

지중열전달특성 평가에 관한 해석 및 실험적 방법에 관한 연구 - 지중 열물성치 및 보어 홀 열 저항 평가 -

박 준언¹⁾, 백 남춘²⁾

Study on Analytical and Empirical Methods for Assessing Geo-Heat Transfer Characteristics

Jun-n Park, Nam-Choon Baek

Key words : Geo-Thermal(지중열), Heat Pump(열펌프), Line source method(라인소스방법), Geo Thermal conductivity(지중열전도도), Geo Thermal diffusivity(지중열확산계수), Labview DAS(랩뷰 데이터취득시스템), Borehole System(보어홀시스템)

Abstract : This study treats the advantage of in situ line source method measuring the heat transfer capacity of a borehole, using mobile equipment, to determine the thermal properties of the entire borehole system such as thermal conductivity, diffusivity, volumetric heat capacity, and borehole thermal resistance. The results from the response test include not only the thermal properties of the ground and the borehole, but also conditions that are difficult to estimate, e.g. natural convection in the boreholes, asymmetry in the construction, etc. In this study, 1)theoretical in situ methods for assessing working fluid temperature variation in U-type PE tube have been introduced, and 2)TRTE(Thermal Response Test Equipment) has been built based on these kinds of theoretical in situ methods. Basically TRTE consists of a pump, a heater and temperature sensors for measuring the inlet and outlet temperatures of the borehole. In order to make equipment easily transportable it is set up on a small trailer. Since the response test takes above two days to execute, the test was fully automatic in recording measured data using Labview DAS(Data acquisition system) program. The test was demonstrated in the course of intensive research in this field through the one site at Ulsan city in Korea. From this kind of thermal properties test of borehole systems in situ, the design of the borehole system can be optimized regarding the total geological, hydro-geological and technical conditions at the location.

Nomenclature

T : 온도 [K]
 ΔT : 온도차 [K]
 r : 반경 [m]
 F_o : 푸리에수
 C_v : 지중의 정적비열 [kJ/kg-K]
 t : 경과 시간 [s]
 \dot{q} : 단위 길이 당 열공급율 [W/m]
 R : 보어 홀 열저항 [K/(W/m)]
 \dot{Q} : 열수로의 히트열공급율, 열수의 획득열,
 $\dot{m}C_p(T_{in} - T_{out})$ [W]
 \dot{m} : 열수의 유량 [kg/s]
 C_p : 열수의 정압비열 [kJ/kg-K]
 L : 보어홀 지중 설치 깊이[m]
 A, B : 상수[-]
 k : 지중 열전도도 [W/m-K]

a : 지중 열확산계수, $k/\rho C_v$ [m²/s]
 ρ : 지중 밀도 [kg/m³]
 β : 적분 매개변수, $r_b/2\sqrt{a(t-t')}$
 γ : 오일러 상수, 0.5772
 τ : 자연로그, $\ln t$

subscript

grd : 지중
 b : 보어홀
 $fluid$: U-형 이중관 열수 평균
 in : U-형 이중관 열수 입구
 out : U-형 이중관 열수 출구^①

-
- 1) 한국에너지기술연구원
 E-mail : jupark@kier.re.kr
 Tel : (042)860-3798 Fax : (042)860-3538
 2) 한국에너지기술연구원
 E-mail : baek@kier.re.kr
 Tel : (042)860-3535 Fax : (042)860-3538

1. 서론

국내 총 에너지 소비량 중 건물분야 소비에너지는 약 25%로 매년 그 비율이 증가하고 있으며, 국내 주거용 건물의 에너지성능지수는 보통 연간 200 Mcal/m²을 나타내고 있고 이중 약 45% 정도가 난방에너지로 소요되고 있다. 이러한 연유로 1977~2002년에 걸쳐 OECD 중심의 국제에너지협의회 IEA Task를 결성하여 태양에너지 활용 건물 냉·난방 요소설비를 적용한 건물 냉·난방 에너지 소비 저감 기술에 대한 개발 및 적용 보급화 사업을 진행하고 있으나 불안정한 태양열의 공급과 저효율 및 경제성 문제로 인하여 보급화 사업의 문제가 제기되어져왔다. 이에 대한 해결 방안의 일환으로 년중 일정 온도 공급 패턴을 지니고 있는 하천수, 해수 및 지중열과 같은 미개발/ 미활용 에너지를 열소스로 사용하는 히트펌프의 필요성이 대두되고 있다.

이러한 열소스 중에서도 지중열을 이용하는 지열원식 히트펌프 시스템은 과거의 외기 열원식 히트펌프가 동절기 작동이 불가능하거나 작동이 가능하더라도 성능이 낮아 단순히 사용이 크게 제한된 어려운 작동 운영상의 문제점을 개선시킬 수 있는 시스템이다. 이 시스템은 지열이용 고밀도 폴리테렌관을 지중 일정 깊이 까지 설치하여 난방시 지중의 열을 열원으로 하거나 냉방시 열싱크로 해서 히트펌프가 온열과 냉열뿐만 아니라 급탕온수를 생산하는 다목적용 시스템이다. 이 지중열원식 히트펌프시스템은 기존 냉·난방시스템보다 전기 에너지소비를 20~50% 줄일 수 있는 에너지절약형 냉·난방시스템으로써 미국 에너지성은 지중열원식 히트펌프의 보급 확대 사업 일환으로 지구보전 프로그램(NECP)과 연방에너지관리프로그램(FEMP)을 수립하였다. 이 프로그램을 통하여 지중열원식 히트펌프 시스템의 보급 사업 아래 지원 주택 및 대규모 공공시설에서의 냉난방 및 급탕 에너지 절약효과를 보고 있다. 아울러 국내에서도 냉난방 에너지 저감기술인 지중열원식 히트펌프 시스템 기술의 개발 및 적용 보급이 요구되고 있다.

지중 매설형 지중열원식 히트펌프 시스템의 일정 이상의 냉·난방 열 성능 확보와 보어홀 타공비에 소요되는 초기투자비 저감을 위한 지중열원식 히트펌프 설계자의 관심과 문제 현안은 지중열물성치(열전도도, 열확산계수 및 열용량)와 현장 보어홀 열 저항 측정을 통한 최적의 보어홀 설치 변수(설치간격, 설치개수, 설치깊이)산정에 있다.

본고의 목적은 이와 같은 지중열물성치 및 보어홀 열저항을 고려한 최적의 보어홀 설치 변수 산정을 위한 선행 연구로서 진행된 1)실험적 방법을 소개하며, 2)실험 데이터로부터 지중열물성치 및 보어홀 열저항 평가용 해석 모델을 소개하며, 3)실험적 방법에 의하여 평가된 현장 측정 결과를 소개하는 데에 주안점을 두었다.

2. 2장 본론

2.1 절 보어홀 시스템

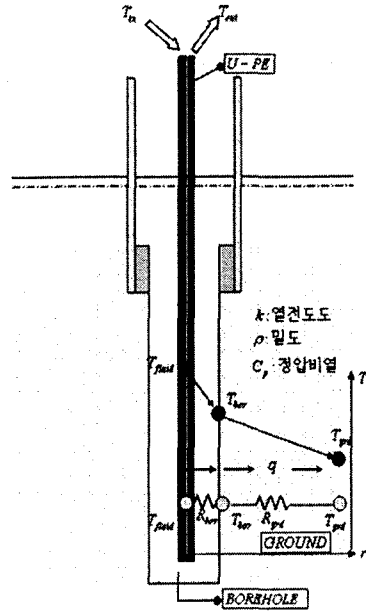


Fig. 1 Thermal resistance between circulating fluid and ground

지중 매설형 지열원식 히트펌프 시스템은 응축부의 방열에너지와 증발부의 흡열에너지를 하계시 열싱크(heat sink)와 동계시 열소스(heat source)로서 지중열을 이용하는 시스템이다. 지중 보어홀 시스템의 구성은 보어홀, 열수 순환용 U-형 폴리테렌 이중관, 지중 및 그라운드(보어홀과 튜브사이 고정매김 역할)로 이루어진다(Fig.1 참고). 지중열원식 히트펌프 시스템의 냉·난방 열 성능 확보를 위해서는 열수로부터 지중으로의 효율적인 방열(하계)과 흡열(동계)이 이루어져야 하며, 흡열 및 방열량은 열수와 지중온도사이 열저항에 의하여 결정된다. 열수와 지중온도사이 열저항은 열수와 보어홀 외경사이의 열저항^②과 보어홀 외경에서 지중으로의 열저항^③으로 구성된다.

2.2 절 실험적 방법

중전의 지중 열전도 산정은 1)현장의 대표 기반암의 문헌자료를 이용하거나, 2)현장 지중의 일부 지질샘플을 대상으로 국한된 실험적 측정을 통하여 이루어졌다. 그러나 이러한 방법은 현장 조건을 적절히 고려치 않음으로 인하여 상대적으로 큰 오차 요인을 지니고 있다. 특히 일부 지질샘플을 대상으로 한 실험적 방법은 설치 보어홀의 비직선형 구조, 지질 기반암 구조의 이질성 및 파쇄형, 지중 수분 함유량과 같은 현장 지중 조건으로 인하여 지중 열전도 산정에 있어 상대적 오차를

② 열수와 이중관 사이 대류 열저항, 이중관의 전도열저항, 이중관과 보어홀 사이의 전도 열저항 및 보어홀 그라운드의 전도열저항으로 구성
③ 지중열전도와 지중열용량비로 표현되는 지중열확산계수

발생하고 있음이 알려져 있다(Fig. 2 참고). 따라서 현장의 실 지질구조를 감안하여 보다 더 정확한 지중열물성치 산정을 위해서는 일정 열수유량과 히트 열 공급율에 따른 현장 열수의 온도변화를 측정하는 현장용 실험 장치가 일차적으로 필요하며 아울러 측정된 실험 데이터로부터 지중열물성치와 보어 홀 열 저항 평가를 위한 해석모델이 필요하다.

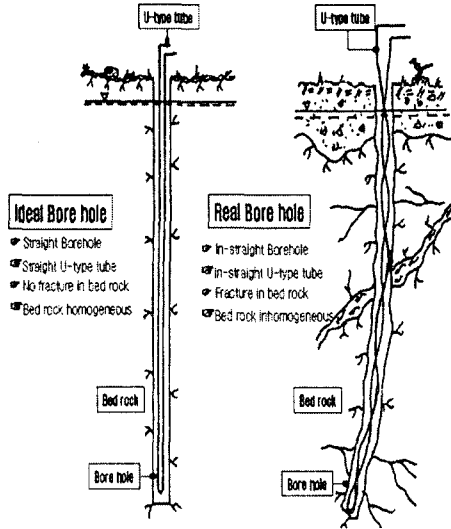


Fig. 2 Schematic diagram of the ideal borehole and the actual borehole

2.2.1 실험 장치

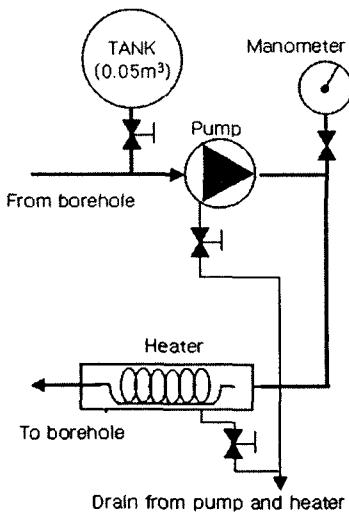


Fig. 3 Schematic diagram of TRIE. 2005

실험장치 TRIE는 열수순환용 펌프, 열수공급용 버퍼탱크, 전기히터, 유량계 및 U-형 이중관 입·출구 연결 배관으로 구성되어있으며, 현장 이

동성 확보를 위하여 트레일러에 탑재되도록 설계 제작하였다(Fig. 3 참고).

TRIE 장치의 U-형 이중관 입·출구 온도와 유량 및 히트 소비전력 측정을 위하여 사용된 센서(transducer)는 Table. 1과 같다.

Table. 1 Specification of transducer

센서종류	설치위치 및 채널수
저항온도계(4-Wire 100옴 백금)	
RTD-1	지중입구/104
RTD-2	지중출구/105
유량계	
M-1	VANE 유량계/103
전력량계(동력측정)	
전압 전류	220V,101 CURRENT PROBE,102

데스크탑으로의 데이터 취득은 Agilent 34970A/34902A Multiplex Module과 시리얼 통신인 RS232C 직렬 통신 케이블을 이용하여 Labview 7.1을 기반으로 구성하였다(Fig. 4, Fig. 5 참고).

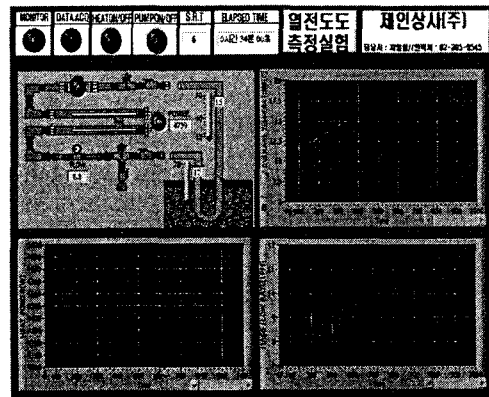


Fig. 4 Labview front panel of TRIE

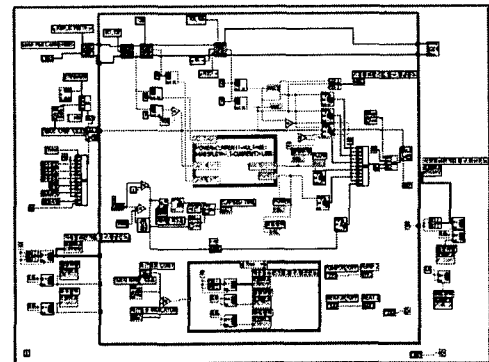


Fig. 5 Labview block diagram of TRIE

2.2.2 해석 모델

상기의 실험장치를 통한 데이터를 근거로 지중 열물성치와 보어홀 열 저항 평가는 Fourier's 열전도 법칙에 근거한 해석모델(라인소스^{(1),(2)}와 실린더소스)과 수치모델⁽³⁾⁻⁽⁸⁾에 이루어진다. 특히 본 연구에서는 반경 방향으로 열전달만을 고려하는 무한길이 라인형소스모델을 사용하였다.

라인소스로부터 입의 반경 위치에서의 시간변위에 대한 온도증가는 식 (1)과 같이 단위 길이당 라인소스에 의한 열공급율과 지중열확산계수가 일정할 경우 경과 시간만의 함수로 표현된다. 따라서 라인소스로부터 보어홀 벽면의 온도증가는 식 (1')의 형태로 표현된다.

$$\Delta T(r, t) = \frac{\dot{q}}{4\pi k} \int_{r/2\sqrt{at}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \quad (1)$$

$$\Delta T(r_b, t) = \frac{\dot{q}}{4\pi k} \int_{r_b/2\sqrt{at}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \quad (1')$$

푸리에수에서 경과시간 t 가 ($4r_b^2/a$)보다 클 경우 라운드오버를 고려한 보어홀 외벽의 온도 변화는 아래 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\Delta T(r_b, t) = \frac{\dot{q}}{4\pi k} \left[\ln\left(\frac{4at}{r_b^2}\right) - \gamma \right] \quad (2)$$

반경 r 이 0인 라인소스(열수)와 보어홀 사이의 저항을 고려한 열전달은 식 (3)의 형태로 표현된다.

$$\frac{(T_{out} + T_{in})}{2} - T(r_b, t) = T_{fluid}(r_0, t) - T(r_b, t) = R_b \times \dot{q} \quad (3)$$

경과시간에 대한 열수의 온도변화는 식 (4)의 형태로 표현된다.

$$T_{fluid}(r_0, t) - T_{fluid}(r_0, t_0) = \Delta T_{fluid} = \dot{q} \left[R_b + \frac{1}{4\pi k} \left[\ln\left(\frac{4at}{r_b^2}\right) - \gamma \right] \right] \quad (4)$$

실험 전 $T_{fluid}(r_0, t_0)$ 의 온도는 지중온도 T_{grd} 와 동일하므로 시간경과에 따른 열수의 온도변화를 나타내는 식 (4)는 아래 식 (5)의 형태로 표현된다.

$$T_{fluid}(r_0, t) = \frac{\dot{Q}}{4\pi kL} \ln(t) + \frac{\dot{Q}}{L} \left[\frac{1}{4\pi k} \left[\ln\left(\frac{4a}{r_b^2}\right) - \gamma \right] - R_{bor} \right] + T_{grd} \quad (5)$$

$T_{fluid}(r_0, t)$ 와 $\ln(t)$ 를 제외한 나머지 항은 모두 상수이므로 식 (5)는 일차 선형식 (6)의 형태로 단순화된다.

$$T_{fluid} = A \ln(t) + B = A\tau + B \quad (6)$$

$$A = \frac{\dot{Q}}{4\pi kL} \quad (7)$$

$$B = \frac{\dot{Q}}{L} \left[\frac{1}{4\pi k} \left[\ln\left(\frac{4a}{r_b^2}\right) - \gamma \right] - R_b \right] + T_{grd} \quad (8)$$

지중열물성치와 보어홀의 열저항평가는 보어홀 직경, U-형 이중관 설치 깊이, 초기지중온도, 히트열공급율 및 열수순환유량을 근거로 실측치 실험으로부터 우선 열수온도선도를 산정한다. 이렇게 산정된 선도를 근거로 해석모델 식 (6), (7) 및 (8)을 통하여 평가되어진다.

2.3 실증시험

TRIE 실험장치의 현장 시험으로 지중열원식 히트펌프 시스템 설치 예정지인 울산 태연학교를 대상으로 하였다. 일차적으로 실험테이로부터 열수 온도선도를 산정하였다. 이온도 선도를 식(5), (6)의 형태로 바꾸어 보어홀 열저항과 지중열물성치를 평가하였다. 보어홀 사양과 실험 조건은 아래와 같다(Table. 2 참고).

Table. 2 Specification borehole and experimental condition

보어홀사양		
항목	수치	단위
보어홀 직경, r_b	0.5	m
U-형 이중관 직경	0.1	m
U-형 이중관 깊이, L	150	m
실험조건		
초기지중온도 ^④ , T_{grd}	15	℃
측정 시간, t	80	hr
히트열공급율, \dot{Q}	13	kW
열수 순환 유량, \dot{m}	20	LPM

Fig. 6은 실험 시작후 4시간 경과후 시간대비 열수의 유량, 입·출구 및 평균 온도와 히트열공급율의변화를 나타내고 있다. 적용 유량과 열공급율에 대한 열수의 입출구 온도차는 3℃ 정도를 유지하고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 경과 시간을 진수로하는 자연로그 시간대비 열수의 평균 온도 선도를 나타내고 있다. 열수 평균온도 선도의 기울기 A(식 (6) 참고)는 1.9로 평가되었다. 지중열전도도는 Fig. 7 선도 기울기와 열공급율, U-형 이중관 깊이로부터 관계식 (6')에 의하여 열전도도 k 는 3.4 W/m·K로 평가되었다.

Fig. 8은 열수와 보어홀 외경사이의 열 저항 추정 결과 치를 나타내고 있다. 보어홀 열저항은 가정(예, $R_b = 0.01, 0.02, 0.03$ K/(W/m))치 선도가 Fig. 7 실측치 선도와 일치되는 경우의 값으로 R_b 는 0.02로 산정되었다.

열확산계수는 특정 자연로그시간 τ 에 대해서 지중열전도 3.4W/m·K, 보어홀 열저항 0.02, 열공

④ 지중 초기온도의 측정 방법은 히트 작동을 정지한 채 일정 유량하에 시간 경과에 따라 U-형 이중관에서의 열수의 입·출구온도가 같아질 때 이때의 온도를 측정한다.

급출 13kW, 초기지중온도 15℃, 오일러상수 0.5772, U-형 이중관 깊이 150mm, 보어홀 직경 0.5m를 식 (5)에 대입하여 평가하였다. 지중열확산계수 α 는 $0.75 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 평가되었으며 지중 열용량 ρC_p 는 $2.4 \text{ MJ}/\text{m}^3\text{-K}$ 로 산정되었다.

3. 결론

본 연구에서는 지중온도의 안정적 공급과 이에 따른 지열원식 히트펌프시스템의 열성능 확보와 보어홀 타공에 소요되는 초기투자비 절감을 위한 선행 기반 연구로서 열수온도 변화, 지중열물성치 및 보어홀 열저항 평가를 위하여,

- 1) 라인소스 모델 소개,
- 2) 실증시험장치 TRTE 소개,
- 3) TRTE 활용 현장 예비 측정 연구 결과를 소개하였다.

울산 현장을 대상으로 한 연구결과로서,

1. 지중열전도도는 $3.4 \text{ W}/\text{m-K}$ 로 평가되었다. 이 값은 울산 현장의 지중 기반암이 편마암 $3.5 \text{ W}/\text{m-K}$ 인 것으로 보아 상대적으로 정확히 열전도도 측정이 이루어진 것으로 판단된다.
2. 보어홀 열저항은 0.02로 추정되었다. 이 값은 U-형 이중관 재질, 메김재 그라우트, 보어홀 재질을 고려할 때 적절하게 추정된 값으로 판단된다.
3. 지중열전도도와 보어홀 열저항 값을 근거로 한 지중 열확산계수는 $1.56 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 평가되었으며 아울러서 지중 열용량은 $2.178 \text{ MJ}/\text{m}^3\text{-K}$ 로 산정되었다.

상기의 라인소스 모델과 TRTE 실험 장치를 통하여 히트펌프 설치 대상 예정 지역의 냉·온열 공급 능력을 고려한 보어홀의 설치 개수, 간격 및 깊이 등의 설계변수를 최적화함으로써 히트펌프시스템의 열성능 확보와 보어홀 타공비에 소요되는 초기투자비 절감의 효과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

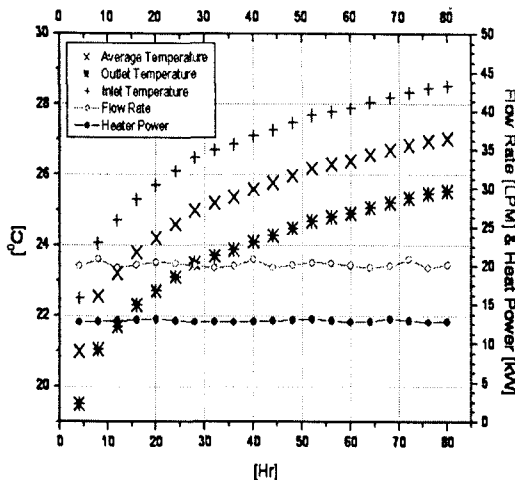


Fig. 6 Fluid temperature from TRTE at Ulsan, versus time

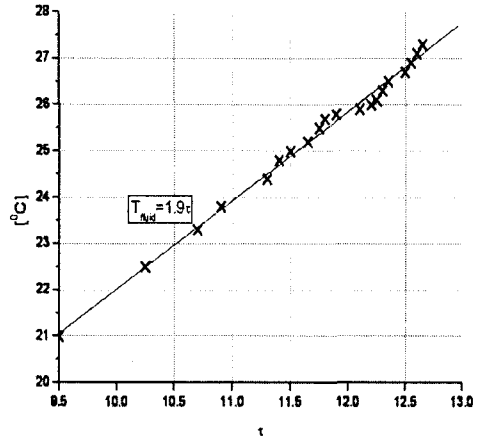


Fig. 7 Mean fluid temperature from TRTE at Ulsan, versus τ

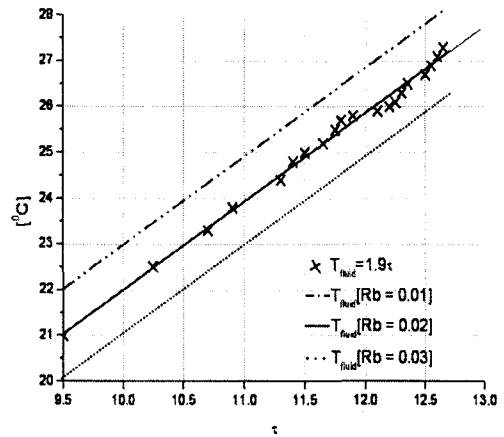


Fig. 8 Mean fluid temperature from TRTE at Ulsan, versus τ . $\kappa=3.7 \text{ W}/\text{m-K}$ and $R_b=0.02 \text{ K}/(\text{W}/\text{m})$

References

1. Kelvin, Sir W. Thomson, 1982. Mathematical and physical papers II.
2. Ingersoll, L.R., Zobel, O.J. and A.C. Ingersoll, 1954. Heat conduction with engineering, Geological and other applications. New York: McGraw-Hill.
3. Eskilson P. (1987). Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Ph.D. Thesis, Lund-MPh-87/13. Dept. of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Sweden.
4. Hellstrom, G.(1991). Ground heat storage, Thermal analysis of duct storage systems: Part I. University of Lund, Dept. of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Sweden.
5. Hellstrom, G.(1989). Duct ground heat storage model: manual for computer code.

- University of Lund, Dept. of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Sweden.
6. Muraya, N.K., 1995. Numerical modelling of the transient thermal interface of vertical U-tube heat exchangers. ph.D Thesis, Texas A&M University, College Station TX.
 7. Shonder, J.A., J.V. Beck. 1999. Determining effective soil formation thermal properties from field data using a parameter estimation technique. ASHRAE Transactions. 105(1):458-466.
 8. Spitler, J.D., S.J. Rees, C. Yavuzturk. 1999. More comments on In-situ Borehole Thermal Conductivity Testing. The Source. Vol.12, No.2, March/April 1999, pp.4-6
 9. Eskilson P. (1987). Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Lund-MPh-87/13. Dept. of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Sweden.
 10. Hellstrom G. (1994). Fluid-to-Ground Thermal Resistance in Duct Ground Heat Storage. Proc. Calorstock'94. Espoo, Finland, August 22-25, 1994, p.373-380.
 11. Mogensen P. (1983). Fluid-to-Duct Wall Heat Transfer in Duct System Heat Storages. Proc. Int. Conf. On Subsurface Heat Transfer Storage in Theory and Practice. Stockholm, Sweden, June 6-8, 1983, p. 652-657.