지하수 부존지역에서의 토질 및 암석 시료와 현장 열응답시험의 열전도도 비교

김진성¹ · 송성호¹ · 정교철^{2*}

¹한국농어촌공사 농어촌연구원, ²안동대학교 지구환경과학과

Thermal Conductivity from an in-situ Thermal Response Test Compared with Soil and Rock Specimens under Groundwater-bearing Conditions

Jin-Sung Kim¹, Sung-Ho Song¹, and Gyo-Cheol Jeong^{2*}

¹Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

²Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

국내에서 열물성에 관한 연구는 지역별, 암종별 열물성 파악을 위주로 진행되었으나, 지열난방시스템 설계 시에 실시하는 TRT (thermal response test)의 열전도도와 차이가 크게 나타남에 따라 본 연구에서는 지하수 부존량이 풍부한 지역에서 시료를 통한 열전도도와 TRT를 통한 열전도도를 비교하였다. 토양 시료의 열전도도는 1.32 W/m-K, 암석 시료의 열전도도는 2.88 W/m-K로 나타났으며, TRT로 측정된 열전도도는 3.13 W/m-K로 나타나 암석 시료보다 약 10% 정도 높게 나타났다. 연구지역은 지하수가 풍부하고 0.01의 수리경사를 가지고 있어 이 차이는 지하수 흐름에 의한 영향이라고 판단된다. 라인소스(line source) 이론에 따르면 TRT는 지반의 순수한 열전도도를 산정하는 것이 목적이므로, 국내 SCW (standing column well)형의 TRT는 라인소스 이론에 적합하지 않으며 지열난방시스템 설계 시에는 시료를 통한 열전도도값을 사용하는 것이 타당하다고 판단된다.

주요어 : 지열에너지, 지열난방시스템, 열전도도, 열응답시험, SCW형, 지하수

Studies of the thermal properties of various rock types obtained from several locations in Korea have revealed significant differences in thermal conductivities in the thermal response test (TRT), which has been applied to the design of a ground-source heat pump system. In the present study, we aimed to compare the thermal conductivities of the samples with those obtained by TRT. The thermal conductivities of soil and rock samples were 1.32 W/m-K and 2.88 W/m-K, respectively. In comparison, the measured TRT value for thermal conductivity was 3.13 W/m-K, which is 10% higher than that of the rock samples. We consider that this difference may be due to groundwater flow because abundant groundwater is present in the study area and has a hydraulic conductivity of 0.01. It is natural to consider that the object of TRT is to calculate the original thermal conductivity of the ground, following the line source theory. Therefore, we conclude that the TRT applied to a domestic standing column type well is not suitable for a line source theory. To solve these problems, values of thermal conductivity measured directly from samples should be used in the design of ground-source heat pump systems.

Key words : geothermal energy, ground-source heat pump system, thermal conductivity, thermal response test, SCW type, groundwater

*Corresponding author: jeong@andong.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

국제 에너지 기구(international energy agency, IEA)에 따르면, 2010년 세계 에너지 수요 중 화석연료인 석탄(27%), 석유(32%), LNG (22%)가 차지하는 비율이 81%에 이르며, 우리나라는 2010년 에너지 소비순위가 250.01 MTOE (mega ton of oil equivalent)로서 세계 7위에 해당한다. 또한, 2011년 우리나라의 에너지 수입 의존도는 총에너지 공급량의 96.4%로서, 1,725 억\$에 이른다(KEMCO, 2013).

이러한 상황에서 최근 유류 가격의 상승으로 신재생 에너지에 대한 관심이 증가하고 있으며, 이 중 지열에너지는 냉난방이 가능한 청정에너지로 알려져 있다. 국내에서 지열에너지는 초기에 건물 등에 활용되기 시작하여 최근 수요가 증가하고 있는 시설원예에도 적용되고 있으나 대부분 수직밀폐형 방식으로 시공되고 있다. 그러나, 지하수가 풍부한 지역에서는 지하수를 직접 이용하는 방식인 수직개방형의 효율이 더 높은 것으로 제시된 바 있다(Hahn et al., 2006; Kim et al., 2006; Park et al., 2006; Kim and Kong, 2011).

지열냉난방시스템은 열교환 방식에 따라 지중에 설치된 배관 내에서 순환수를 통해서 열교환을 하는 밀폐형(closed loop type)과 지하수를 양수하여 직접 열교환을 하는 개방형(open type)으로 나눌 수 있는데, 이 중 개방형은 시추공과 지하수 이용 방식에 따라 단일관정형(single well), 스탠딩 컬럼 웰형(standing column well, SCW), 복수관정형(doublet or double well)으로 구분된다. SCW형과 복수관정형은 지하수를 순환시키면서 지열을 이용하고, 단일관정형은 지하수의 열을 이용한 뒤 버리기 때문에 개방형에서 상대적으로 지하수가 큰 비중을 차지한다.

또한, 암석의 열전도도는 천부 지열을 이용하는 지중 열교환기, 지열 히트펌프 설계 및 운영에 직접적으로 영향을 미치는 인자이므로, 지중열을 이용한 냉난방 시스템의 설계 이전에 대상 지역의 열전도도를 파악하는 것이 필수적이다(Lee, 2007). 이러한 지반의 열전도도 산정 방법은 1) 암종별로 알려진 대표값을 이용하는 방법, 2) 코어 시료를 채취하여 측정하는 방법, 3) 지중 온도 관측 자료를 해석하여 구하는 방법, 4) 열응답시험(thermal response test, TRT)을 이용한 원위치 산정법 등으로 구분된다(Cha et al., 2008). 이 중에서 TRT는 지중열교환기 설계 시에 지반의 열전도도를 산출하기 위해 현장에서 측정하는 방법으로, 산출된 열전도도는 지

중열교환기 주변의 암석과 지하수, 시추공 내의 그라우팅 등의 열전도도를 모두 반영하는 유효열전도도(effective thermal conductivity)이다(Lee, 2007).

TRT는 정부의 지원을 받는 사업과 공공기관에서 발주하는 사업 중 냉방용량 50 RT (175 kW) 이상에 대해 실시하도록 하고 있으며, 일부 공기업에서 수행하는 시설원에 에너지이용 효율화 사업에서도 설계 시 TRT 시험 성적서에 표기된 열전도도값을 적용해서 설계를 하고 있다. 그러나, 현장에서 TRT로 구한 평균 열전도도가 동일 지역의 암종에서도 많은 차이가 나타남에 따라 지열시스템 설계 시 과다 설계 혹은 축소 설계로 이어져 예산의 낭비나 지열시스템의 효율을 떨어뜨리는 원인이 되고 있다.

본 연구에서는 수직개방형 지열시스템에서 시료를 채취하여 실내에서 측정하는 방법과 TRT를 이용해 원위치 산정법으로 구한 열전도도값을 비교하여, 지하수 부존 지역에서 이용하는 열전도도값의 유용성에 대하여 검토하였다.

연구지역

간척지는 육지에서 해안의 가장 하류에 위치하고 있다. 이러한 해안 지역에는 일반적으로 유출 지하수가 존재한다고 알려져 있으며, 바다로 유입되는 담수의 많은 부분을 해안 유출 지하수가 차지하고 있는 것으로 보고되고 있다(Kim and Kim, 2001; Lee et al, 2013). 따라서, 본 연구에서는 유출 지하수로 인해 지하수가 풍부한 간척지를 연구지역으로 선정하였다.

지형 및 지질

본 연구 지역은 한반도의 서남쪽에 위치하며, 좌우로 형성된 산악지역으로 둘러싸여 있고 수계는 바다를 향한 소유역을 이루고 있어 해안을 향한 유출지하수가 많은 지역적 특성이 있다. 연구를 위한 관측공은 과거에는 조간대였으나, 현재는 방조제 준공으로 인하여 건조한 대지로 바뀐 해안선 인접 지역에 설치하여 연구에 활용하였다(Fig. 1). 연구 지역의 지질은 신생대 제4기 충적층, 백악기의 산성 화산암류, 사암, 이암 및 유라기 화강암으로 구성되어 있으며 중생대 화강암이 주를 이루고 있다(KIGAM, 1997). 연구 지역 상부에서는 충적층이 나타나고, 하부에는 기반암인 화강암이 분포하고 있다(Fig. 2).

Fig. 1. Location map of the study area. Five boreholes were installed in the study area, spaced 30 m apart.

Fig. 2. Geological map of the study area (KIGAM, 1997).

시추자료 분석

암석은 종류와 구성광물에 따라 열물성에 차이가 있으므로, 연구지역의 지질분포나 수리지질 특성은 중요한 자료이다(Cha et al., 2007). 이러한 분석을 목적으로 설치한 관측공은 지하수 흐름 방향 및 수두경사를 파악하기 위하여 가로, 세로 방향으로 각각 30 m의 간격을 두고 5 공의 관측공을 설치하였다. BH-1~BH-4호공의 심도는 23.0~77.0 m이고 케이싱을 설치하였으며, BH-5호공에서는 시추 시 열물성 조사를 위하여 토양 및 암석 시료를 채취하였으며 케이싱을 설치하지 않고 PVC 파이프만 설치하였다.

시추 결과, 상부는 실트질 모래층(두께 13.8~20.0 m)이 우세하며, 하부로는 화강암으로 구성된 풍화암층(두께 0~7.4 m) 및 연암층이 나타난다(Fig. 3).

수리지질학적 특성

해안으로 유출되는 해저용출수는 하천수의 5~6% 정

Fig. 3. Five boreholes installed in the study area. Depths are 23~86.5 m. Boreholes BH-1 to BH-4 are steel cased, with an inner diameter of 200 mm. The inner diameter of BH-5 is 75 mm.

도로 분석되며(Zektser and Loaicaga, 1993), 해안에는 용수공급 시설의 부족으로 내륙지역에 비해 상대적으로 지하수 이용이 많기 때문에 지하수 이용 증가에 따른

Fig. 4. Variation of groundwater level with precipitation in the study area, for boreholes (a) BH-1, (b) BH-2, (c) BH-3, (d) BH-4.

지하수위 저하로 지하수 대수층을 따라 해수가 침투하는 현상이 나타난다(Song, 2007). 따라서, 해안대수층에서는 지역에 따라 편차는 있으나, 담수나 염수 성분을 가진 지하수가 풍부하다고 추정할 수 있다. 이에 따라 연구지역에 대한 수리지질학적 특성을 파악하기 위하여 장기간의 지하수위 변화 모니터링과 장기 대수성 시험을 통한 대수층의 투수량계수(transmissivity), 저류계수(storativity), 수리전도도(hydraulic conductivity)를 산정하였다.

지하수위 모니터링

일반적으로 토양이나 암석에 존재하는 공극(pore)은 공기나 물로 채워진다. 공기의 열전도도는 약 0.024 W/

m-K 이며, 물의 열전도도는 약 0.6 W/m-K 으로 물의 열전도도는 공기에 비해 25배가 높아 지하수위의 분포나 변화는 열전도에 있어서 중요한 요소이다.

2년 동안의 지하수위 모니터링 결과, 전반적으로 지하수위는 큰 변화가 없었다. 대수층 조건은 최상부의 실트질 모래(silty sand)층이 가압층(confining layer)으로 작용하며, 지표면을 기준으로 관측공의 최고 수위는 지표면과 동일한 심도 0 m , 최소값은 심도 $2.71\sim 2.97 \text{ m}$ 로 거리에 따른 수리경사는 0.01 로 나타났다. 강수량 자료와 비교 시 강수량이 많은 경우 당일이나 1~2일 후에 지하수위 상승 효과가 나타난 반면, 강수량이 적은 경우 7일 이상의 시간이 소요되거나 지하수위에 반영되지 않았다(Fig. 4).

따라서, 연구지역에서는 지하수위가 강수량에 영향을 받지만 수위변화가 적고 수위가 높기 때문에 공극이 공기로 채워진 경우에 비해 포화된 물의 영향으로 상대적으로 열교환 시 효율이 높을 것으로 판단된다.

장기 대수성 시험

연구 지역은 방조제 완공 전의 해안지역으로 유출 지하수로 인한 지하수량이 풍부할 것으로 판단됨에 따라, 지하수량 및 수리지질학적 특성을 파악하기 위한 장기 대수성 시험을 실시하였다.

장기 대수성 시험은 가장 널리 적용되고 있는 현장 양수시험 방법으로, 단일공에서 행해지는 수리시험에 비해 비교적 넓은 지역에 대한 수리적 특성을 반영하는 수리상수를 구할 수 있다(Jo et al., 2010). 양수량은 시추 시 토출된 수량을 기준으로 평균 약 $250 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 설정하였으며, 양수 시작 시 공별 지하수위는 심도 0~0.2 m로 나타났다. 장기 대수성 시험은 심도가 가장 깊은 BH-3호공을 대상으로 수중모터펌프(7.5 HP)를 심도 50 m에 설치한 뒤 수행하였다.

양수정에서 측정된 수위변화 자료를 이용하여 시간-수위강하량 곡선 및 시간-수위회복량 곡선을 작성하여 분석을 실시하였다. 연구지역의 수리지질 특성은 상부층이 가압층인 실트질 모래로 구성되어, 수위강하곡선에 피압 대수층의 조건인 Theis의 평형식을 이용한 표준곡선 중첩법과 Cooper-Jacob의 직선해법을 이용하여 수리전도도, 투수량계수, 저류계수 등의 수리상수를 산출하였으며, 수위회복 시험에는 Theis의 recovery test 공식을 이용하였다. 이러한 대수성 시험 결과의 자료는 상용 프로그램인 AQTESOLV VER. 4.5 (HydroSOLVE, Inc.)를 이용하여 평균값을 산출하였다.

관측공의 수위변화자료를 해석한 결과, 수리전도도는 $2.11 \times 10^{-4} \sim 1.20 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 로, BH-2호공 주변에서 가장 낮은 $2.11 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 인 반면 BH-5호공 주변에서

가장 높은 $1.20 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 이며 평균 수리전도도는 $4.83 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 로 나타났다. 이를 Freeze and Cherry (1979)가 제시한 균열이 없는 화성암의 수리전도도인 $1 \sim 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 의 범위, 전체적인 암종별 수리전도도의 범위인 $10^2 \sim 10^{-11} \text{ cm/sec}$ 와 비교한 결과, 연구지역은 화강암 수리전도도값의 중간 정도에 해당하며 암종별 수리전도도의 범위에서는 높다고 판단된다. 투수량계수는 $1.12 \sim 6.38 \text{ cm}^2/\text{sec}$, 저류계수는 $0.0001204 \sim 0.0009142$ 로 투수량계수와 저류계수 역시 수리전도도와 동일하게 BH-2호공 주변에서 가장 낮은 반면 BH-5호공 주변에서 상대적으로 높은 것으로 나타났다(Table 1).

장기 대수성 시험 시 공별 수위 변화는 양수공인 BH-3호공에서 약 18 m까지 낮아져 가장 낮았고 다음으로는 가장 가까운 관정인 BH-2호공에서 약 10 m까지 낮아졌으며, BH-1호공과 BH-4호공에서는 비슷하게 약 5 m까지 하강하였다. 그러나, 거리상 BH-4호공보다 가까운 BH-5호공에서는 수위가 가장 높은 약 2 m에서 유지되었다. 그러므로, 연구지역 대수층은 약 $250 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 양수 시 양수정의 최대 수위 강하가 약 18 m로 나타나 지하수량이 풍부하며, 수평적인 수리전도도도 높게 나타나는 것으로 파악되었다.

열물성 분석

지반으로부터 열에너지를 추출할 수 있는 정도를 결정하는 중요한 요소인 열물성에는 열전도도, 열확산율, 비열, 체적열용량 등이 있다. 이 중 열전도도(thermal conductivity, λ)는 열전도의 크기를 나타내는 물성치로서 물질을 통해 열을 얼마나 쉽게 전달할 수 있는가를 수치로 나타낸 것이며, 비열(specific heat, C_p)은 물질 1 kg의 온도를 1°C 또는 1 K 높이는데 필요한 열량을 말한다. 열전도도는 지중 열교환기 설계 시 열교환기가 매설되는 토양 및 암석에서 열교환기를 통해 지중열을

Table 1. Results of the pumping test conducted in BH-3.

Well number	Hydraulic conductivity (K, cm/sec)	Transmissivity (T, cm ² /sec)	Storativity (S)
BH-1 (monitoring)	3.68×10^{-4}	1.95	0.0003585
BH-2 (monitoring)	2.11×10^{-4}	1.12	0.0001204
BH-3 (pumping)	2.38×10^{-4}	1.26	-
BH-4 (monitoring)	3.99×10^{-4}	2.12	0.0002732
BH-5 (monitoring)	1.20×10^{-3}	6.38	0.0009142
Average	4.83×10^{-4}	2.57	0.0004166

흡수, 방출하는 양을 결정하기 때문에 매우 중요하다. 열전도도는 밀도를 별도로 측정하여 다음과 같이 산출된다.

$$\lambda = \alpha \rho C_p$$

여기서, λ 는 열전도도(W/m-K), α 는 열확산율(m²/sec), ρ 는 밀도(kg/m³), C_p 는 비열(J/kgK)이다.

시료를 통한 열물성 분석

Lee and Deming (1998)은 일반적으로 토양의 열전도도는 토양의 광물성분, 공극, 함수율 등의 영향을 받는 것으로 제시하였으며, Tamawski et al. (2002)은 열전도도, 열용량 및 열확산계수 등과 같은 토양의 열물성은 주로 토양의 함수비, 밀도 및 공극률 등에 지배적인 영향을 받는 것으로 분석한 바 있다. 토양의 구성광물 중 열전도도가 높은 석영 광물(7.7 W/m-K)의 함량이 높은 경우는 토양의 열전도도가 높은 경향을 보이는 반면(Beardsmore and Cull, 2001), 점토광물(1.0 W/m-K)의 함량이 높을 경우는 토양의 열전도도가 낮은 경향을 나타낸다. 일반적으로 열전도도가 낮은 유기물의 구성비가 높은 경우에도 토양의 열전도도가 낮은 경향을 보인다.

암석의 열전도도는 구성광물, 공극율, 암석의 미세구조와 기하학적인 면(이방성) 등에 영향을 받으며, 추가로 압력과 온도에 영향을 받는다(Lee and Deming, 1998). 변성암이나 화성암의 경우는 구성광물의 영향을 주로 받는데, 특히, 석영의 함유량에 따라 열전도도값이 크게 달라질 수 있다. 그리고, Lee (2007)는 공극이 상대적으로 큰 퇴적암이나 화산암의 경우 공극이 암석의 열전도도에 가장 큰 영향을 미치며 공극이 크면 공극 속에 열전도도가 낮은 물(0.6 W/m-K)이나 공기(0.024

W/m-K)로 채워지기 때문에 공극이 클수록 열전도도는 감소한다고 제시하였다.

시료를 통한 열전도도의 정확한 측정을 위하여 연구 지역 관측공으로부터 토양과 암석 시료를 채취하였다. 채취된 토양 시료에 대한 열물성을 측정한 결과, 심도 6.25~12.60 m 범위에서 채취한 9개 토양 시료의 열전도도는 1.18~1.68 W/m-K의 범위로 나타났으며, 지층에 수직방향의 열전달을 고려한 열전도도의 조화평균은 1.32 W/m-K로 분석되었다. 심도 6.25 m에서 채취한 시료에서 가장 높은 1.68 W/m-K의 열전도도가 나타나고, 심도 12.60 m에서 가장 낮은 1.18 W/m-K의 열전도도가 나타나 특별한 경향성을 보이지 않는 것은 광물성분, 공극률, 밀도 등에 의한 영향으로 판단된다. 체적열용량은 심도 6.25 m, 열확산율은 6.80 m에서 가장 높았으며, 각각의 조화평균은 1.96×10^6 J/m³K과 7.11×10^{-7} m²/s이다(Table 2).

심도 22.28~84.39 m에서 채취한 12개의 암석시료의 열전도도 측정 결과, 2.04~4.40 W/m-K의 범위를 가지며 지층에 수직방향의 열전달을 고려한 열전도도의 조화평균은 2.88 W/m-K이다. 암석 시료는 전부 화강암이며, 가장 하부의 암석 시료인 84.39 m에서 가장 높은 4.40 W/m-K의 열전도도가 나타났으며, 24.98 m의 시료에서 가장 작은 2.04 W/m-K의 열전도도를 가지는 것으로 분석되었다. 비열은 727~862 J/kgK의 범위를 가지며, 이의 조화평균은 792.7 J/kgK이다. 암석 시료의 열확산율은 심도 84.39 m에서 최고값을 가지며 전체의 조화평균은 1.42×10^{-6} m²/sec 이다. 암석 시료에서도 깊이로 따른 경향성이 나타나지 않는 것은 전술한 바와 같이 구성광물, 공극율, 암석 구조 등에 의한 영향으로 판단

Table 2. Results of thermal property measurements of soil samples using a surface probe.

Sample No.	Depth (m)	Thermal conductivity (W/mK)	Vol. heat capacity (J/m ³ K)	Thermal diffusivity (m ² /s)
S1	6.25	1.68	2.37×10^6	7.09×10^{-7}
S2	6.50	1.31	1.72×10^6	7.61×10^{-7}
S3	6.80	1.46	1.76×10^6	8.29×10^{-7}
S4	8.35	1.29	1.69×10^6	7.59×10^{-7}
S5	8.60	1.43	2.22×10^6	6.43×10^{-7}
S6	9.80	1.26	2.18×10^6	5.79×10^{-7}
S7	12.05	1.25	1.95×10^6	6.40×10^{-7}
S8	12.30	1.32	2.03×10^6	6.53×10^{-7}
S9	12.60	1.18	1.88×10^6	6.26×10^{-7}
Harmonic mean		1.32	1.96×10^6	7.11×10^{-7}

Table 3. Results of thermal property measurements of rock samples using the flash method.

Sample No.	Depth (m)	Thermal conductivity (W/mK)	Specific heat (J/kgK)	Thermal diffusivity (m ² /sec)
R1	22.28	3.24	837	1.46×10^{-6}
R2	24.98	2.04	727	1.08×10^{-6}
R3	31.95	2.06	796	1.19×10^{-6}
R4	37.67	2.66	765	1.32×10^{-6}
R5	40.10	2.89	820	1.37×10^{-6}
R6	47.88	4.21	777	2.06×10^{-6}
R7	50.77	3.30	827	1.50×10^{-6}
R8	56.76	3.06	757	1.53×10^{-6}
R9	62.72	3.98	853	1.77×10^{-6}
R10	72.00	2.49	749	1.26×10^{-6}
R11	82.40	3.22	862	1.42×10^{-6}
R12	84.39	4.40	788	2.10×10^{-6}
Harmonic mean		2.88	792.7	1.42×10^{-6}

된다 (Table 3).

$$\lambda_{eff} = Q / (4 \times \pi \times L \times k)$$

열응답 시험

현장에서 지중 열전도도를 측정하는 방법은 신재생에너지센터의 ‘신재생에너지 설비의 지원 등에 관한 기준 및 지침(2013.3.12)’에 지중열교환기 방식별로 명시되어 있으며, 측정 기관은 신재생에너지센터에서 지정한 기관에서만 가능하다. 수평밀폐형과 에너지 파일형은 통계적 방법에 의해 평균 열전도도를 산정하도록 하였으며, 수직밀폐형과 SCW형은 라인소스법(line source method)에 의해 지중열전도도를 계산하도록 하였다.

이러한 유효열전도도 측정법에는 라인소스 모델, 실린더 소스 모델, 1차원이나 2차원에서의 수치해석적 방법 등 여러 가지가 있으며 각 방법들은 서로 다른 특징들이 있다(Gehlin, 1998; 2002). 국내에서는 지열난방 시스템의 열교환 방식 중 수직밀폐형으로 가장 많이 시공되었으므로 대부분 라인소스 방법으로 계산되었다고 할 수 있으며, Shim (2008)은 라인소스 모델과 Horner plot 방법(Horner, 1951)을 이용한 지반의 열전도도값이 유사하다는 결과를 제시한 바 있다.

라인소스 모델은 Kelvin의 라인 소스 이론(Carslaw and Jaeger, 1986; Ingersoll and Plass, 1948)에서 발전되었으며 무한 공간의 열원에서 특정 지점의 온도를 계산하는 기법을 제안한 것으로 아래 식과 같은 라인소스 방법에 의해 열전도도가 산출된다 (Gehlin, 2002).

여기서, λ_{eff} 는 그라우트/토양 혼합층의 유효 열전도도 (W/m-K), Q 는 순환수 전달열량(W), L 은 지중열교환기 깊이(m), k 는 로그 시간에 대한 온도의 평균 기울기이다.

연구지역의 수리지질학적 조사 결과, 연구지역은 지하수량이 풍부하므로, TRT 방법 중 수직개방형인 SCW 형 방식으로 지중 열전도도를 측정하였다.

TRT의 세부적인 방법은 ‘신재생에너지설비의 지원 등에 관한 규정 및 지침’을 이용하였으며, 연구지역의 심도 77 m인 BH-3호공에서 수중모터를 10 m (3 HP)에 설치하고 주입관을 75 m에 설치한 후, 차량에 탑재된 보일러에서 열을 가한 후 변화되는 온도를 측정하였다 (Fig. 5). 또한, 주입된 지하수는 주입관 끝 부분(75 m)의 구멍(hole)에서 토출되는데 여기에 온도 센서를 설치하여 보일러에 의해 열량이 투입된 순환수가 주입관 끝 부분에 도달할 때의 온도를 측정하였으며, 시험에 사용되는 설정과 입출구 온도 및 투입열량은 운영 프로그램에 의해 모니터링 되었다. 온도차는 4-4.5°C가 유지되도록 순환 유량을 73 LPM (liter per minute) 으로 설정한 후 가동하였는데 시험 종료 시 입출구 평균 온도차는 4.1°C로 나타났다. 또한, 시험 시작 시 장비에 유입, 유출하는 지하수의 온도가 일정해지도록 약 30 분간 회전을 시켜 17.1°C 정도로 일정해졌을 때 열량을 투입하기 시작하여 25.3시간 동안 시험을 실시하였다.

장비 입구, 출구에 대한 온도, 유량 측정은 1분마다 자동으로 측정하였는데, 시험 종료 시 보일러 입구 온도는 45.31°C, 출구 온도는 49.38°C에 이르렀다. 주입관 끝에 부착한 센서에서 측정한 온도도 시험 시 지속적으로 상승하였는데 보일러 출구 온도와의 미미한 온도 차이는 순환수가 주입관을 타고 내려가는 동안 열교환이 이루어

Fig. 5. Schematic diagram of the thermal response test (TRT).

어진 결과로 판단된다. 또한, TRT 후 20분~500분 동안 심도 8.0 m에서 측정한 온도는 초기에는 급속하게 온도가 하강하였지만, 점차 회복 속도가 늦어져 500분 후에는 17.8°C를 기록하여 TRT 전 온도 15.5°C와는 2.3°C의 온도차를 나타내며 초기 온도로 회복되기까지는 많은 시간이 소요될 것으로 예상된다(Fig. 6).

시험 결과, 입구 온도와 출구 온도 측정 자료에 의해 계산된 온도와 시간대수에 의한 기울기(k)는 7.9812로 나타났고, 투입된 평균열량(Q)은 21,320 W이며, 라인소스 방법으로 계산된 현장 측정 유효열전도도값은 3.13 W/mK로 나타났다.

토의 및 결론

지금까지 국내에서 열물성에 관한 연구는 지역별, 암종별 열물성 파악을 위주로 진행되었다. Park et al. (2007)에 의하면 경기도, 강원도, 충청도 일대에서 화성암, 변성암, 퇴적암 총 712개 시료의 평균 열전도도는 각각 3.58, 4.16, 4.53 W/m-K이라고 제시하였으며, Park et al. (2009)에 따르면 남한 일대에서 총 2,511개의 암석을 채취하여 열전도도를 측정된 결과, 화성암, 변성암, 퇴적암의 평균 열전도도는 각각 3.11, 3.76, 3.54 W/m-K로 제시한 바 있다. 이러한 결과로부터 지역적이나 구성광물에 따라 다소 차이는 있으나 국내 암석의 일반적인 열전도도를 대략적으로 추정할 수 있다. 그러나, 지열난방시스템 설계 시에 실시하는 TRT에서 구한 일부 열전도도가 국내 암석 평균 열전도도의 몇 배에 해당하는 값이 나타남에 따라, 본 연구에서는 동일

(a)

(b)

Fig. 6. Variation of temperature (a) during TRT and (b) after TRT. The sensor was installed at a depth of 8 m.

지역 동일 시추공에서 시료를 통한 열전도도와 TRT를 통한 열전도도를 구해서 이를 비교해 보았다.

불교란 시료를 채취하여 분석한 연구지역 토양 시료의 열전도도는 1.32 W/m-K 이며, 코어를 이용한 암석 시료의 열전도도는 2.88 W/m-K 로 나타났다. 연구지역의 시료는 화강암으로 화성암에 해당되므로 국내 화성암 열전도도와 비교 시 다소 낮은 값을 나타내는데 이는 구성광물, 공극률 등에 의한 차이로 판단된다. 또한, TRT로 측정된 열전도도는 3.13 W/m-K 로 나타났는데 암석 시료의 열전도도와 비교해 보면 TRT에서의 열전도도가 약 10% 정도 높은 값을 나타낸다. 수직밀폐형에서는 국내에 사용되는 일반적인 배합비의 벤토나이트 그라우트의 열전도도가 대략 $0.74\sim 0.81 \text{ W/m-K}$ 으로 암반의 열전도도에 비해 상대적으로 매우 낮은 열전도도를 가지고 있어(Choi et al., 2008), 일반적으로 시료를 통한 열전도도가 더 높게 나타나지만 연구지역에서 SCW형으로 실시한 TRT에서는 시료를 통한 열전도도보다 높게 나타났다.

연구지역 수리지질학적 조사결과 연구지역은 0.01의 수리경사로 지하수의 흐름이 있으며, 열교환 시에 지하수 흐름이 영향을 미친다는 연구 결과도 제시된 바 있어(Gehlin, 2002), 연구지역에서 실시한 TRT에서 암석 시료의 열전도도보다 높은 값을 나타내는 것은 동수구배에 의한 지하수 흐름에 따른 영향이라고 판단된다. 이러한 지하수의 흐름은 자연적인 흐름이 없어도 TRT 시에 시추공을 통한 지하수의 유입, 유출이 있어 인위적인 흐름이 생기므로 SCW형의 TRT에서는 지하수의 흐름이 항상 영향을 미친다고 할 수 있으며 이러한 흐름에 의해 영향을 받는다고 판단된다.

라인소스 이론에 따르면 TRT는 지반의 순수한 열전도도를 산정하는 것을 목적으로 하지만, SCW 방식 지중열교환기에 대하여 라인소스 이론을 근거로 구한 열전도도는 암석자체의 열전도도보다 높은 값을 가진다고 제시된 바가 있다(Kim and Kong, 2011). 그러므로, 밀폐된 공간이거나 지하수의 유입, 유출이 없다면 순수한 지반의 열전도도를 산정할 수 있지만, SCW형의 TRT에서는 주변 지하수 흐름의 영향이 반영된 열전도도값이 산출된다. 즉, 라인소스 이론에서는 암반에 대한 열교환만을 고려할 뿐 지하수 흐름에 대한 고려는 없는데 SCW형의 TRT에서는 지하수 흐름에 대한 결과도 포함되므로 국내 SCW형의 TRT는 라인소스 이론에 적합하지 않다고 할 수 있다.

결론적으로, 현재 국내에서 수직밀폐형 뿐만 아니라

SCW형 지열냉난방시스템 설계 및 시공에서 이용되는 TRT를 이용한 열전도도 산출 방식의 문제점이 나타나기에 따라, SCW형의 지열냉난방시스템 설계에서는 시료를 대상으로 측정된 열전도도값을 사용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

References

- Beardsmore, G. R. and Cull, J. P., 2001, Crustal heat flow: A guide to measurement and modeling, Cambridge University Press, 324.
- Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1986, Conduction of heat in Solids, 2nd ed., Oxford University Press, 520
- Cha, J. H., An, S. J., Koo, M. H., Kim, H. C., Song, Y. H., and Suh, M. S., 2008, Effects of Porosity and Water Content on Thermal Conductivity of Soils, Journal of Soil and Groundwater Environment, 13(3), 27-36. (in Korean)
- Cha, J. H., Myoung, D. W., Koo, M. H., Song, Y. H., and Kim, H. C., 2007, Analysis for the thermal properties by rock type in South Korea, Proceedings of The Korean Society For New And Renewable Energy 2007 Fall conference, 493-496. (in Korean)
- Choi, H. S., Lee, C. H., Choi, H. P., and Woo, S. B., 2008, A Study on the Physical Characteristics of Grout Material for Backfilling Ground Heat Exchanger, The Journal of Korean Geotechnical Society, 24(1), 37-49. (in Korean)
- Freeze, R. A. and Cherry J. A., 1979, Groundwater, Prentice Hall Inc., 29.
- Gehlin, S., 1998, Thermal response test - In-situ measurements of thermal properties in hard rock, Lulea University of Technology, Sweden, 21.
- Gehlin, S., 2002, Thermal response test-Method development and evaluation: Doctoral Thesis 2002:39, Lulea University of Technology, Sweden, 16-19.
- Hahn, J. S., Hahn, H. S., Hahn, C., Kim, H. S., and Jean, J. S., 2006, Design Guidlines of Geothermal Heat Pump System Using Standing Column Well, Econ. Environ. Geol., 39(5), 607-613. (in Korean)
- Horner, D. R., 1951, Pressure build-up in wells, Proc. Third World Petroleum congress, The Hague, 503
- Ingersoll, L.R., and Plass, H.J., 1948, Theory of the ground pipe heat source for the heat pump, Heating, Piping & Air Conditioning, July, 199-222.
- Jo, Y. J., Lee, J. Y., Jun, S. C., Cheon, J. Y., and Kwon, H. P., 2010, Estimation of Hydraulic Parameters from Slug, Single Well Pumping and Step-drawdown Tests, The Journal of Engineering Geology, 20(2), 203-212. (in Korean)
- Kim, H. S. and Kim, S. J., 2001, A Study on Groundwaters being Discharged into East Sea along the Shoreline of Southern Korean Peninsula, Journal of the Korean Geophysical Society, 4(1), 71-84. (in Korean)
- Kim, J. H., Park, J. H., Kim, Y. Y., Park, S. Y., Kim, Y. H., and Lee, J. M., 2006, A practical Study on the

- Ground Heat Pump with Standing Column Well, Ministry of Commerce Industry and Energy, 2004-N-GE11-P-01, 124-147. (in Korean)
- Kim, J. S. and Kong, H. J., 2011, Overview of Ground Heat Exchanger on Standing Column Well Type, Korea Journal of Geothermal Energy, 7(1), 6-12. (in Korean)
- Korea Energy Management Corporation, 2013, 2013 Handbook of Energy & Economic Statistics in Korea, 16-17. (in Korean)
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 1997, Explanatory text of the geological map of Gwangju sheet(1:250,000), 46-76. (in Korean)
- Lee, B. S., Song, S. H., Kim, J. S., Um, J. Y., and Nam, K. P., 2013, Availability of coastal groundwater discharge as an alternative water resource in a large-scale reclaimed land, Korea, Environ. Earth Sci., DOI: 10.1007/s12665-013-2558-x.
- Lee, Y. M., 2007, Thermal conductivity of rocks for geothermal energy utilization, Transactions of the Korea Society of Geothermal Energy Engineers, 3(2), 9-15. (in Korean)
- Lee, Y. M. and Deming, D., 1998, Evaluation of thermal conductivity temperature corrections applied in terrestrial heat flow studies, Journal of Geophysical Research, 103, 2447-2454.
- Park, J. M., Kim, H. C., Lee, Y. M., Shim, B. O., and Song, M. Y., 2009, Thermal Properties of Rocks in the Republic of Korea, Econ. Environ. Geol., 42(6), 591-598. (in Korean)
- Park, J. M., Kim, H. C., Lee, Y. M., and Song, M. Y., 2007, A Study on Thermal Properties of Rocks from Gyeonggi-do Gangwon-do, Chungcheong-do, Korea, Econ. Environ. Geol., 40(6), 761-769. (in Korean)
- Park, S. G., In, N. S., Song, Y. S., Oh, J. N., Jeon, B. K., Lee, S. I., and Yang, D. J., 2006, Research of Two-Well type Ground water Heat Pump System, Ministry of Commerce Industry and Energy, 2004-NGE11-P-02, 73-105. (in Korean)
- Shim, B. O., 2008, Application of the Horner Plot Method in Thermal Response Test Interpretation, Journal of The Korean Society for Geosystem Engineering, 45(4), 337-343. (in Korean)
- Song, S. H., 2007, Application of Electrical Resistivity Tomography Using Single Well in Seawater Intrusion Areas, Geophysics and Geophysical Exploration, 10(4), 369-376. (in Korean)
- Tarnawski, V. R., Leong, W. H., Gori, F., Buchan, G. D., and Sundberg, J., 2002, Inter-particle contact heat transfer in soil system at moderate temperature, International Journal of Energy Research, 26, 1345-1358.
- Zekker, I. S. and Loaiciga, H. A., 1993, Groundwater fluxes in the global hydrologic cycle: past, present and future, Journal of hydrology, 144(1), 405-427.

원고접수일: 2013년 10월 8일

수정본채택: 2013년 11월 12일

게재확정일: 2013년 11월 14일

김진성

426-908 경기 안산시 상록구 해안로 870

한국농어촌공사 농어촌연구원

Tel: 031-400-1851

Fax: 031-400-1889

E-mail: geo-kjs@hanmail.net

송성호

426-908 경기 안산시 상록구 해안로 870

한국농어촌공사 농어촌연구원

Tel: 031-400-1723

Fax: 031-400-1889

E-mail: shsong84@hanmail.net

정교철

760-749 경북 안동시 경동로 1375 (송천동)

안동대학교 지구환경과학과

Tel: 054-820-5753

Fax: 054-822-5467

E-mail: jeong@andong.ac.kr