한국신·재생에너지학회 2007년도 추계학술대회논문집 pp.511~514

지열 냉난방 시스템을 위한 열전도도의 지역별 분포

임 효재[1], 손 병후[2], 정 계훈[3]

Regional Distribution of Thermal Conductivity of Ground Heat Exchanger for Geothermal Heat Pump System

Hyo Jae Lim, Byong Hu Shon, Kye Hoon Jung

Key words : Ground Heat Exchanger (지중열교환기), Thermal Conductivity(열전도도), Grouting Material(그라우팅 재료), Database(데이터베이스)

Abstract : This study was performed to construct a geothermal data base about thermal conductivity of ground heat exchanger and thermal properties of grouting material which used to refill the borehole. We have acquired geothermal data sets from 39 sites over wide area of South Korea except to Jeju island. From data analysis, the range of thermal conductivity is 1.5~4.0 W/mK. It means that thermal conductivity varies with grouting material as well as regional geology and ground water system.

Nomenclature

Q : input quantity of heat to borehole, W
k : thermal conductivity, $W/m℃$
L_b : length of borehole, m
m : slope of logarithmic transformation time-temp. graph

1. 서 론

최근 신·재생 에너지 이용에 대한 관심 증가와 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

1) 호서대학교 기계공학과
E-mail : hjlim@hoseo.edu
Tel : (041)540-5802 Fax : (041)540-5808
2) 한국건설기술연구원 화재및설비연구센터
E-mail : byonghu@kict.re.kr
Tel : (031)3690-511 Fax : (031)3690-540
3) 호서대학교 대학원
E-mail : philipy2k@hanmail.net
Tel : (041)532-9121 Fax : (041)532-9121

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[2-3]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[4]은 그라우팅 재료를 달리하여 모의 지중 열교환기를 실험실 규모로 설치한 후, 유효 열전도도를 측정하였다. 이세균 등[5]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[6, 7]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.

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 국내외 상용 그라우팅 재료의 열물성을 측정한 후, 그라우팅 재료에 따른 지중 열전도도 변화를 규명하고자 한다.

2. 지중 열전도도 측정

2.1 지중 열전도도 측정 장비

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

Fig. 1은 현장 지중 열전도도 측정 시스템의 개략도를 도시한 것이다. 실제 시공되는 지중열교환기와 동일한 사양으로 시험용 지중열교환기를 시공한 후, 지중 열전도도 측정 유닛을 연결한다. 지중 열전도도 측정 유닛은 열원(전기히터), 순환펌프, 온도와 소비 전력 측정 장치, 데이터로거 등으로 구성된다. 열응답 시험의 원리는 열교환기 파이프 내부로 히터에 의해 가열된 유체를 유입시켜 지중 열교환을 통해 환수되는 유체의 온도차와 유량, 에너지 투입량을 측정하여 산정하는 것이다.

2.2 지중 열전도도 측정 및 산정 방법

시험용 지중열교환기는 폴리에틸렌(PE) 또는 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 파이프를 열융착법(thermal fusion method)으로 U자 관 형상으로 성형한 후, 시험용 보어홀에 삽입하고, 그라우팅 재료를 보어홀 내에 주입하여 완성한다. Fig. 1에서와 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 지속적으로 유체를 순환시켜 지중 온도가 정상상태(steady-state)에 도달하면, 열을 공급하면서 1분 간격으로 온도와 유량, 입력 열량 등을 측정한다.

지중 열전도도를 산정하는 방법에는 원통열원 모델(cylinder source model)과 선형열원 모델(line-source model)이 있다. 이 중에서 선형열원모델이 원통열원모델보다 상대적으로 적용하기 쉽기 때문에, 현장에서 측정한 데이터를 이용하여 지중 열전도도를 산정할 때 주로 적용된다.

지중 열전도도를 산정하는 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k = \frac{Q}{4\pi m L_b} \tag{1}$$

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 국내 한 지역(경기도 화성)에서 실시한 4개의 측정결과 중 대표적인 결과를 나타낸 것이다. 앞서도 언급하였듯이 현장에서 지중 열전도도를 측정할 때 순환유체의 입·출구 온도와 열 입력량 등을 측정하게 되며, 경우에 따라서는 순환유체의 유량을 측정하기도 한다. 이들 데이터와 입·출구온도의 평균 온도를 그래프로 표현하면 Fig. 2의 (a)와 같다. 또한 시험 중 순환유체의 입·출구 온도차를 일정하게 유지하기 위해 순

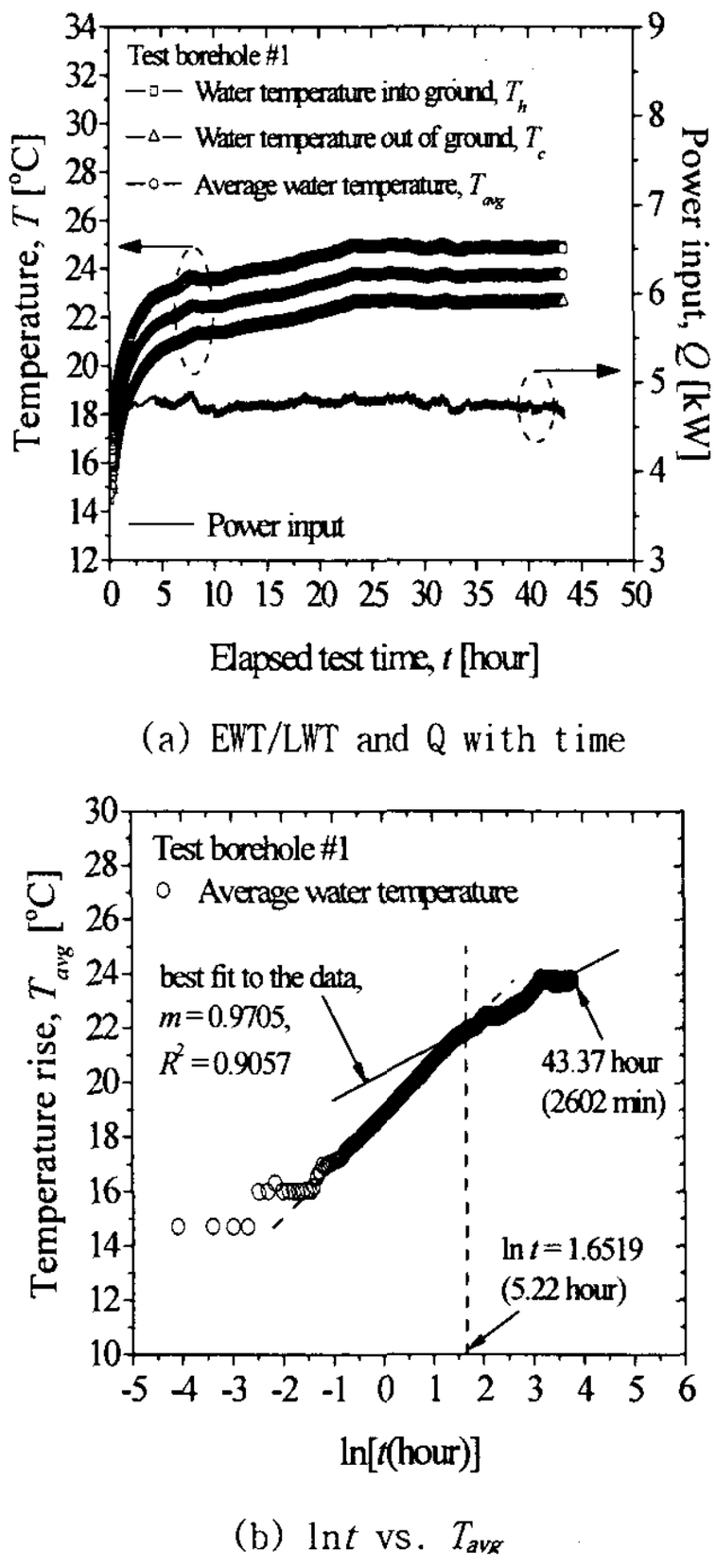
환유체에 공급하는 열량을 최대한 일정하게 유지해야 하며, 본 측정에서는 평균 2.3℃였다.

Fig. 2의 (b)는 시험 시간의 자연로그 값을 가로축으로 하여 순환유체의 평균 온도 변화를 나타낸 것이다. 선형열원 모델을 적용하여 지중 열전도도를 산정할 때, 경우에 따라서는 여러 개의 기울기가 나타날 수 있다. 본 시험 결과에서는 2개의 기울기를 보였으며, 대략 6시간 후부터 시험 종료까지 기울기가 거의 일정함을 확인할 수 있었다. 따라서 6시간 후에 획득한 데이터의 접선 기울기(m)와 평균 열 입력량(Q) 그리고 보어홀 길이(L_b)를 식(5)에 대입하여 지중 열전도도를 계산한 결과 각각 1.947 W/m℃였다.

Table 1 Thermal conductivity in various site

	서울 강서	충남 공주	경기 과천	경기 수원	경기 이천
보어홀 길이 (m)	150	180	180	150	150
지중 열전도도 ($W/m℃$)	2.74	2.81	2.37	2.57	2.63

Table 1은 지역별 열전도도 값 중, 대표적인 결과를 정리한 것이며 사용한 그라우팅 재료는 벤토나이트와 실리카샌드이다. 표에서 보듯이 현장 시험조건에서 다소 차이가 있지만, 그라우팅 재료가 거의 유사할 경우 지역별 지중 열전도도 값도 비슷한 값을 보이고 있다. 2007년 7월 현재 지역별로 서울/경기 21개, 충남 6개, 강원 2개, 경남 1개, 경북 2개, 전북 2개, 전남 5개의 열전도도 데이터를 수집하였으며, 데이터베이스의 신뢰성 확보를 위해 계속해서 데이터를 수집하고 있다. 아울러 그라우팅 재료가 지중 열전도도에 미치는 영향을 규명하고, 현장 시험 방법에 대한 기준을 정립하기 위해 10개의 시험용 보어홀을 호서대학교에 시공하였으며, 이에 대한 결과는 추후 논문에서 발표할 예정이다.



(a) EWT/LWT and Q with time

(b) ln$t$ vs. T_{avg}

Fig. 2 Process of thermal conductivity evaluation

Fig. 3는 현재까지 수집된 지역별 열전도도 분포 양상을 표현한 것이다. Fig. 3 에서 서울과 경기도 지역의 지중 열전도도는 대체로 2.0~3.0 W/m℃의 범위에 있었으며, 이 지역의 지질 구조가 거의 동일하며, 또한 시험용 지중열교환기에 주입된 그라우팅 재료의 혼합비율이 거의 유사하여 이와 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다. 다른 지역은 데이터가 많이 수집되지 않았지만, 경기도와 지질구조가 다른 전라남도에서는 지중 열전도도 값이 대체로 3.0~3.99 W/m℃의 범위에 있었다. 이에 대해서는 지질 구조가 측정 결과에 영향을 미친 것으로 판단할 수 있지만, 데이터 분석과정에서 오류가 있는 결과도 모두 도시하였기 때문에 향후 정확한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

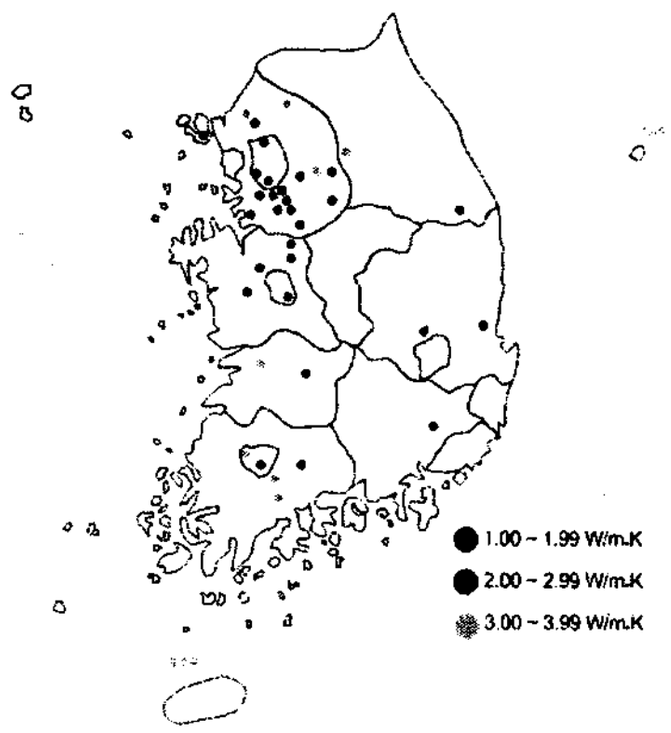


Fig. 3 Regional distribution of thermal conductivity

4. 결 론

본 연구에서는 현장에서 쉽게 사용할 수 있는 국내 지역별 지중 열전도도 데이터베이스를 구축하기 위해 현장에서 열전도도를 측정함과 동시에 공개된 데이터를 확보하였다. 지중 열전도도에 영향을 미치는 주된 요인은 지반 구조와 그라우팅 재료 자체의 열전도도임을 확인할 수 있었다. 본 데이터베이스의 신뢰성을 확보하기 위해 지속적으로 데이터를 수집하고 있으며, 이 데이터베이스를 현장에서 쉽게 이용할 수 있도록 프로그램을 작성하고 있다.

본 연구를 통해 각 지역별 지중 열전도도 데이터베이스가 구축되면, 수직형 지중열교환기의 최적 설계가 가능할 것으로 판단된다. 아울러 사용자가 현장에서 직접 측정한 지중 열전도도 값과 본 데이터베이스 값의 비교를 통해, 사용자의 측정결과를 사전에 검증할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단 신·재생에너지센터의 2006년 신·재생에너지기술개발사업(2006-N-GE02-P-02)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

[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] Martin, C. A. and Kavanaugh, S. P., 2002, Ground thermal conductivity testing control site analysis, ASHRAE Transactions, Vol. 108, pp. 945-952.

[4] Lim, H. J., Kong, H. J., Song, Y. S. and Park, S. K., 2005, Thermal conductivity measurement of grouting materials for geothermal heat ex- changer, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 4, pp. 36 4-369.

[5] 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 Engineer- ing, Vol. 18, No. 10, pp. 783-790.

[6] 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.

[7] 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.