

지중 열교환기 성능 분석을 위한 지반 열물성 조사

심 병원¹⁾, 송 윤호²⁾, 김 형찬³⁾, 조 병욱⁴⁾, 박 덕원⁵⁾, 임 도형⁶⁾, 이 영민⁷⁾

Investigation of ground thermal characteristics for performance analysis of borehole heat exchanger

Byoung Ohan Shim, Yoonho Song, Hyoung Chan Kim, Byoung Wook Cho, Deok-won Park, Dohyung Im, Youngmin Lee

Key words: heat transfer(열전달), ground source heat pump(지열 열펌프), thermal conductivity(열전도도), geothermal gradient(지온경사)

Abstract: A detailed geothermal characteristics survey with numerical simulations of the heat transfer in a site for ground source heat pump system is necessary for deploying a shallow geothermal utilization system. Density, specific heat, thermal diffusivity, and thermal conductivity are measured on 91 core samples from a 300 m deep borehole in KIGAM(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources). The heat flow is estimated from the thermal gradient and average thermal conductivity and the correlation between fracture system and hydraulic conductivity is analyzed. From the obtained ground information of the study site the performance of the ground heat pump system can be analyzed with some detailed numerical simulations for seasonal heat pump operation skill and optimal system design techniques.

1. 서론

지열자원은 지속가능한 청정 재생에너지 자원임에도 불구하고 국내에서는 최근에야 지열에너지의 직접 활용(direct-use)을 위한 지반내 열거동 분야의 체계적인 연구가 시작되었다[1]. 특히 국내의 경우, 토양층의 두께가 대부분 10 m 이내이며 지하수면의 심도가 얕고, 지질 및 지질구조가 다양하며 미국 등지에 비해 열적 특성이 많이 다르기 때문에, 우리나라 특성에 맞는 천부 지중열 시스템의 활용 기준(예: 지하수의 유무 등에 따른 open-loop 또는 closed-loop heat pump 시스템)이 요구된다. 따라서 이에 대한 체계적인 접근이 필요하며, 지중 열거동 해석이 시스템의 효율성을 추정하는데 필수적이다[2].

한국지질자원연구원내 지진연구동의 냉난방 시설을 위하여 closed-loop 형태의 지중 열교환 시스템이 설치되었다. 추후 장기적으로 운영될 지중열교환 시스템에 대한 지중 열거동 모니터링 및 모델링을 실시하기 위하여 시추 코어 획득 및 분석, 지반의 열물성, 수리시험, 각종 로깅을 통하여 열거동 해석을 위한 각종 기초 자료들을 획득 및 분석하였다(Fig. 1).

- 1) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
E-mail : boshim@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3055 Fax : (042)861-9721
- 2) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
E-mail : song@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3175 Fax : (042)861-9721
- 3) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
E-mail : khc@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3055 Fax : (042)861-9721
- 4) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
E-mail : cbw@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3083 Fax : (042)861-9721
- 5) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
E-mail : pdw@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3123 Fax : (042)861-9721
- 6) 부경대학교 환경탐사공학과
E-mail : s0034@harmail.net
Tel : (042)868-3055 Fax : (042)861-9721
- 7) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부,
서울대학교 지질환경연구소
E-mail : ylee@kis.kigam.re.kr
Tel : (019)208-3889 Fax : (042)861-9721

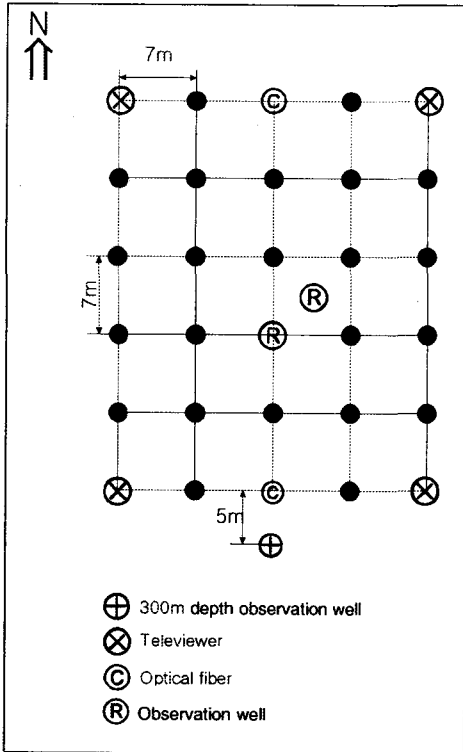


Fig. 1 Schematic layout of the boreholes for double U-tube heat exchanger and observation boreholes in KIGAM.

2. 방법

Double U-tube 방식의 지중 열교환기 시추공 및 연구용 관측공과 온도 모니터링 시설설치를 위하여 연구원내 직경 165 mm 지름의 200 m 심도의 28개의 공을 6 x 5 배열로 설치하였으며, 이 가운데 연구용 관측공 300 m 1개(지름 97.5 mm), 200 m 2개(160 mm)를 굴착하였다(Fig. 1). 관측공의 배열은 각 층별로 건물의 냉난방 부하를 고려하여 설계가 이루어 졌다. 지중 열교환기 시추공 2개소에서는 주입수와 유출수의 온도측정을 위해 U-tube 표면에 광케이블 센서(optic cable censor)를 설치하였으며, 이 중 하나에는 double U-tube 연결 배관에 single U-tube 모드 전환 시스템 설치하여 두 방식간의 차이를 비교할 수 있는 장치를 설정하였다.

3. 결과

3.1 지열 모니터링

300 m 관측공에서는 지온경사의 변화를 장기적으로 추정하기 위하여 광케이블 센서에 의한 주기적인 온도 측정을 실시하였다. 또한 시추공 부근의 두 지점에서 토양층 온도 변화 모니터링을 실시하여 토양층내 온도 변화를 1개월간 조사하였다.

Fig. 2에서 측정 시간별 온도-심도 곡선이 서로 다르게 나타나는 것은 시추로 인한 지하의 교란 및 지하수 대류 등에 의해 생긴 것으로 생각되며, 0-20 m 구간은 연중 온도 변화에 대한 영향에 의해 온도 변화가 심하게 나타난다. 그리고 심도별 고주파 방사는 측정기기의 잡음도 포함되어 있는 것으로 판단된다.

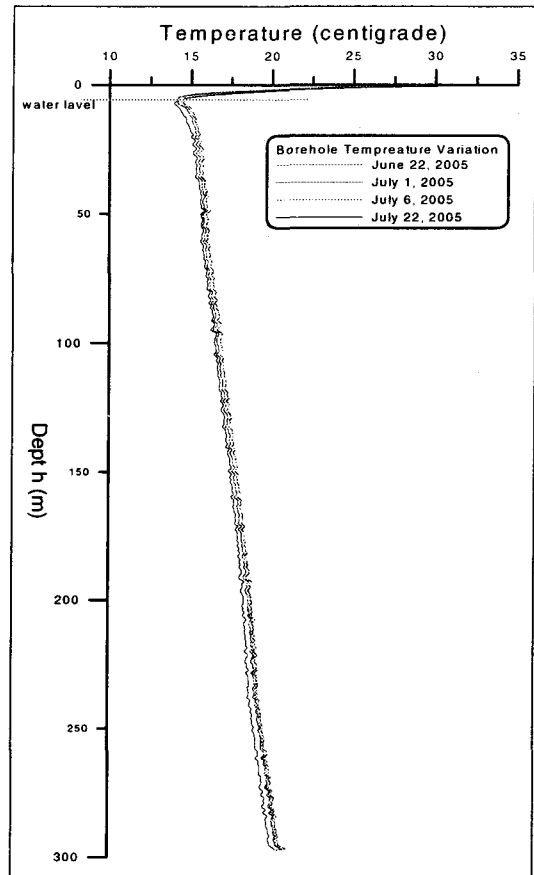


Fig. 2 Temperature versus depth profile in the 300 m deep observation borehole by optic cable sensor.

3.2 지열류량 측정

300 m 관측공 코아에서 획득한 61개 샘플에서 밀도, 비열, 열확산율, 열전도도를 측정하였다(Fig. 3). 심도별 샘플의 밀도(산술평균: 2.67 g/cm^3) 및 비열(산술평균: 0.82 J/g-K) 측정과 열확산율(산술평균: $1.37 \text{ mm}^2/\text{sec}$)을 측정한 결과로서 열전도도(산술평균: 2.98 W/m-K)를 산출하였다. 그리고 시추공내 지온경사 및 열전도도를 측정하여 계산된 지열류량은 59.67 mW/m^2 이며, 평균지온경사(20°C/km)는 선형 회귀(regression)선을 적용하였다(Fig. 4).

3.3 불연속면 해석

지중 열교환기의 효율은 지하수에 많은 영향을 받기 때문에 지하수의 유동 특성을 파악하는 것이 시스템의 효율성을 예측하는데 중요하다[3]. 지하수는 암반내 불연속면을 따라 유동하므로 투수성이 높은 구간을 파악하기 위하여 본 연

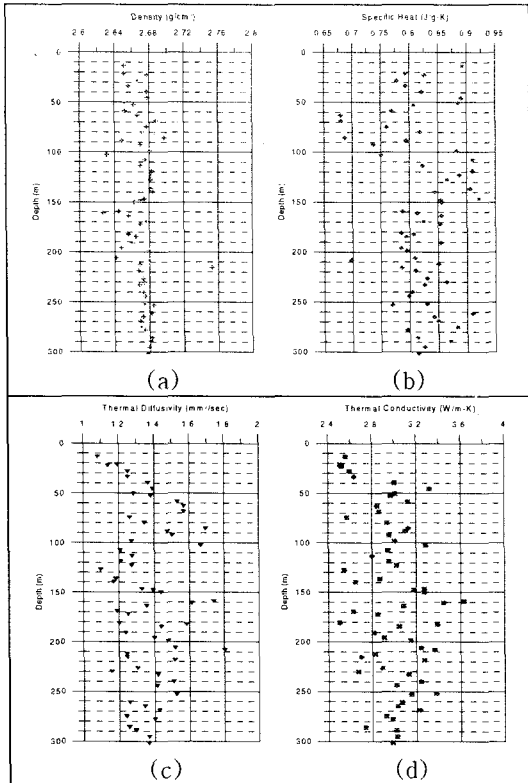


Fig. 3 Density(a), specific heat(b), thermal diffusivity(c), thermal conductivity(d) distributions measured from 91 samples in the 300 m deep observation borehole. $\alpha = K/(\rho \cdot c)$, α : thermal diffusivity, K : thermal conductivity, ρ : density, c : specific heat.

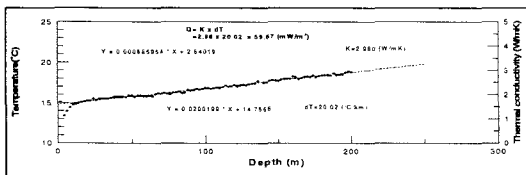


Fig. 4 Heat flux calculation from the geothermal gradient with average hydraulic conductivity.

구서는 Kutzner[4]과 Houlbsy[5]에 따른 수압시험을 실시하였다. 더블 패커에서 패커사이의 간격을 3 m로 설정하였다. 수압시험 결과에 대한 해석 방법에는 정상류와 부정류의 방법이 있으나 상부에서 28회의 예비 수압시험에서 주입률이 시간에 따라 거의 일정하였으므로 정상류의 결과에 대하여 정상류 해석법으로 조사구간별의 수리전도도를 계산하였다. 정상류 해석법에 의한 매질의 수리전도도는 근본적으로 균질한 등방성의 다공질매질에서의 수직 시험구간내의 흐름을 층류(laminar flow)라 가정한다. 본 연구에서는 일반적으로 이용되는 Moya[6]에 의한 식을 이용하여 수리전도도를 산출하였다.

정상류 해석법에 의한 수리전도도는 균질 등방성 매질에 수직인 시험공에서 층류(laminar flow)가 일어날 때를 가정하고 있으며 현재까지 이용되고 있는 Moya의 공식은 시험공 주변에서 지하수의 흐름 형태를 시험공의 축에 대칭을 이루는 타원형 유동체로 가정하여 유도한 것으로서 다음과 같다.

$$K = \frac{Q_{in}}{L \cdot \Delta P} \left[\frac{1}{2 \cdot \pi} \left(1 + \ln \left(\frac{L}{2d} \right) \right) \right]$$

여기서, K 는 수리전도도, Q_{in} 는 주입률, L 은 주입구간, ΔP 는 유효 주입압, 그리고 d 는 시추공 지름이다.

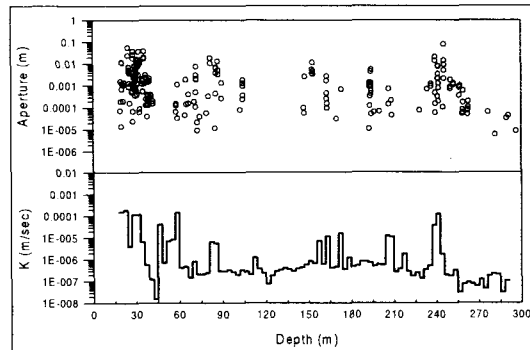


Fig. 5 Aperture size and hydraulic conductivity distributions with depth at the 300 m deep observation borehole.

Fig. 5는 시추공내 심도별 수리전도도(K) 및 균열틈 크기(aperture)를 나타낸 것으로서 심도별로 3 m 구간 단위로 91회 수압시험에서 측정된 수리전도도와 텔레뷰어에 나타난 균열틈의 분포를 비교하였다.

3차원 텔레뷰어 이미지 분석에서는 총 767개의 불연속면 중 549개의 열린 절리를 측정하였으며(Fig. 6), 대표적인 3개의 절리군이 나타났다. 회귀분석결과 구간별로 절리틈(aperture)의 합과 수리전도도 및 주입량은 결정계수가 매우 낮게 나타남($R^2=0.106, 0.115$), 구간별 절리의 갯수와 수리전도도도 낮은 상관성을 보였다($R^2=0.165$).

4. 결론

300 m 관측공내 61 개 샘플의 밀도, 비열, 열확산율을 이용하여 열전도도를 측정하였으며, 평균 지온경사는 선형 회귀(regression)선을 적용하였다. 이들 자료들로부터 계산된 지열류량은 $59.67 \text{ (mW/m}^2\text{)}$ 이다. 심도별 수압시험 및 텔레뷰어 검층에 따른 균열의 투수성은 지표에서 50 m 심도까지 다소 높은 투수성을 가진 불연속면들이 많이 있으며, 하부에는 250 m 부근에 높은 수리전도도 분포를 보이고 있다.

측정된 지열류량을 경계조건으로 이용한 3차원 온도 분포 시뮬레이션을 통하여 정확한 기반내 열거동 해석이 가능하며, 각 심도별 수리전도도를 이용한 지하수 유동의 영향을 추정할 수 있다.

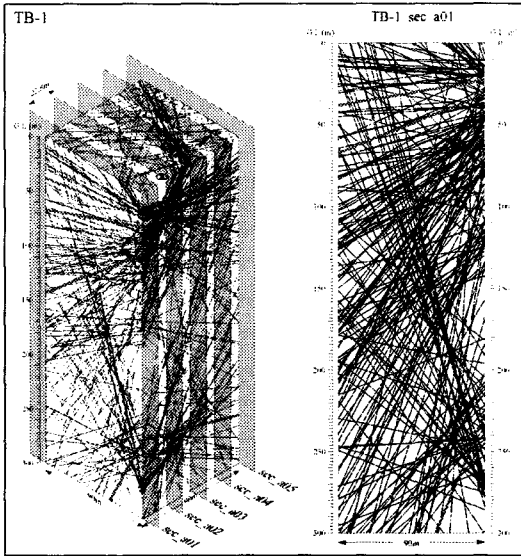


Fig. 6. Three-dimensional televiewer fracture image analysis at the 300 m deep observation borehole.

그리고 장기적인 지중 열교환기 활용에 의한 시스템의 효율성을 수치모델링을 통하여 검증할 수 있으며, 다른 지질 특성을 가진 지중열교환기 시스템의 효율성 검증에도 적용될 수 있다. 또한 추후 double U-tube 및 single U-tube 모드에서의 지중열 교환 성능 비교를 통하여 지반의 열물성에 따른 최적 설계 기법을 개발하는데 응용될 수 있다. 앞으로 이러한 모든 작업을 수행하면서, 단계별 연구결과들이 지속적으로 발표될 것이다.

References

- [1] 송운호, 김형찬, 심병완, 이창범, 박덕원, 이성근, 이종철, 이병태, 박인화, 이태종, 이철우, 문상호, 김연기, 이병대, 임현철, 2004, 지열자원 부존특성 규명 및 활용기반기술 연구, 한국지질자원연구원 연구보고서, KR-04(연차)-08, 국무총리실, p. 123.
- [2] 송운호, 김형찬, 이철우, 황세호, 조병욱, 심병완, 안은영, 2005, 국내 지하 열 자원 활용기술 개발의 중장기 계획, 한국지질자원연구원 연구보고서, 2004-R-NC02-P-01-0-000, 산업자원부, p. 104.
- [3] 심병완, 대수층 축열 에너지 (ATES) 시스템에서 지하수 유동 영향에 의한 지반내 온도 분포 예측 시뮬레이션, 한국지열에너지학회 논문집, 1권 1호, 1-8 p.
- [4] Kutzner C., 1996, Grouting of rock and soil, A.A Balkema, Rotterdam, 282 p.
- [5] Houslsby, A. C., 1990, Construction and design of cement grouting, John Wiley & Sons, Inc., New York, 464 p.
- [6] Moye, D.G., 1967, Drilling for foundation exploration, Civil Engineering Transaction, Institute of Engineering, Australia, pp.95-100.