화시켰을 경우 시간에 따른 심도 및 위치별 온도 변화 양상을 측정하는 방법 중 수리구배 변화에 따른 온도변화를 확인하였고, 이를 FEFLOW 모델⁶⁾을 통한 수치 시험 결과값과 비교 분석하여 결과적으로 시스템 가동에 있어 최적의 운영방식을 모의하고자 하였다.

2. 토조실험

2.1 실내토조실험 기구

실험 수조는 아크릴로 제작 되었으며, 실험 구간은 그림 1에서와 같이 102(x)×54(y)×60(z)cm 크기로서 두께가 46cm로 이루어진 층으로 구성되었다. 개방형 지열펌프 시스템을 묘사하기 위해 2개의 양수정과 주입정이 수조 좌, 우측에 70cm 거리를 두고 존재하며 각각의 관정은 총 길이가 40cm로 하부 5cm 윗부분부터 10cm의 스크린이 설치되어있다. 실험에 쓰인 모래는 강사(river sand)로써 채분석과 변수두 측정법을 이용하여 수리전도도값을 측정하였다.

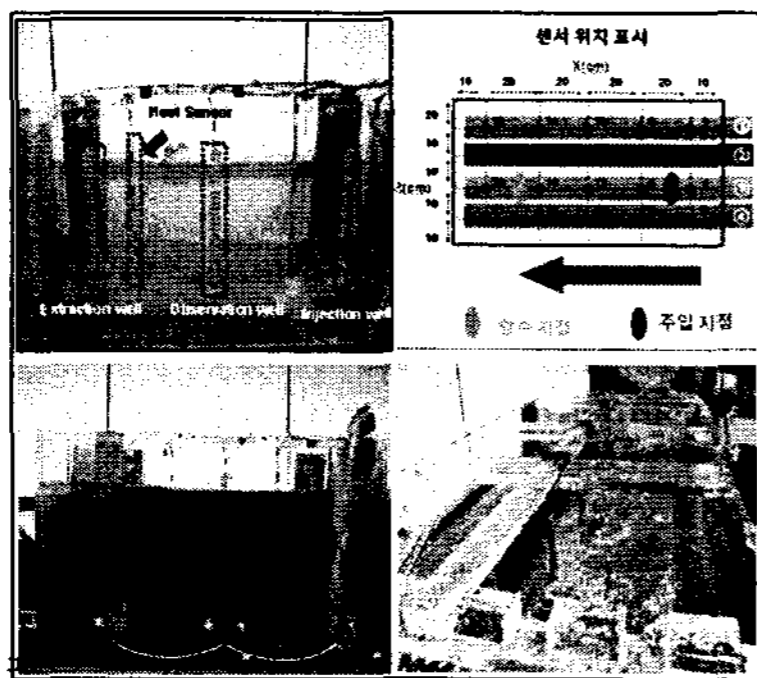


Fig. 1 Sand tank model and sensor position
토조실험은 Fig.2에 나온 것과 같이 좌우측 수위 조절기를 이용하여 일정한 수두구배가 형성된 후, 주입정에 일정량의 온수 혹은 냉수가 주입되면 반대편 양수정에서 동시에 일정량을 양수시키면서 각 관정 주변, 심도 및 위치별 온도를 온도 측정기를 통해 저장하는 방식으로 진행된다.

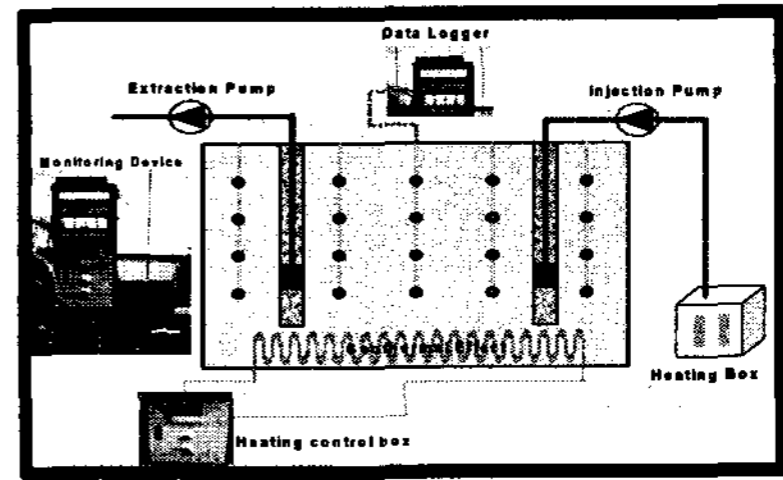


Fig. 2 Schematic diagram of sand tank experiment

2.2 토양 물성치 분석

Table 1은 토양시료의 열 전도도, 열 확산도, 공극률 등을 나타내었다. 토양시료는 함수비에 따른 열전도도, 열확산도, 비열을 3회에 걸쳐 측정하여 각각의 평균값을 Fig. 3에 그래프로 나타내었다.

Table 1 Soil property

Parameter	Unit	Measured value	
		#S	#s
porosity	1	0.387	0.356
Volumetric heat capacity	MJ/m ³ K	3.0	2.808
Thermal conductivity	W/mK	1.688	1.739
Thermal diffusivity	mm ² /s	0.563	0.597
Hydraulic conductivity	cm/sec	8.547 X 10 ⁻²	

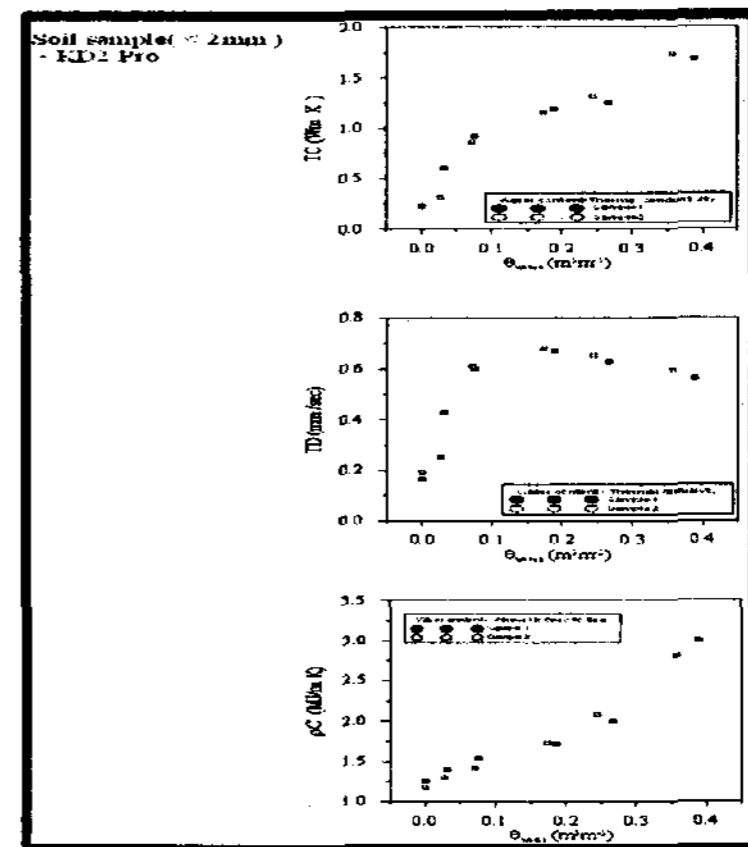


Fig. 3 Thermal conductivity, Thermal diffusivity and volumetric heat capacity according to water content

3. 지중 열거동 모델링 이론

지하수 개방형 열펌프 활용에 의한 지반내 열거동 해석을 위해서는 지하수의 부존 형태 및 유동 특성을 파악하는 것이 중요하다. 특히 열전도도와 열확산율은 매질의 함수율에 따라 크게 달라지며³⁾, 그에 따른 입력변수에 의하여 모델링 결과가 큰 차이를 나타낼 수 있다. 수치모델링에서 경계조건, 입력변수 및 지하수 열펌프 시스템의 운영방식에 따른 다양한 지중 열 거동 현상을 추정할 수 있다⁴⁾.

3.1 지반내 열거동

일반적인 지반내 열 거동은 지하수 유동에 의한 대류(convection), 매질을 통한 전도(conduction), 그리고 매질의 불균질성에 의한 분산(dispersion)을 통하여 전달된다. 포화된 매질에서의 열유량 또는 열유속(heat flux, $J/(m^2s)$)은 다음과 같다⁵⁾.

$$J_i = \eta c_u \rho_u v_i (T - T_o) - \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} - \eta c_u \rho_u D_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}$$

포화된 매질에서 외부나 내부의 열 유입과 유출이 없는 $\partial v_i / \partial x_i = 0$ 인 경우, 지중 열 거동 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{v_i}{R} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{\lambda}{c_s \rho_s} + \frac{D_i}{R} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right\} = \frac{Q_h}{\lambda c_u \rho_u}$$

3.2 모델 및 경계조건

지하수 열펌프 시스템 이용시 지중 열거동을 파악하기 위한 실내 토조실험 크기와 동일하게 모델을 설정하였다(Fig. 4,5). 시뮬레이션 구간은 $100(x) \times 0.56(y) \times 1.46(z)$ m 크기의 성질이 다른 세 개의 층으로 구성된 모델을 설정하였다. 이러한 설정은 실제 토조실험시 수조 상하부 및 측면의 열적 경계조건을 좀더 세분화시킨 것이다. 수리지질조건은 자유면대수층 형태로서 토양층의 공극률은 0.356으로 설정하였다. 입력변수는 Table. 2와 같다. 주입량과 양수량은 각각 $0.947cm^3/sec$ 와 $0.92cm^3/sec$ 로 설정하였다.

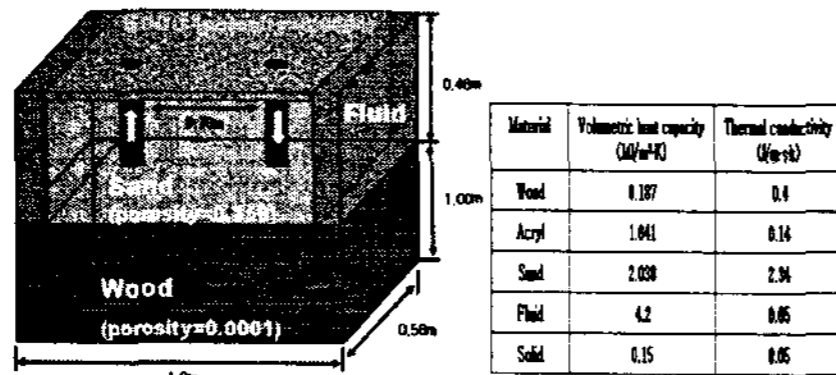


Fig. 4 A model of sand tank and heat capacities of material

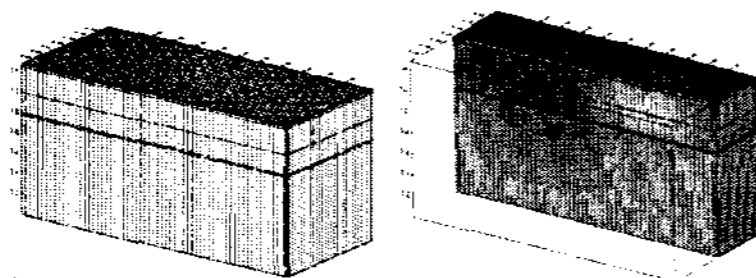


Fig. 5 Schematic diagram of finite element mesh

열 경계조건은 실제 실험에서 측정된 온도값을 대수층 및 주입수의 온도값으로 설정하였다. 이에 대수층의 초기 온도를 $25^{\circ}C$, 주입수의 온도는 $35\sim 36^{\circ}C$ 의 값을 설정하였다. 또한, 대기온도를 측정하여 수조외벽에 대해 대기온도 값을 설정하였다.

Table 2 Input parameter for the fluid and materials

parameter	Unit	value
x,y-hydraulic conductivity	m/s	3.3
z-hydraulic conductivity	m/s	0.33
storativity	1	
volumetric heat capacity(fluid)	$10^6 J/(m^3-K)$	4.2
volumetric heat capacity(sand)	$10^6 J/(m^3-K)$	2.038
heat conductivity(fluid)	$J/(m-s-K)$	0.65
heat conductivity(sand)	$J/(m-s-K)$	2.34
longitudinal dispersivity	m	0.005
transverse dispersivity	m	0.0005
source(+)/sink(-) of fluid	$J/(m^2-d)$	0
source(+)/sink(-) of solid	$J/(m^2-d)$	0
In-transfer rate	$J/(m-d-k)$	0
Out-transfer rate	$J/(m-d-k)$	0

4. 토조 및 수치모델 결과

실내 토조실험에서 주입수의 온도를 일정하게 유지하고 수리구배(0,0.01,0.025)를 변화시켜가면서 관정 주변의 온도를 살펴본 결과와 토조실험과 동일한 조건에서 수치계산을 통한 결과를 비교해 보았다.

4.1 토조시험 결과

Fig. 6은 실내 토조실험에서 지하수의 흐름이 없는 상태에서 주입정과 양수정에서의 온도를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 두가지 운영방식을 이용하여 실험을 실시하기 전, 총 12시간의 실험 시간동안의 각 관정에서의 온도를 측정해 보았다. 운영방식은 양수정에 온수를 6시간 주입 후 6시간의 주입중지를 행하였을 때 동일심도에서 각 관정 주변의 온도를 측정하였다.

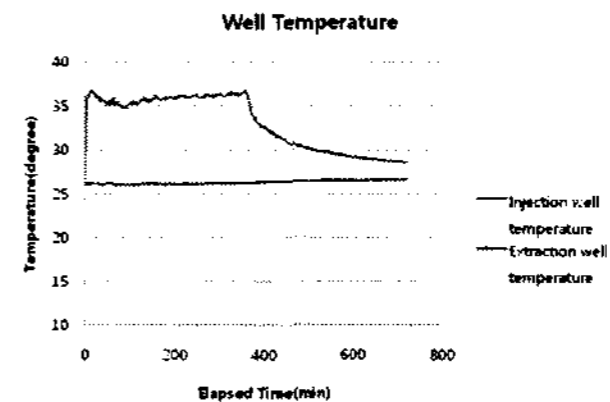


Fig. 6 Temperature variation in extraction and injection well

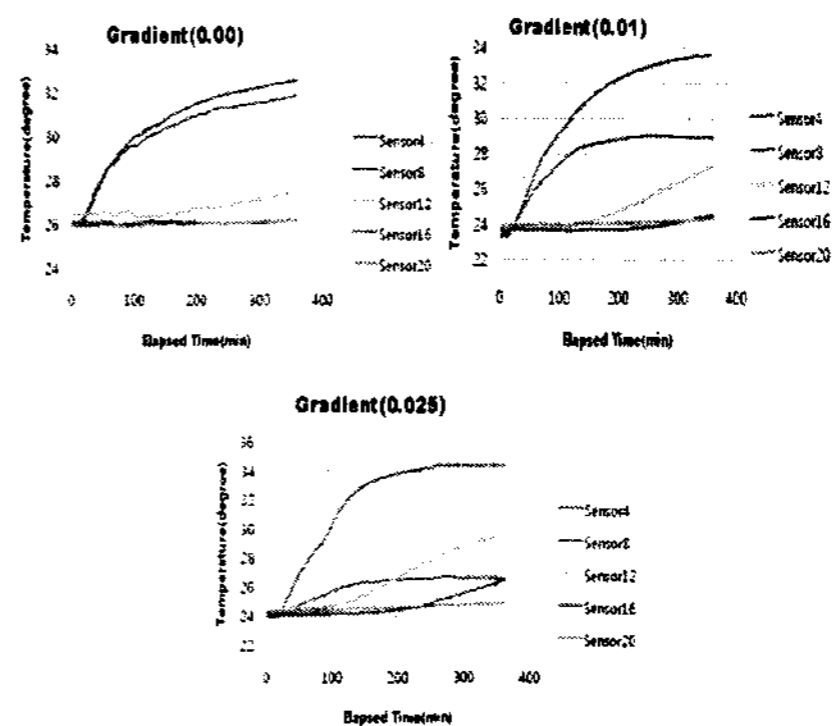


Fig. 7 Temperature variation according to hydraulic gradient (6hr)

Fig. 7 에서는 지하수 흐름이 없는 경우 주입 정 주변의 온도만 상승하고 양수정에서는 초기 온도에서 크게 벗어나지 않는 온도변화를 보였다. 하지만 흐름이 형성되고 수두구배가 커질수록 열운이 전도뿐만 아니라 지하수 흐름에 의해 양수 정 근처까지 이동하는 것으로 나타났다. 지하수 흐름이 없는 경우 양수정의 온도변화는 0.52°C 이지만 지하수 흐름이 형성될 경우 최대 2.76°C 까지 상승하는 것으로 나타났다. 또한 Fig. 8에서는 운영중지 후 지하수 흐름이 있는 경우 주입정 주변의 온도는 초기 온도로 돌아가는 경향을 보이지만 양수정에 가까워 질수록 온도가 초기 온도보다 증가하는 것으로 나타났다. 이는 주입된 열운이 흐름의 영향을 받아 이동하고 있음을 확인할 수 있었다.

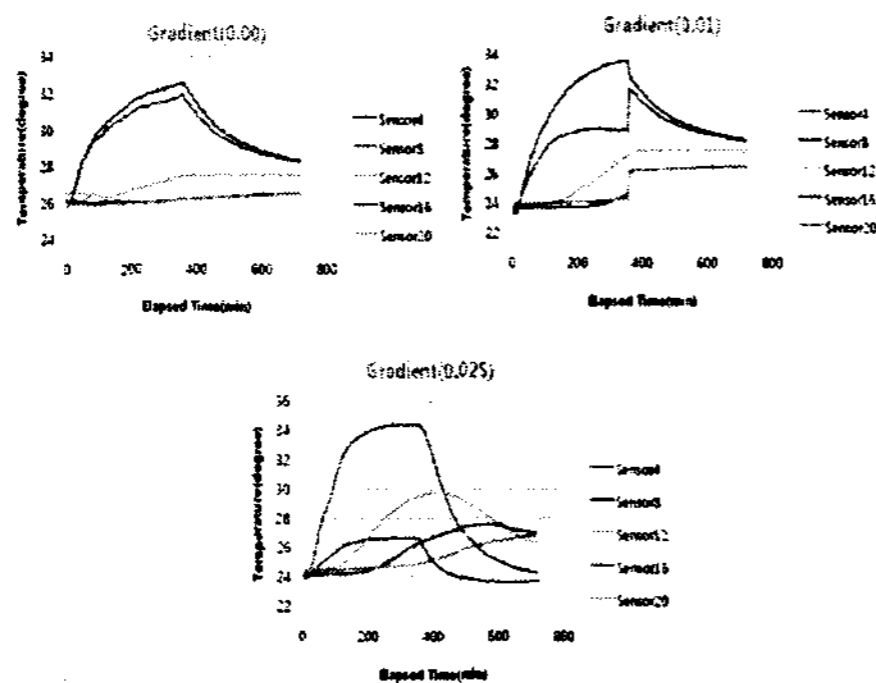


Fig. 8 Temperature variation according to hydraulic gradient (12hr)

4.2 수치모델 결과

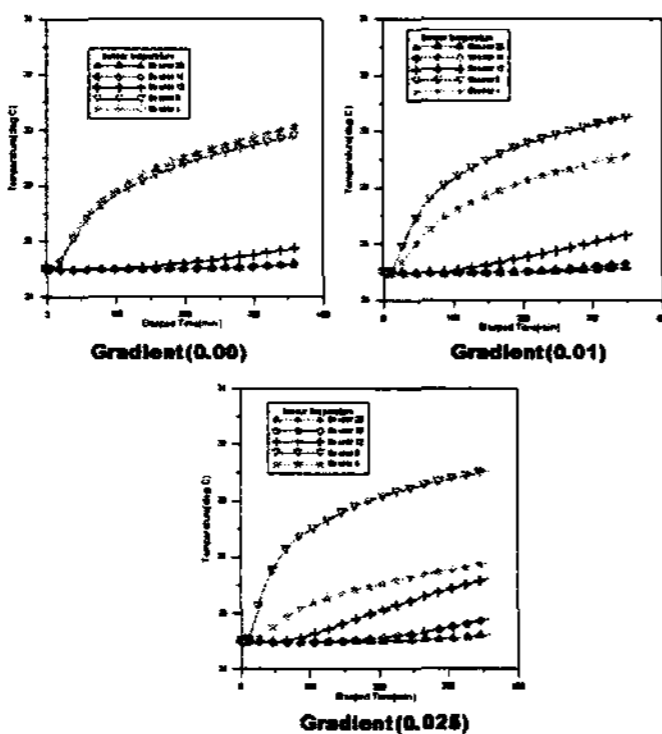


Fig. 9 Temperature variation according to hydraulic gradient (6hr)

실내 토조실험과 동일한 조건에서 수치모델을 시행한 결과 수리구배에 따라 각각 포인트별 온도분포가 실제 실험 결과와 유사한 경향을 보여주지만 전체적인 온도변화에서는 실제실험과는 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 의 온도차이를 보였다. 또한 수리구배가 0.025인 경우 양수정 근처의 온도값이 실제 실험 측정값보다 작게 계산된 것으로 보아 열운의 이동거리가 작아진 것으로 파악된다. 이는 경계조건과 입력변수 설정과정에서 나온 결과라 판단된다.

5. 결론

지하수 열펌프 시스템 운영에 따른 두 관정에 서의 열 변화를 토조 및 수치모형을 통해 시험한 결과 지하수 흐름 유무에 따라 열운의 이동 양상이 다른 것을 확인할 수 있었다. 이는 지하수 이용 개방형 지열 펌프 및 축열방식 시스템 운영시 지하수 흐름에 따라 적절한 운영방식을 제시하는데 참고자료로 활용할 수 있다. 이를 위해서는 좀더 많은 수리지질학적 조건하에서 실내 토조 시험을 진행한 뒤 경계조건과 입력변수 설정에 있어 좀더 세밀한 수정을 거친 수치모델과의 비교분석이 필요하며, 이를 이용한 운영방식 설계도 가능할 것이다.

후 기

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

References

- [1] 김영준, 최재상, 강용태, 2005, "지중열교환기의 지중열전도도 성능분석", 대한설비공학, pp 161-166
- [2] 신우철, 백남춘, 김옥중, 고득용, 1992, "지열 이용 히트펌프 시스템의 열성능 해석" 26(2), pp 95-101
- [3] 한정상, 한규상, 한혁상, 한찬, 2004, "대체에너지인 천부 지중열을 이용한 지열펌프 냉난방 시스템", 한림원
- [4] 심병완, 2005, "대수층 축열 에너지 활용 시스템 모델의 설계인자 추정을 위한 시뮬레이션", 지하수토양, Vol.10, No.4, pp 54-61
- [5] Molson, J.W., Frind, E.O., and C.D. Palmer, 1992, Thermal energy storage in an unconfined aquifer: 2. Model development, validation and application, Water Resources Research, Vol. 28, pp 2857-2867
- [6] Wasy software, 2003, FEFLOW white papers, Vol.1, pp 366