

Modified TOUGHREACT를 이용한 지중 열교환기 내 순환 유체의 온도 분포 추정

김 성균¹⁾, 배 광옥²⁾, 이 강근³⁾, 심 병완⁴⁾, 송 윤호⁵⁾

A Study to Calculate Inlet Fluid Temperature of the Borehole Heat Exchanger (BHE) using Modified TOUGHREACT

Seong-Kyun Kim, Gwang-Ok Bae, Kang-Kun Lee, Byoung-Ohan Shim, Yoonho Song

Key words : Borehole heat exchanger (지중 열교환기), Geothermal heat pump (지중 히트 펌프), TOUGHREACT (TOUGHREACT)

Abstract : Inlet fluid temperature of the BHE in the geothermal heat pump system depends on heat exchange rate between the refrigerant of the heat pump and the leaving fluid from the BHE. Because the outlet fluid temperature of the BHE varies with time, inlet fluid temperature has to vary with time. In this study, the module to calculate inlet fluid temperature is developed, which can consider the time-varying outlet fluid temperature and the heat exchange capacity of the heat pump. It is assumed that heat loss or gain of the leaving fluid from outlet to inlet of the BHE is negligible, except when the fluid contacts with the refrigerant of the heat pump. This module is combined with TOUGHREACT, a widely accepted three-dimensional numerical simulator for heat and water flow and geochemical reactions in geothermal systems and is applied to data analyses of the thermal response test.

Nomenclature

V_n : arbitrary subdomain
 Γ_n : closed surface
 M : mass or energy per volume
 F : mass or heat flux
 q : sink or source
 n : normal vector on surface element $d\Gamma_n$, pointing inward into V_n
 ρ_w : water density
 u_w : Darcy velocity of water
 k : intrinsic permeability
 μ_w : water viscosity
 P_w : water pressure
 g : gravitational acceleration
 λ : thermal conductivity
 T : temperature
 h_w : specific enthalpy of water
 h : heat transfer coefficient
 Q : heat exchange rate
 c_f : specific heat of fluid
 q_f : flow rate of fluid
 ρ_f : density of fluid

superscript

K : labeling the mass or heat components

1. 서론

건물의 냉난방에 소모되는 에너지를 줄이기

-
- 1) 서울대학교 지구환경과학부
E-mail : kskinc@hanmail.net
Tel : (02)873-3647 Fax : (02)873-3647
 - 2) 서울대학교 지구환경과학부
E-mail : gokbae@snu.ac.kr
Tel : (02)873-3647 Fax : (02)873-3647
 - 3) 서울대학교 지구환경과학부
E-mail : kkleee@snu.ac.kr
Tel : (02)873-3647 Fax : (02)873-3647
 - 4) 한국지질자원연구원
E-mail : boshim@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3055
 - 5) 한국지질자원연구원
E-mail : song@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3175

위해 폐쇄형 지중 히트 펌프 시스템 (closed-loop geothermal heat pump system)이 세계적으로 널리 보급되고 있다. 이 시스템은 크게 건물 내부의 열을 건물 외부로 이동시키는 히트 펌프와 건물 외부로 이동된 열을 땅 속으로 전달하는 지중 열교환기로 구성된다. 주로 100 - 300 m 깊이의 관정에 두 개의 U자형 튜브 (U-튜브)를 설치하고 빈 공간을 그라우트로 채워서 U-튜브를 따라 물과 같은 유체를 흘려 땅과 열을 교환하는 장치를 지중 열교환기라 한다. 지중 열교환기를 순환하는 유체는 지상 구간에서 히트 펌프의 냉매와 열을 교환하여 온도가 높아지거나 (여름) 낮아진 후 (겨울) 다시 지하 구간으로 들어가게 된다.

이전에 수행되었던 Modified TOUGHREACT를 이용하여 지중 열교환기의 성능을 예측하는 시뮬레이션에서는 지중 열교환기로 들어가는 유체의 온도를 시간에 대해 일정하다고 두었다. 하지만 실제 시스템에서는 지상에서 지중 열교환기로 들어가는 유체의 온도는 지중 열교환기에서 지상으로 나가는 유체의 온도와 히트 펌프의 냉매로부터 얻거나 잃은 열량에 따라 달라진다.

이 연구에서는 이러한 영향을 반영하여 들어가는 유체의 온도를 자동으로 계산해주는 모듈을 개발하여 Modified TOUGHREACT를 이용한 지중 열교환기의 성능 예측 시뮬레이션에 적용하여 보았다.

2. 지배 방정식

시간 t 에서 지중 열교환기로 들어가는 유체의 온도 T_{in} 는 식 (1)과 같이 계산될 수 있다.

$$T_{in}(t) = T_{out}(t^*) + \frac{Q}{c_f q_f \rho_f} \quad (1)$$

$T_{out}(t^*)$ 는 시간이 t^* 일 때 지중 열교환기로부터 나오는 유체의 온도 ($^{\circ}\text{C}$)를 나타낸다. 시간 t^* 는 모델에서 이전 타임스텝의 시간을 나타낸다. $T_{in}(0)$ 는 지상의 온도로 설정하였고 순환하는 유체가 히트 펌프의 냉매와 만날 때만 열의 출입이 발생한다고 가정하였다.

대수층과 지중 열교환기 내부에서의 질량과 열의 이동에 대한 지배방정식은 식 (2)-(4)와 같다.¹⁾

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} M^k dV_n = \int_{\Gamma_n} F^k \cdot n d\Gamma_n + \int_{V_n} q^k dV_n \quad (2)$$

$$F_w = \rho_w u_w = -\frac{k\rho_w}{\mu_w} (\nabla P_w - \rho_w g) \quad (3)$$

$$F_h = -\lambda \nabla T + h_w F_w + h(T^* - T) \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)는 각각 질량과 열의 이동에 대한 플럭스를 나타낸다. 질량의 이동은 Darcy의 법칙에 따라 계산되고 열의 이동은 전도, 대류, 그리고 열전달 효과만을 고려하고 복사의 효과는 무시했다.

3. 결과

3.1 시간 간격 테스트

지중 열교환기로 들어가는 유체의 온도 (inlet에서의 온도)는 implicit method를 사용하여 계산하면 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있지만 계산 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다.²⁾ explicit method를 사용하여도 결과에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 이 연구에서는 explicit method를 사용하여 지중 열교환기로 들어가는 유체의 온도를 계산하였다. explicit method는 짧은 시간 간격을 사용할수록 더 정확한 결과를 얻을 수 있지만 계산 시간은 시간 간격이 짧을수록 길어진다. 적절한 시간 간격을 결정하기 위해 시간 간격을 변화시켰을 때 시간에 따른 들어가는 유체의 온도와 나오는 유체의 온도 (outlet에서의 온도)가 어떻게 변하는지에 대해 알아보았다.

Table 1 각 파라미터들의 값과 경계조건

BHE design	Depth= 100 m borehole radius= 82.5 mm U-tube radius (inner)= 17 mm U-tube radius (outer)= 21 mm
Thermal conductivity (W/mK)	U-tube= 0.366 grouting= 0.879 heat carrying fluid= 0.58 aquifer= 2.98
Heat capacity (MJ/m ³ K)	U-tube= 2.09 grouting= 2.2 heat carrying fluid= 4.2 aquifer= 0.82
Boundary conditions	basal heat flow= 59.7 mW/m ² ground surface temperature= 15 $^{\circ}\text{C}$ temperature difference BHE outlet/inlet= 3 $^{\circ}\text{C}$ flow rate in the U-tube= 43 l/min
Aquifer hydraulic parameters	porosity= 0.014 hydraulic conductivity= 10 ⁻⁶ m/s hydraulic gradient= 0.02

시뮬레이션에서 사용한 각 파라미터들의 값과 경계조건은 Table 1에 나와 있다. 최대 시간 간격은 10, 100, 500, 그리고 1000초를 사용하였고 총 시뮬레이션 시간은 3일이다. Modified TOUGHREACT는 수렴 조건에 맞게 시간 간격을 자동으로 조절하므로 최대 시간 간격만을 지정했다. 모델에서 사용된 도메인은 Fig. 1과 같다. 도메인의 크기는 경계조건의 영향을 받지 않게 하기 위해 충분히 크게 설정하였다.

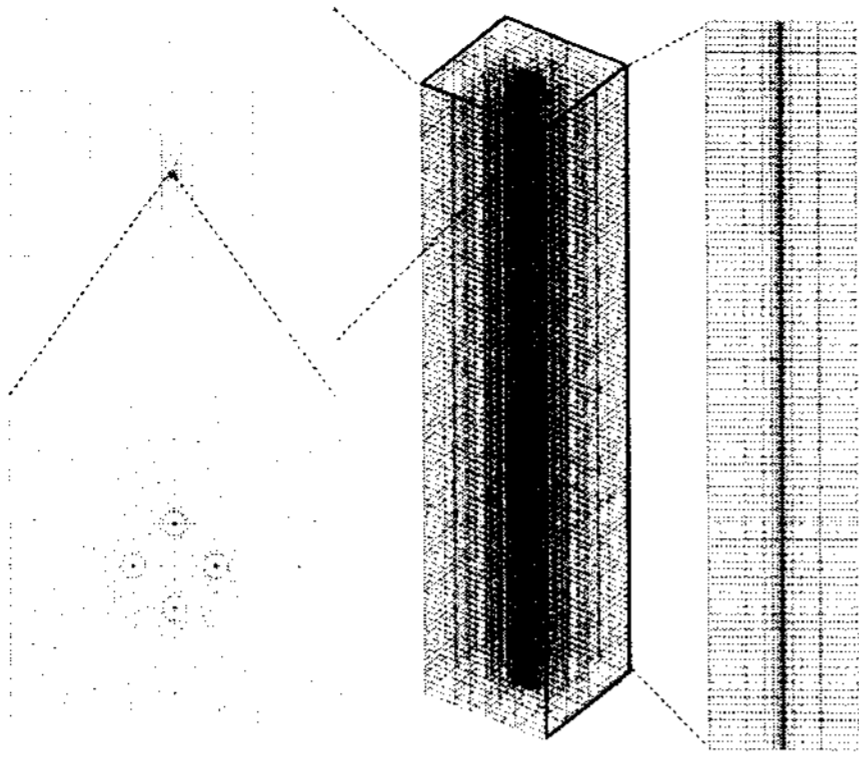


Fig. 1 모델에서 사용된 도메인

Fig. 2는 3일 동안 시간 간격 변화에 따른 inlet과 outlet의 온도 변화를 나타낸 것이다. 시간 간격에 따라 그 차이가 크지 않아서 처음 0.5일과 마지막 0.5일 동안의 inlet과 outlet의 온도 변화를 Fig. 3 - Fig. 6에 각각 나타내었다. 그래프에서 볼 수 있듯이 inlet으로 들어가는 물의 온도가 점점 뜨거워지므로 시간 간격이 작을수록 inlet과 outlet의 온도가 좀 더 높아지지만 그 크기는 무시할 수 있을 만큼 충분히 작다. 이 보다 더 큰 최대 시간 간격을 사용할 경우 Modified TOUGHREACT 자체에서 그 보다 작은 시간 간격을 사용하므로 1000초 이상의 시간 간격을 사용하는 것은 큰 의미가 없다.

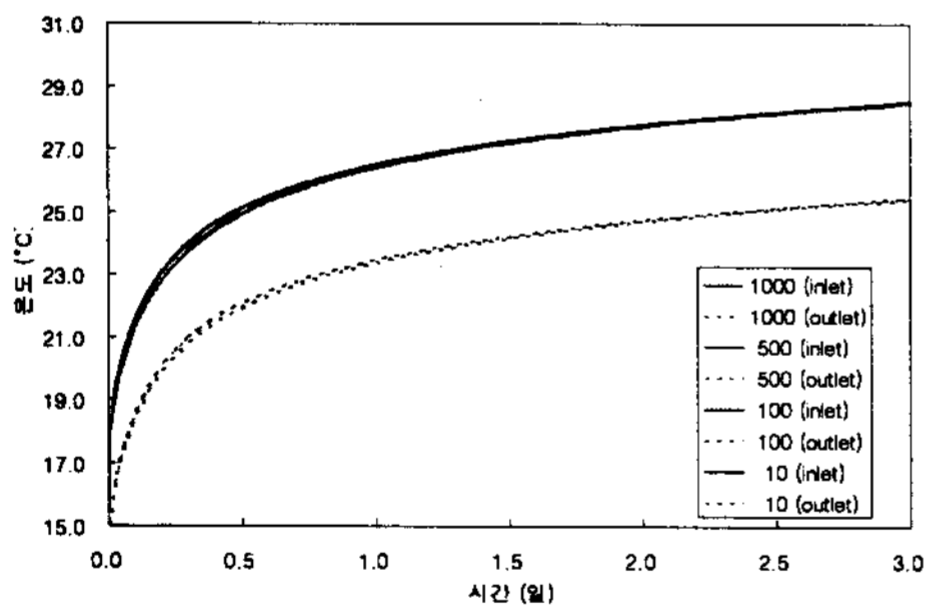


Fig. 2 시간 간격 변화에 따른 inlet과 outlet의 온도 변화 (0.0-3.0일)

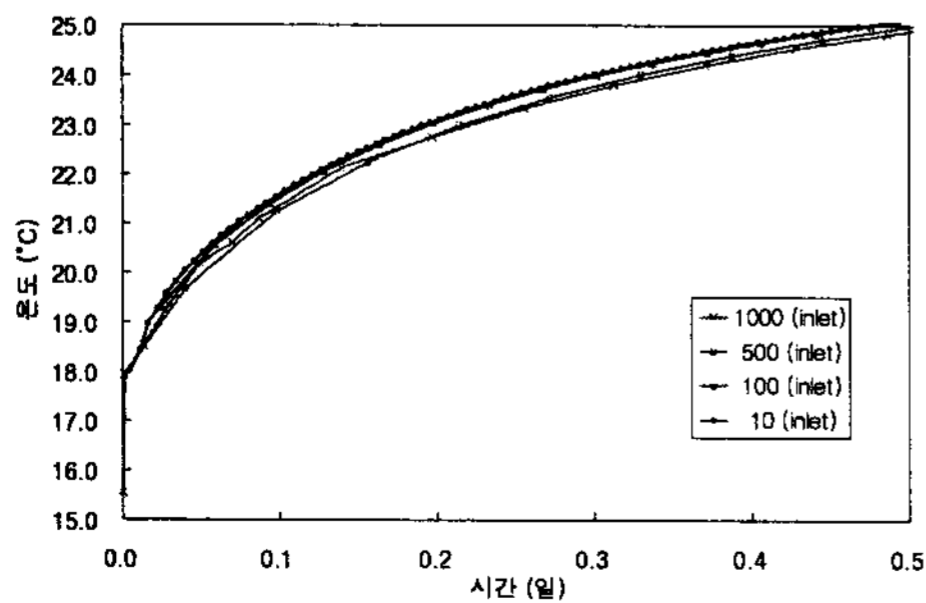


Fig. 3 시간 간격 변화에 따른 inlet의 온도 변화 (0.0-0.5일)

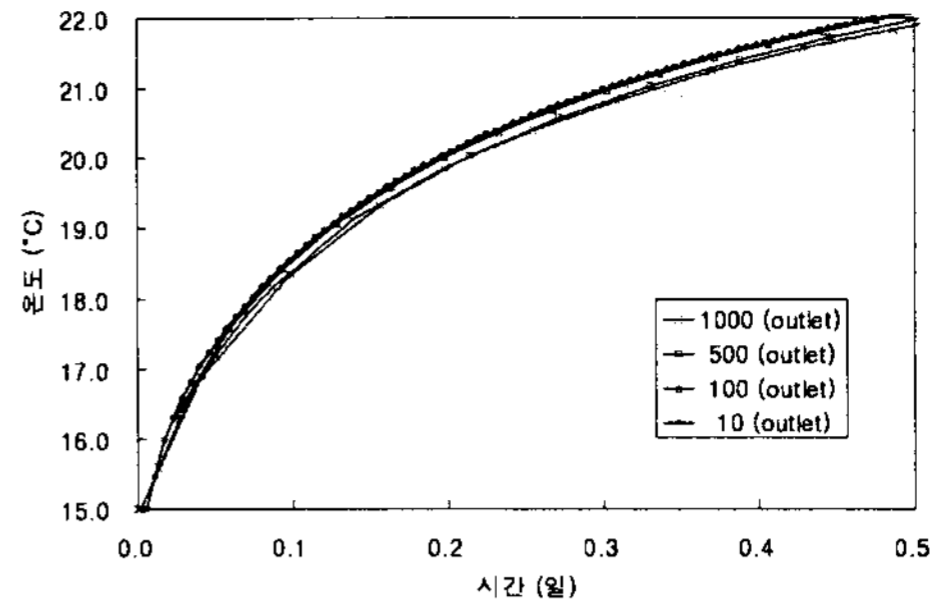


Fig. 4 시간 간격 변화에 따른 outlet의 온도 변화 (0.0-0.5일)

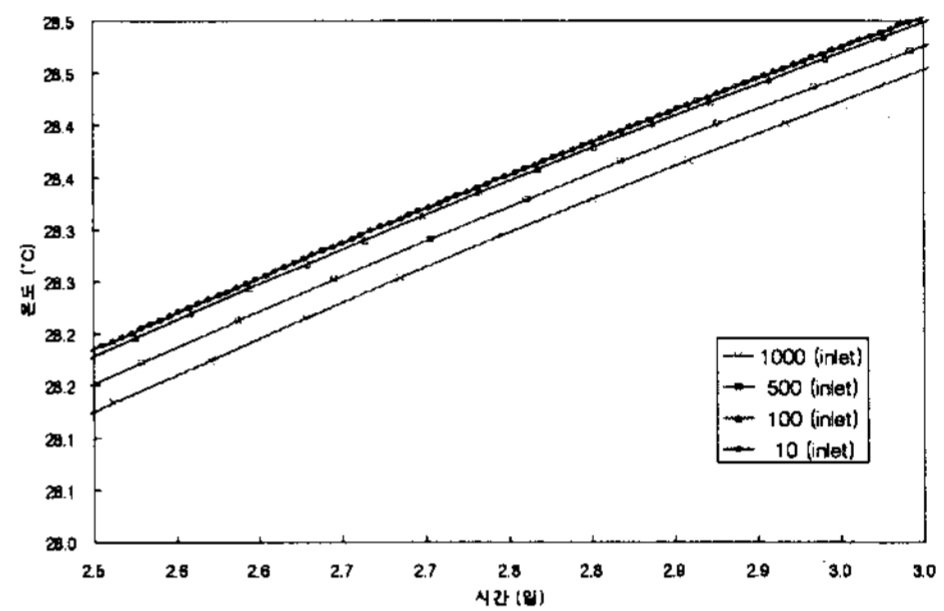


Fig. 5 시간 간격 변화에 따른 inlet의 온도 변화 (2.5-3.0일)

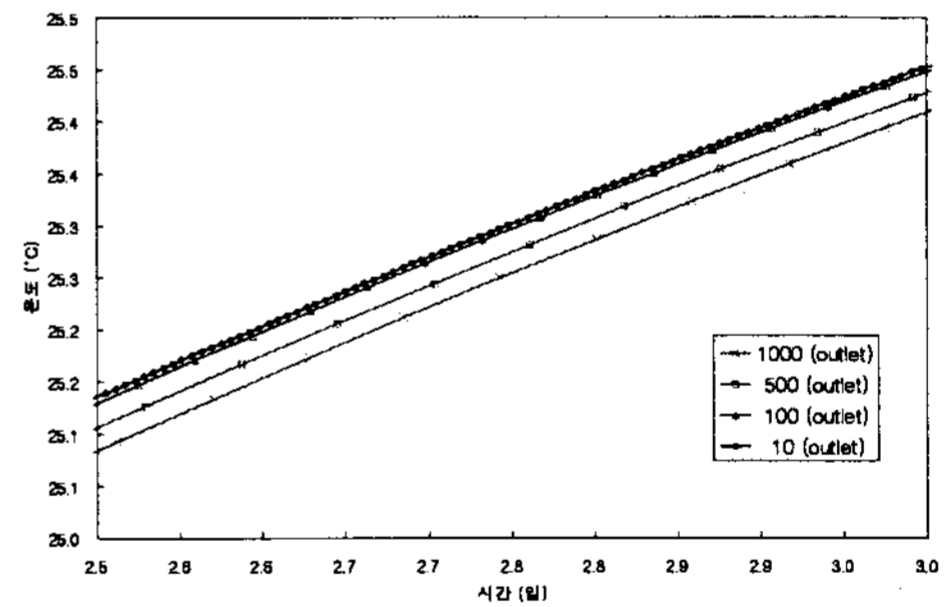


Fig. 6 시간 간격 변화에 따른 outlet의 온도 변화 (2.5-3.0일)

3.2 열응답 실험 자료와의 비교

모델을 검증하기 위해 2005년 11월에 한국지질자원연구원에서 실시되었던 열응답 실험 자료³⁾와 시뮬레이션 결과를 비교해보았다. inlet과 outlet의 온도 차이와 수리전도도를 제외하면 앞의 시간 간격 테스트에서 사용한 것과 동일한 모델 파라미터를 사용하였다. inlet과 outlet의 온도 차이는 주입된 열량을 바탕으로 계산되었다. 수리전도도는 3 m 간격으로 깊이별로 측정된 자료를 사용하였다.

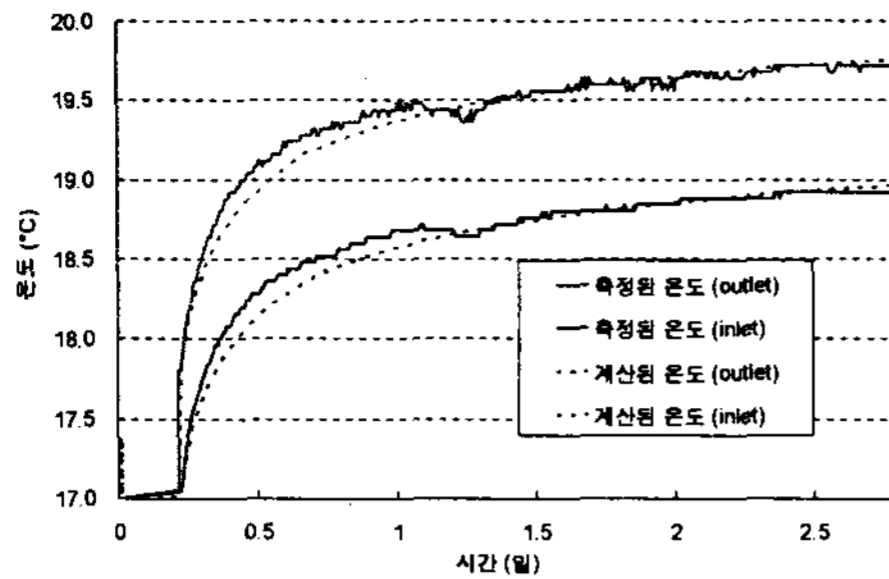


Fig. 7 측정된 온도와 계산된 온도의 비교

Fig. 7에서 볼 수 있듯이 측정된 결과와 계산된 결과가 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 초반의 불일치는 지중 열교환기로 들어가는 유체에 주입되는 열량이 실제로는 시간에 따라 변하지만 시뮬레이션에서는 평균값을 사용하였기 때문인 것으로 생각된다.

4. 결론

지중 열교환기를 순환하는 유체의 inlet에서의 온도를 계산하는 모듈을 개발하여 Modified TOUGHREACT에 적용한 후 시간 간격에 따른 결과의 변화를 알아보았고 측정된 결과와 계산된 결과를 비교해 보았다. 시간 간격에 따른 결과의 변화는 큰 차이가 없었기 때문에 계산 시간을 줄이기 위해 되도록 큰 시간 간격을 사용하는 것이 좋다. 측정된 결과와 계산된 결과의 비교를 통해 모델의 타당성을 어느 정도 검증하였으므로 앞으로 지중 열교환기를 설계하거나 운영할 때 그것을 최적화 하는 문제에 이 모델을 사용할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 에너지자원기술개발사업의 일환으로 에너지관리공단의 연구비지원과 교육인적자원부 두뇌한국21 (BK21) 사업에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] Karsten Pruess, Curt Oldenburg, and George Moridis, 1999. TOUGH2 User's Guide, Version 2.0.
- [2] Sarah Signorelli. 2004. Geoscientific Investigations for the Use of Shallow Low-Enthalpy Systems. Swiss Federal Institute of Technology Zurich, for the degree of Doctor of Science.
- [3] Byoung Ohan Shim, Youngmin Lee, Hyoung Chan Kim and Yoonho Song, 2006. Investigation of Thermal and Hydraulic Characteristics for the Performance Analysis of a Borehole