

밀폐형 지중열교환기 설계를 위한 지중 유효열전도도 데이터베이스 구축

최 재 호, 손 병 후*, 임 효 재**†

호서대학교 대학원 기계공학과, *한국건설기술연구원 화재및설비연구센터, **호서대학교 기계공학과

Construction of Ground Effective Thermal Conductivity Database for Design of Closed-Loop Ground Heat Exchangers

Jae Ho Choi, Byonghu Sohn*, Hyo-Jae Lim**†

ABSTRACT: A ground heat exchanger in a GSHP system is an important unit that determines the thermal performance of a system and its initial cost. The Size and performance of this heat exchanger is highly dependent on the thermal properties. A proper design requires certain site-specific parameters, most importantly the ground effective thermal conductivity, the borehole thermal resistance and the undisturbed ground temperature. This paper is part of a research project aiming at constructing a database of these site-specific properties, especially ground effective thermal conductivity. The objective was to develop and evaluation method, and to provide this knowledge to design engineers. To achieve these goals, thermal response tests were conducted using a testing device at nearly 150 locations in Korea. The in-situ thermal response is the temperature development over time when a known heating load imposed, e.g. by circulating a heat carrier fluid through the test exchangers. The line-source model was then applied to the response test data because of its simplicity. From the data analysis, the range of ground effective thermal conductivity at various sites is 1.5~4.0 W/mK. The results also show that the ground effective thermal conductivity varies with grouting materials as well as regional geological conditions and groundwater flow.

Key words: Ground Heat Exchanger(지중열교환기), Ground Effective Thermal Conductivity (지중 유효열전도도), Vertical Closed Loop System(수직 밀폐형 시스템)

기 호 설 명

$\Delta T(r,t)$: 시간에 따른 온도 변화 [$^{\circ}\text{C}$]

α : 열확산율 [m^2/s]

Q : 보어홀에 투입한 열량 [W]

k : 열전도도 [$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$]

L_b : 보어홀의 길이 [m]

m : 대수변환한 온도-시간 그래프의 기울기

R_b : 총합열저항 [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]

γ : 오일러 상수

† Corresponding author

Tel.: +82-42-540-5802; fax: +82-42-540-5808

E-mail address: hjlim@hoseo.edu

1. 서 론

최근 신·재생 에너지 이용에 대한 관심 증가

와 함께 지열원 열펌프 시스템(ground source heat pump system)에 대한 관심과 설치 사례도 증가하고 있다. 지열원 열펌프 시스템은 300 m 이내의 지중을 히트싱크(heat sink)나 열원(heat source)으로 이용하여 건물 냉·난방에 필요한 에너지를 공급하는 시스템으로, 지중 토양을 이용하는 밀폐형 시스템과 지하수를 이용하는 개방형 시스템으로 구분된다.

현재 국내에서는 수직형 지중열교환기(vertical ground loop heat exchanger)를 이용하는 밀폐형 시스템을 주로 설치하고 있다. 수직형 지중열교환기는 수직으로 천공된 보어홀(borehole)에 고밀도 폴리에틸렌 재질의 U자형 파이프를 삽입한 후, 파이프와 보어홀 벽면 사이의 빈 공간에 그라우팅 재료(grouting materials)를 채워 시공한다. 여기서 수직형 지중열교환기는 전체 시스템의 성능과 초기 투자비를 결정하는 중요 기기로서, 이 기기의 성능은 지중열교환기 파이프 내를 순환하는 유체와 파이프 주위 지중 토양이나 암반층 사이의 열전달과 밀접한 관련이 있다.

수직형 지중열교환기를 최적 설계하기 위해 지중 열전도도와 보어홀 유효 열저항을 정확하게 산정한 후, 이 값들을 설계에 적용해야 한다. 지중 열전도도를 산정하기 위해 시추(천공) 과정에서 획득한 시료를 실험실에서 측정하거나, 현장에서 직접 측정하는 방법을 적용할 수 있다. 시료를 실험실에서 측정할 경우, 실제 지중 열교환기가 설치된 상황과 많은 차이가 있기 때문에 이 값을 설계에 적용하는 것은 무리가 있다. 따라서 측정에 상당히 긴 시간이 필요하다는 단점에도 현장에서 직접 측정하는 방법을 주로 채택하고 있으며, 이를 현장 열응답 시험(in-situ thermal response test)이라고 한다.

이러한 열응답 시험에 대한 개념과 구체적인 방법을 Mogensen⁽¹⁾이 처음 제안한 후, 현재까지 지중 열전도도를 산정하기 위해 주로 적용하고 있다. 그라우팅 재료나 열응답 시험 시간 등 다양한 인자들이 시험 결과와 지중 열전도도에 미치는 영향을 고찰한 연구결과들^(2~5)이 발표되었다. 하지만 국내 지중 특성이 외국과 다르기 때문에 기존 결과를 여과 없이 수용하여 지중 열교환기를 설계하는 것은 다소 무리가 있을 것으로 판단된다.

국내에서도 일부 연구자들이 현장 시험을 통한

지중 유효 열물성 산정결과를 발표하였다. 임효재 등⁽⁶⁾은 그라우팅 재료를 달리하여 모의 지중 열교환기를 실험실 규모로 설치한 후, 유효 열전도도를 측정하였다. 이세균 등⁽⁷⁾은 2관식(single U-tube)과 4관식(double U-tube) 지중 열교환기를 이용하여 지중 열전도도를 측정하였으며, 1차원 수치모델 결과와 비교하였다. 아울러 초기제외시간(IIT: initial ignoring time) 개념을 도입하여, 시험 시작부터 4~4.5시간까지 획득한 데이터를 제외한 후 열전도도를 산정할 것을 제안하였다. 손병후 등^(8, 9)은 국내 세 지역에 설치된 지중 열교환기를 대상으로 열응답 시험을 수행하고 선형열원 모델(line-source model)과 수치모델에 의한 계산결과와 비교하였다. 각 모델 사이에 상대적 우수성이 없음을 확인하였으며, 대략 6.7시간부터 시험 종료까지 유효 열물성 값들이 거의 일정하게 유지되는 것을 확인하였다.

이상과 같이 지중 열전도도 시험방법과 결과 분석에 대해 다양한 연구결과들이 제시되고 있지만, 국내의 연구는 다소 미흡한 수준이다. 따라서 지중열교환기의 사양을 정확하게 계산하는 데 필수적인 지중 열전도도 데이터베이스를 구축하고, 부수적으로 해석기법 등을 정리할 필요가 있다. 본 연구의 목적은 현장에서 쉽게 사용할 수 있는 국내 지역별 지중 열전도도와 그라우팅 재료의 열물성 데이터베이스를 구축하는 데 있다. 이를 위해 권역별로 구분하여 현장에서 지중 열전도도를 측정하고, 다양한 경로를 통해 기타 지역의 지중 열전도도 값을 확보함으로써 데이터베이스를 구축하고자 한다. 또한 국내의 상용 그라우팅 재료의 열물성을 측정된 후, 그라우팅 재료에 따른 지중 열전도도 변화를 규명하고자 한다.

2. 지중 열전도도 측정

2.1 지중 열전도도 측정 장비

Fig. 1은 현장 지중 열전도도 측정 시스템의 개략도를 도시한 것이다. 실제 시공되는 지중열교환기와 동일한 사양으로 시험용 지중열교환기를 시공한 후, Fig. 2의 지중 열전도도 측정 유닛을 연결한다. 지중 열전도도 측정 유닛은 열원(전기히터), 순환펌프, 온도와 소비 전력 측정 장치, 데이터로거 등으로 구성된다. 열응답 시험의 원

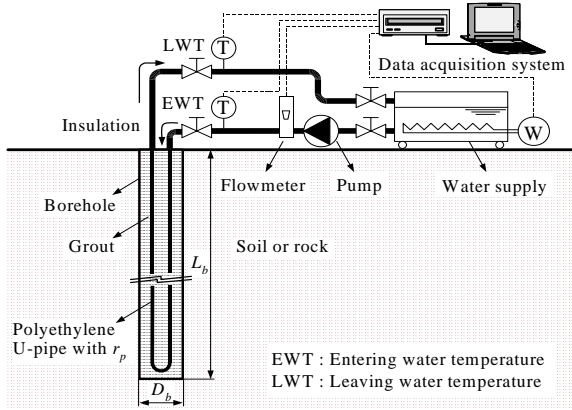


Fig. 1 Schematic of an in-situ thermal response test apparatus.

리는 열교환기 파이프 내부로 히터에 의해 가열된 유체를 유입시켜 지중 열교환을 통해 환수되는 유체의 온도차와 유량, 에너지 투입량을 측정하여 산정하는 것이다.

본 연구에서는 Fig. 2의 지중 열전도도 측정 유닛을 자체 제작하였으며, 유닛은 작동부(열량투입, 유체순환)와 제어부(온도, 전압, 전류 등 기록)로 구분된다. 수조는 보충수의 보급이 용이하도록 4리터의 체적으로 제작되었다. 단계별 투입 열량 조절이 가능하도록 4개의 3kW히터를 장착하였으며, 관로 손실과 각종 밸브의 부차적인 손실을 고려하여 최고 양정 11 m, 최고 유량 140 liter/min의 성능을 가진 펌프를 장착하였다. 히터에 공급되는 전력을 측정하기 위해 전력량계(power meter)를 장착하였으며, 지중열교환기 입·출구 온도를 측정하기 위해 K-type 열전대를 배관 상에



Fig. 2 Ground thermal conductivity test unit

설치하였다. 시험에서 온도, 유량, 전력량 등의 데이터를 1분 간격으로 측정하여 데이터 획득시스템에 저장한 후 실험결과 분석에 사용한다.

2.2 지중 열전도도 측정 방법

시험용 지중열교환기는 폴리에틸렌(PE) 또는 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 파이프를 열융착법(thermal fusion method)으로 U자 관 형상으로 성형한 후, 시험용 보어홀 삽입하고, 그라우팅 재료를 보어홀 내에 주입하여 완성한다. 그림 2에서와 같이 지중 열전도도 측정 유닛의 입·출구 배관과 지중열교환기 파이프의 입·출구 배관을 연결하고, 파이프 내에 순환유체를 주입한다. 펌프를 가동하여 파이프 내의 유체를 순환시켜 이물질과 공기를 완전히 제거한다. 일정 시간 동안

Table 1 현장 열전도도 측정기준

순번	항 목	기준	
측정 시간	1	열전도도 측정 개시	그라우팅 완료 후 72시간 이후
	2	제외시간	시험 시작 후 12시간 데이터 제외
	3	유효데이터의 연속 취득시간	48시간 이상 연속 취득
	4	데이터 취득 간격	10분 이하
측정 조건	5	측정공 투입 전력량	2관식 : 50~80 W/m 3관식 : 60~95 W/m 4관식 : 65~105 W/m
	6	Loop 입출구 온도차 (이 온도범위에서 유량조절)	3.5 ~ 7℃
측정 오차	7	측정온도의 오차	±0.3℃ 이하 (평균온도에 대한 표준편차)
	8	입력전력의 오차	±1.5% 이하 (평균전력에 대한 표준편차)
재 측정	9	재측정개시	지중초기 온도의 0.3℃이내 까지 회복 후 재측정

지속적으로 유체를 순환시켜 지중 온도가 정상상태(steady-state)에 도달하면, 열을 공급하면서 1분 간격으로 온도와 유량, 입력 열량 등을 측정한다. Table 1 은 지중 열전도도 시험 시 준수사항을 정리한 것이다.

3. 지중 열전도도 산정

지중 열전도도를 산정하는 방법에는 원통열원 모델(cylinder source model)과 선형열원 모델(line-source model)이 있다. 이 중에서 선형열원 모델이 원통열원모델보다 상대적으로 적용하기 쉽기 때문에, 현장에서 측정한 데이터를 이용하여 지중 열전도도를 산정할 때 주로 적용된다. 선형열원모델은 Kelvin의 무한 선형열원 이론(infinite line-source theory)에 기초를 두고 있으며, 다음과 같다.^(10, 11)

$$\Delta T(r, t) - T_i = \frac{Q}{4\pi kL} \int_{x_0}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du + \frac{QR_b}{L} \quad (1)$$

식(1)에서 R_b 는 순환유체, 파이프, 그라우팅 재료 등의 열저항이 모두 포함된 총합열저항(overall thermal resistance)이다. 또한 지수적분함수를 다음과 같이 근사식으로 표현할 수 있다.

$$\int_{x_0}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \approx -\gamma - \ln x_0 + Ax_0 - Bx_0^2 + Cx_0^3 - Dx_0^4 + Ex_0^5 \quad (2)$$

식(2)에서 A, B, C, D, E는 각각 0.99999193, 0.24991055, 0.05519968, 0.00976004, 0.00107857이며, γ 는 Euler 상수로서 0.5772이다. 식(1)과 식(2)에서 적분변수 $x_0(r^2/4at)$ 가 매우 작기 때문에, 식(2)를 식(3)과 같이 더 단순화할 수 있다. 다시 이 식을 식(1)에 대입하여 정리하면, 식(4)의 단순 선형열원 모델을 얻을 수 있다.

$$\int_{x_0}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \approx \ln \frac{1}{x_0} - \gamma \quad \text{for } \frac{\alpha t}{r^2} \geq 5 \quad (3)$$

$$\Delta T(r, t) - T_i \approx \frac{Q}{4\pi kL} \ln \left(\frac{4\alpha t}{\gamma_1 r^2} \right) + \frac{QR_b}{L}, \quad \gamma_1 = 1.78 \quad (4)$$

여기서 시간의 자연로그 값(ln)에 대하여 온도 변화를 도시할 경우, 식(4)는 직선 형태를 보인다. 따라서 식(4)의 기울기, 평균 열 입력량, 보어홀 길이 등을 다음 식(5)에 대입하면 지중 열전도도를 계산할 수 있다.

$$k = \frac{Q}{4\pi m L_b} \quad (5)$$

4. 결과 및 고찰

위의 조건을 이용하여 지중열전도도 측정을 수행하였고 측정된 데이터를 이용하여 전국의 지중 열전도도 데이터베이스를 구축하였다. Fig. 4는 지중열전도도 데이터베이스의 GUI(Graphical User Interface)를 나타낸다.

데이터베이스는 MS-SQL을 이용하였다. MS-SQL은 프로그램에서 사용되는 데이터를 보관하는 역할만을 수행한다. 데이터베이스 내부의 데이터필드는 건물명, 우편번호, 주소, 천공 깊이, 지중열교환기방식, 그라우팅재료, 투입열량, 측정시간과 지중열전도도와 같은 세부필드로 나누어진다.

프로그램은 데이터베이스의 데이터를 가져와 GUI상에 데이터를 나타내도록 프로그래밍 되었다. GUI의 우측은 지도상에 지중열전도도 측정 위치와 간략한 데이터를 나타낸다. 지중열전도도 측정 위치는 데이터베이스상의 경위도 데이터와 Fig. 4에 나타난 지도의 네모서리의 경위도를 선형보간

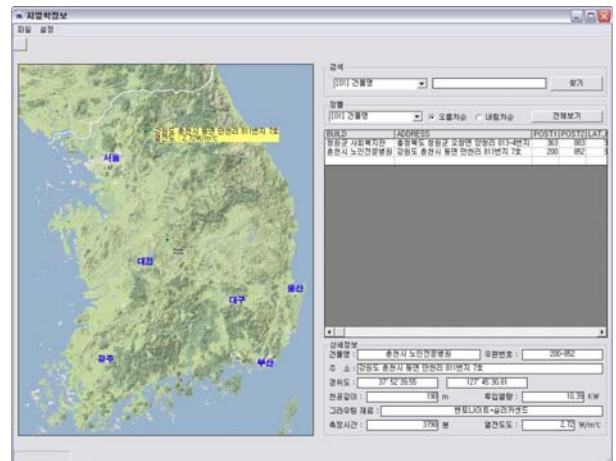


Fig. 4 GUI of Database.

하여 얻어진 지도전체의 경위도 데이터를 대조하여 지도상에 점으로 표시하도록 하였다. 표시되어있는 점 주변에 마우스 포인터가 근접하면 주소와 지중열전도도값이 팝업창에 나타나도록 하였다. 또한 점을 클릭하면 소 축적지도가 GUI상에 활성화되어 지중열전도도측정위치를 더욱 정확하게 파악할 수 있도록 하였다. GUI의 우측은 검색, 정렬, 데이터필드, 상세정보로 나누어진다. 검색창은 건물명, 주소, 천공깊이, 지중열교환기 방식, 그라우팅재료, 투입열량, 열전도도의 항목을 선택하고 항목에 따라 검색하고자하는 단어를 입력하면 데이터필드창에 해당되는 데이터만이 정렬된다. 정렬창은 검색창과 마찬가지로 건물명, 주소, 천공깊이, 지중열교환기방식, 그라우팅재료, 투입열량, 열전도도의 항목마다 오름차순과 내림차순으로 데이터필드를 정렬하는 기능을 가진다. 상세정보창은 데이터필드나 지도상에서 선택된 데이터를 건물명, 우편번호, 주소, 경위도, 천공깊이, 투입열량, 그라우팅재료, 측정시간, 열전도도의 순으로 상세정보를 나타낸다.

Fig. 5는 현재까지 수집된 지역별 열전도도 분포도를 나타내며, Fig, 6은 우리나라의 지질도를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 서울과 경기도 지역의 지중 열전도도는 대체로 2.0~3.0 W/m℃의 범위에 있었으며, 이는 거의 동일한 지질구조와 시험

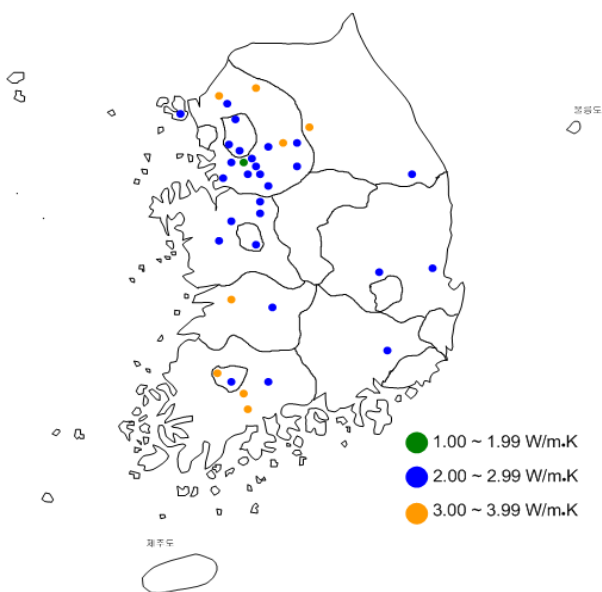


Fig. 5 Regional distribution of thermal conductivity

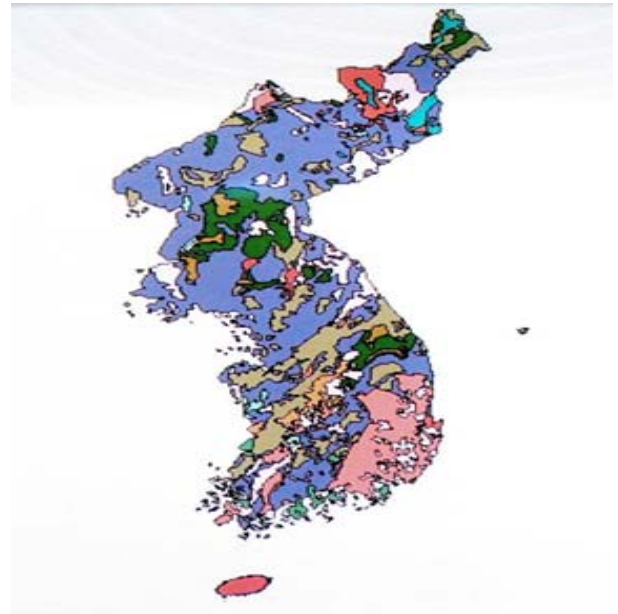


Fig. 6 Geology map of Korea

용 지중열교환기에 주입된 그라우팅 재료의 혼합비율이 거의 유사함에 기인한다. 다른 지역은 데이터가 많이 수집되지 않았지만, 경기도와 지질구조가 다른 전라남도에서는 지중 열전도도 값이 대체로 3.0~3.99 W/m℃의 범위에 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 현장에서 열전도도를 측정함과 동시에 공개된 데이터를 확보하여 현장에서 쉽게 사용할 수 있는 국내 지역별 지중 유효열전도도 데이터베이스를 구축하였다.

구축된 각 지역별 지중 열전도도 데이터베이스를 이용하여 사용자가 수직형 지중 열교환기를 시공하고자하는 현장의 지중 열전도도 값을 추측할 수 있으며, 데이터베이스 내의 그라우팅 재료를 이용하여 최적의 그라우팅 재료를 선택할 수 있을 것이다. 본 데이터베이스를 이용하면 수직형 지중열교환기의 최적 설계에 도움을 줄 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단 신·재생에너지센터의 2006년 신·재생에너지기술개발사업(2006-N-

GE02-P-02)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Mogensen, P., 1983, Fluid to duct wall heat transfer in duct system storages, Proceedings of the International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice. Swedish Council for Building Research, June 6-8.
2. Spilker, E. H., 1998, Ground-coupled heat pump loop design using thermal conductivity testing and the effect of different backfill materials on vertical bore length, ASHRAE Transactions, Vol. 104, pp. 775-779.
3. Zhang, Q. and Murphy, W. E., 2000, Measurement of thermal conductivity for three borehole fill materials used for GSHP, ASHRAE Transactions, Vol. 106, pp. 434-441.
4. Smith, M. D. and Perry, R. L., 1999, Borehole grouting: field studies and thermal performance testing, ASHRAE Transactions, Vol. 105, pp. 451-457.
5. Shonder, J. A. and Beck, J. V., 2000, Field test of a new method for determining soil formation thermal conductivity and borehole resistance, ASHRAE Transactions, Vol. 106, pp. 843-850.
6. Lim, H. J., Kong, H. J., Song, Y. S. and Park, S. K., 2005, Thermal conductivity measurement of grouting materials for geothermal heat exchanger, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 4, pp. 364-369.
7. Lee, S.-K., Woo, J.-S., Ro, J.-G. and Kim, D.-K., 2006, A study on the estimation of soil formation thermal conductivities and borehole resistances with one-dimensional numerical model and in-situ field tests, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 18, No. 10, pp. 783-790.
8. Sohn, B. H., Shin, H.-J. and An, H.-J., 2005, Evaluation of thermal conductivity for grout/soil formation using thermal response test and parameter estimation models, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 173-182.
9. Sohn, B. H., Shin, H.-J. and Park, S. K., 2005, Evaluation of effective thermal conductivity and thermal resistance in ground heat exchanger boreholes, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 8, pp. 695-703.
10. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1947, Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., Oxford University Press.
11. Ingersoll, L. R. and Plass, H. J., 1948, Theory of the ground pipe heat source for the heat pump, Heating, Piping & Air Conditioning, July, pp. 119-122.