

<응용기술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2016.4.1.043>

ISSN 2288-3991(Online)

【특집섹션: ICT와 지열에너지 융합】

지중 유효 열전도도의 지역별 분포

공형진* · 권순기**† · 지승규***

* 지열인력양성센터, ** 호서대학교 기계공학과, *** 한국에너지공단 신재생에너지센터

A Study on Regional Distribution of the Ground Effective Thermal Conductivity

Hyoung Jin Kong*, Soon-Ki Kwon**† and Seung Gyu Ji***

* Geothermal Energy Education Center, Hoseo Univ.,

** Dept. of Mechanical Engineering, Hoseo Univ.,

*** New & Renewable Energy Center, Korea Energy Agency

(Received December 22, 2015 ; Revised January 20, 2016 ; Accepted February 16, 2016)

Key Words: Ground Source Heat Pump System(지열 히트펌프 시스템), Vertical Ground Heat Exchanger(수직형 지중 열교환기), Thermal Response Test(열응답 테스트)

초록: 지열 히트펌프 시스템은 환경 친화적이고 에너지 절감 시스템으로 알려져 있다. 특히 지중 열교환기는 초기투자비와 시스템 성능을 결정하는 매우 중요한 요소다. 수직형 지열 시스템 설계를 위해서는 현장 열응답 테스트를 통해 지중 유효 열저항을 고려해야 한다. 본 연구에서는 지열이용검토서를 통해 접수된 전국의 지중 열전도도를 지역별로 분석하였다. 전국 평균 지중 열전도도는 2.56 W/mK로 분석되었다. 지중 열전도도가 가장 높은 지역은 서울로 평균 2.68 W/mK이고, 가장 낮은 지역은 부산으로 2.28 W/mK다. 또한 해안을 접하고 있는 지역의 열전도도는 전국 평균에 비해 약 30% 낮다.

Abstract: Ground source heat pump(GSHP) systems is known as environmental friendly and energy saving. Especially a ground heat exchanger is an important unit that determines the thermal performance of a system and initial cost. In design phase of vertical GSHP system, it is recommended that the effective borehole thermal resistance, be determined from in-situ thermal response test. In this study, ground effective thermal conductivity was categorized by a region. As a result of the study, the ground thermal conductivity of national average was analyzed as 2.56 W/mK. The highest regional average of thermal conductivity is 2.68 W/mK in Seoul, and the lowest is 2.28 W/mK in Busan. Also, the thermal conductivity on the coast has been analyzed approximately 30% lower than the average.

1. 서론

전 세계적인 기후변화에 대응하고자 화석연료 사용을 줄이고, 온실가스 저감을 위해 국내에서는 2004년 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급촉진법이 제정되어, 1,000 m² 이상의 공공건물에 예상에너지 사용량의 공급 의무비율 이상을 신재생에너지로 공급토록 의무화하는 제도를 시행 중에 있다. 그리고 매년 의무화 비율을 상향조정하여 확대 보급하고 있다.⁽¹⁾ 특히 여러 신재생에너지 열원 중에서 지열 에너지는 2012년 기준 공공기관에 도입된 신재생에너지의 74%를 차지할 정도로 보급이 확대되고 있다.⁽²⁾ 지열 히트펌프 시스템을 국가 보급사업으로 설치할 경우, 정부에서는 신재생에너지 설비의 지원·설치·관

† Corresponding Author, skkwon@hoseo.edu

리에 관한 기준⁽³⁾에 따라 지열이용검토서를 의무적으로 제출하고 있다.

국내에서는 수직형 지중 열교환기를 이용하는 밀폐형 시스템을 주로 설치하고 있다. 수직 밀폐형 지중 열교환기는 150~200m 깊이로 천공된 보어홀(borehole)에 U자형 고밀도 폴리에틸렌 파이프를 삽입한 후, 파이프와 보어홀 벽면 사이의 빈 공간을 시멘트와 벤토나이트 등의 재료로 그라우팅하여 설치한다. 수직형 지중 열교환기는 전체 시스템의 성능과 초기투자비를 결정하는 주요 요소로서, 파이프 내부를 순환하는 유체와 파이프 주위 지중 토양이나 암반층 사이의 열전달과 밀접한 관련이 있다.

지중 유효 열전도도 측정은 설치비의 대부분이 소요되는 지중 열교환기 성능을 정확히 파악하기 위한 일련의 과정으로서 현장에 설치된 시험용 지중 열교환기를 통해 설계 요소를 파악한다. 이러한 현장 지중 열전도도 테스트에 대한 개념과 구체적인 방법을 Mogensen⁽⁴⁾이 처음 제안하여 지금까지 지중 열전도도 분석을 위해 주로 이용하고 있다.

본 연구에서는 2012년부터 2014년 8월까지 한국에너지공단에 접수된 지열이용검토서 지중 열전도도 측정 결과를 지역별로 분석하여 국내 지중 상황을 파악하고자 한다.

2. 지중 유효 열전도도 측정

2.1 지중 유효 열전도도 측정

지열 히트펌프 시스템의 구성요소는 실내부하, 히트펌프 그리고 지중 열교환기로, 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 그 중에서 설치 현장의 지중 상황에 영향을 받는 지중 열교환기는 전체 시스템의 성능을 결정하는 주요 요소로서, 열교환기 성능은 지중 열교환기 내부의 순환유체와 그라우팅 재료를 통한 지중 지반과의 열전달과 밀접한 관련이 있다.⁽⁵⁾ 수직형 지열 히트펌프 시스템의 개략도는 Fig. 1에 정리하였다.

수직형 지중 열교환기 최적 설계를 위해 지중 열전도도를 분석한 후, 그 결과를 설계에 반영해야 한다. 현장에서 측정하는 유효 열전도도는 지중 상태 그대로의 조건에서 측정하여야 하며, 시험용 지중 열교환기를 현장에 설치한 후, 열원(히터), 순환펌프, 입출구 온도와 소비전력 측정장치와 데이터 로거 등으로 구성된 지중 열전도도 측정 장비를 기 설치된 지중 열교환기 배관과 연결한다.

지중 열전도도 측정은 열교환기 파이프 내부로 히터로 가열된 물을 순환시켜 지중 열교환기 거쳐 환

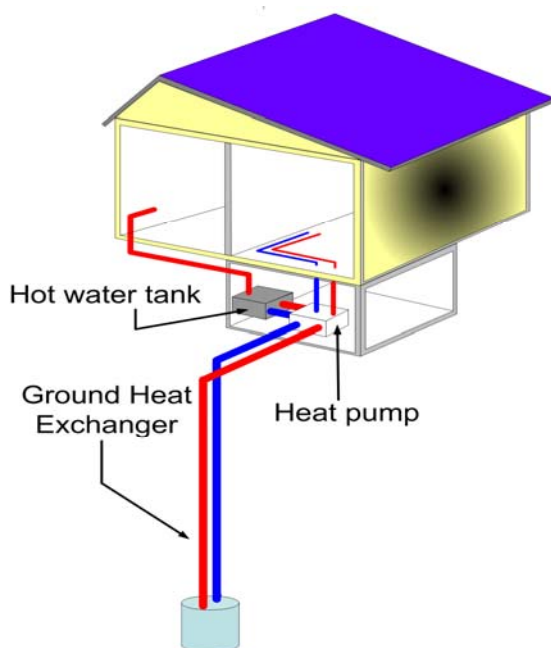


Fig. 1 Schematic of geothermal heat pump system

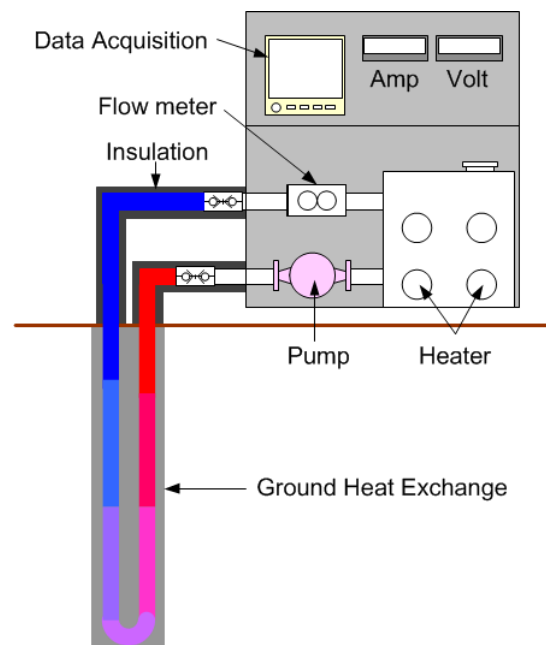


Fig. 2 Schematic of an in-Situ thermal conductivity test unit

수되는 물의 온도차와 유량 그리고 에너지 투입량을 측정하여 분석한다. Fig. 2는 지중 열전도도 측정 장비 개략도를 나타낸 것이다.

2.2 지중 유효 열전도도 분석

지중 열전도도를 산정하는 방법에는 원통열원 모델(cylinder source model)과 선형열원 모델(line source model)이 있다. 이 중에서 선형열원 모델이 원통열원 모델보다 상대적으로 적용하기 용이하기 때문에, 개별 현장에서 측정된 데이터를 이용하여 지중 열전도도를 분석할 때 주로 이용된다.

선형열원 모델은 Kelvin의 무한 선형열원 이론(infinite line source theory)을 바탕으로 하고 있으며 다음 식 (1)과 같다.

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

$T(r,t)$ 는 열원으로부터의 거리 r 과 시간 t 에서의 온도이며, k 는 토양의 열전도도, Q 는 토양으로 전달되는 열전달율, L 은 보어홀 길이로서, 보어홀 단위 길이당 열전달율이 된다. 여기서 적분변수 x_0 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$x_0 = \frac{r^2}{(4\alpha t)} \quad (2)$$

여기서, α 는 $k/\rho c$ 로 정의되는 토양의 열확산율이다. 위 식 (1)의 우변은 지수적분함수이며 다음과 같이 근사식으로 표현한다.

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

식(3)에서 A, B, C, D, E는 각각 0.99999193, 0.24991055, 0.05519968, 0.00976004, 0.00107857이며, γ 는 Euler 상수로서 0.5772다. 식 (1)과 식 (2)의 적분변수 $x_0 = (r^2/4\alpha t)$ 가 매우 적은 수준임으로, 식(3)을 단순화하고, 이를 정리하면 단순 선형열원 모델을 식 (4)와 같다.

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

여기서, 시간의 자연로그에 대해 온도변화를 도식하면 식 (4)는 직선형태를 나타낸다. 따라서, 기울기, 평균 열 투입량과 보어홀 길이를 식 (5)에 대입하여 지중 열전도도를 계산한다.

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

3. 결과 및 고찰

지열이용검토서에 첨부된 지중 열전도도 측정 결과보고서를 바탕으로 전체 879개 현장의 열전도도 분석 결과는 다음과 같다. Fig. 3은 지역별 평균 열전도도 분포도이고, Fig. 4는 국내 지질도다.

전국 평균 열전도도는 2.56 W/mK로서, 서울지역은 2.68 W/mK, 대전 2.67 W/mK, 강원 2.65 W/mK, 충북 2.61 W/mK로 전국 평균 대비 약 2% ~ 4% 크다. 대구, 세종, 경기, 경상남북도, 전남, 충남 등이 2.5 W/mK ~ 2.6 W/mK 범위다. 그리고 인천, 광주, 전북 등이 2.4 W/mK ~ 2.5 W/mK로 전국 평균이하를 나타냈으며, 부산지역은 2.28 W/mK로 지역별 평균에서 가장 낮다. 그러나 제주도는 수직형 지중 열교환기를 이용한 지열 히트펌프 시스템이 설치되지 않아 지중 열전도도 측정 결과가 없다.

Table 1은 지역별 열전도도 측정 현장 개수와 최저, 최고 및 평균 열전도도를 정리한 것이다.

경기지역이 가장 많은 설치현장(163곳)을 보유하고 있으며, 성남 및 화성에서 최저 2.0 W/mK, 김포에서 최대 4.85 W/mK로 측정되었다. 그리고 평균 2.58 W/mK로 전국 평균대비 약 1% 크다. 전남지역의 설치현장은 84곳으로 영암이 1.66 W/mK, 목포가 4.4 W/mK이고, 평균 2.59 W/mK다. 서울은 82곳에서 평균 2.68 W/mK로 가장 높은 평균값을 보이며, 용산이 최저 2.04 W/mK이고, 은평이 6.52 W/mK로 전국에

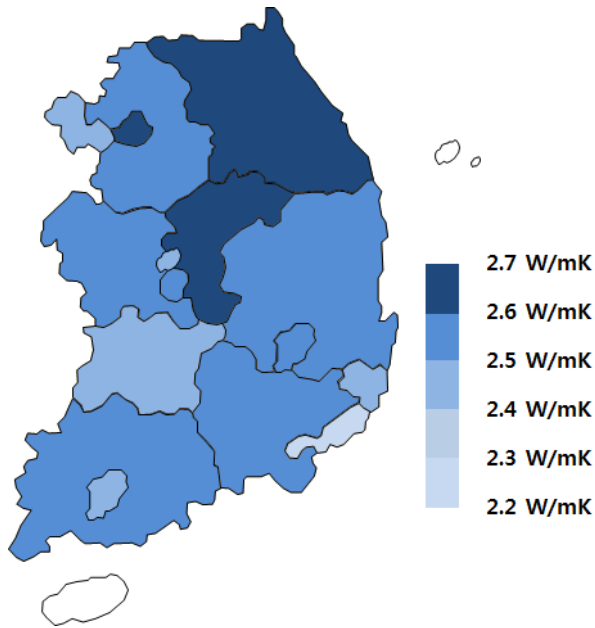


Fig. 3 Regional distribution of thermal conductivity

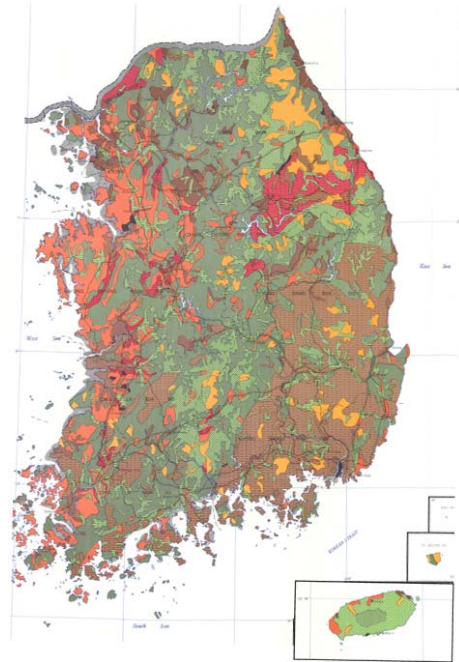


Fig. 4 Geology map of Korea

서 가장 높은 열전도도로 분석되었다.

지중 열전도도 측정결과가 4.0 W/mK이상의 현장은 서울, 충남 충북, 강원 등 전국 12곳이고, 2.0 W/mK이하의 현장은 전국에서 28곳으로 충남 서천, 경남 진주, 경북 포항, 울산, 부산 및 경북 안동, 전북 진안 등이다.

전국에서 가장 낮은 열전도도는 경북 포항과 전남 영암이 1.66 W/mK, 충남 서천 1.73 W/mK로 전국 평균 대비 65% 수준이며, 대부분 해안가에서 측정된 결과다. 이는 고효율 그라우팅 재료(열전도도 1.0 W/mK 이상)를 적용했음에도 불구하고, 해수에 의한 영향으로 낮은 열전도도를 나타내는 것으로 분석되었다. 그리고 광주, 전북 진안, 경북 안동 및 대구 등 내륙 일부지역에서도 2.0 W/mK이하의 열전도도를 나타낸다. 이는 Fig. 4의 지질도에서 이들 지역을 비교하면 충적층(entisols)이 위치한 지역과 유사하다.

Table 1 Regional distribution of ground effective thermal conductivity

Region	Number of sites	Thermal conductivity(W/mK)		
		Minimum	Average	Maximum
Seoul	82	2.04	2.68	6.52
Busan	18	1.93	2.28	2.76
Daegu	35	1.96	2.53	5.21
Incheon	38	1.95	2.43	3.49
Gwangju	30	1.96	2.42	3.27
Daejeon	37	2.0	2.67	3.68
Ulsan	22	1.82	2.45	2.88
Sejong	58	2.0	2.56	3.16
Gyeonggi	163	2.0	2.58	4.85
Gangwon	46	1.94	2.65	5.07
Chungbuk	62	2.0	2.61	5.93
Chungnam	65	1.73	2.51	4.30
Jeonbuk	51	1.87	2.45	3.37
Jeonnam	84	1.66	2.59	4.40
Gyeongbuk	54	1.66	2.57	5.30
Gyeongnam	34	1.99	2.54	3.67

지중 상태에 따라 지중 열전도도는 많은 영향을 받는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 지열 히트펌프 시스템이 설치되는 현장에서 측정되어 지열이용검토서에 첨부된 지중 열전도도를 지역별로 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 국내 지중 열전도도는 평균 2.56 W/mK다.
- (2) 서울지역의 지중 열전도도는 평균 2.68 W/mK, 최대 6.52 W/mK로 전국에서 가장 높다.
- (3) 부산지역의 지중 열전도도는 평균 2.28 W/mK다.
- (4) 국내에서 가장 낮은 지중 열전도도를 나타낸 지역은 경북 포항, 전남 영암으로 1.66 W/mK다.
- (5) 해안가와 충적층 지역의 지중 열전도도는 타 지역에 비해 낮은 수준으로, 지중 상황이 열전도도 측정 결과에 영향을 미친 것으로 분석된다.

향후 현장별 그라우팅 재료의 열전도도와 지중 초기온도의 영향을 규명하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 30123010111750)

참고문헌 (References)

- (1) MOTIE, 2014, New & Renewable Energy White Paper, KEMCO, Yongin.
- (2) KEMCO, 2014, New & Renewable Energy Statistics 2013(2014 edition), KEMCO, Yongin.
- (3) MOTIE, 2015, Act on the Promotion of the Deployment Use and Diffusion of New and Renewable Energy, KEMCO, Yongin.
- (4) Mogensen, P., 1983, Fluid to Duct Wall Heat Transfer in Duct System Storages, Proceedings of International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice. Swedish Council for Building Research, June 6-8.
- (5) Kavanaugh S. P. and Rafferty K., 1997, Ground Source Heat Pumps - Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings, ASHRAE, Atlanta.