

# 현장 열응답 시험(TRT)과 CFD 역해석을 통한 지반의 열전도도 평가

## Evaluation of Ground Thermal Conductivity by Performing In-Situ Thermal Response test (TRT) and CFD Back-Analysis

박 문 서<sup>1</sup> Park, Moonseo

이 철 호<sup>2</sup> Lee, Chulho

박 상 우<sup>3</sup> Park, Sangwoo

손 병 후<sup>4</sup> Sohn Byonghu

최 향 석<sup>5</sup> Choi, Hangseok

### Abstract

In this study, a series of CFD (Computational Fluid Dynamics) numerical analyses were performed in order to evaluate the thermal performance of six full-scale closed-loop vertical ground heat exchangers constructed in a test bed located in Wonju. The circulation HDPE pipe, borehole and surrounding ground formation were modeled using FLUENT, a finite-volume method (FVM) program, for analyzing the heat transfer process of the system. Two user-defined functions (UDFs) accounting for the difference in the temperatures of the circulating inflow and outflow fluid and the variation of the surrounding ground temperature with depth were adopted in the FLUENT model. The relevant thermal properties of materials measured in laboratory were used in the numerical analyses to compare the thermal efficiency of various types of the heat exchangers installed in the test bed. The simulation results provide a verification for the in-situ thermal response test (TRT) data. The CFD numerical back-analysis with the ground thermal conductivity of 4 W/mK yielded better agreement with the in-situ thermal response tests than with the ground thermal conductivity of 3 W/mK.

### 요 지

본 연구에서는 일련의 현장 열응답 시험결과를 동일한 지중열교환기와 지반 조건에 대한 CFD(Computational Fluid Dynamics) 수치해석 결과와 비교하고 역해석을 통해 지반의 열전도도를 평가하였다. 총 6개의 보어홀을 원주에 소재하고 있는 시험시공 현장에 설치하였으며 순환 파이프의 형상과 그라우트 재료에 대한 수직 밀폐형 지중열교환기의 성능을 비교하기 위해 일반적인 U형 순환 파이프와 새롭게 개발된 3공형 순환 파이프를 보어홀 내 시공하였다. 수치해석은 CFD 해석 프로그램인 FLUENT를 적용하여 3차원 열전달 거동 해석을 수행하였으며 각각의 보어홀에 대해 시간에 따른 순환수의 유입, 유출 온도 차이와 지반의 깊이별 온도변화를 User Define Function (UDF)을 이용하여 실제 조건을 모사하였다. 주어진 보어홀 조건과 실내시험을 통해 시험시공 현장의 열 물성을 입력치로 적용하여 수치해석을 수행하였으며, 현장 열응답 시험에서 측정된 시간에 따른 유입, 유출 순환수의 온도 변화를 모사하였다. 수치해석 결과, 지반의 열전도도를 3W/mK로 적용하였을 때 보다 4W/mK일 때 현장 열응답 시험과 유사한 결과를 얻었다.

**Keywords :** Back-analysis, Bentonite grout, Cement grout, Closed-loop vertical ground heat exchanger, Thermal response test, Thermal conductivity

1 비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사졸업 (Former graduate student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ.)

2 비회원, 고려대학교 BK21 박사후 연구원 (Post-doc fellow, BK21, Korea Univ)

3 비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Graduate student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ.)

4 정회원, 한국건설기술연구원 그린빌딩연구실 수석연구원 (Principal research engineer, Green Building Research Division, Korea Institute of Construction Technology)

5 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수 (Associate professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University,

Tel: +82-2-3290-3326, Fax: +82-2-928-7656, hchoi2@korea.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

# 1. 서론

2007년 기상청 발표에 의하면, 한반도 부근 해수 온도가 최근 100년 간 세계 평균 바다 수온 상승 온도인 0.7°C의 두 배에 해당되는 1.2~1.6°C가량 오른 것으로 밝혀졌다. 또한 지구온난화의 추세가 지속 될 경우 2050년에 한반도 기온은 약 3°C 오르고 17%의 강수량 증가를 가져올 것으로 예측하였다. 따라서 코펜하겐 기후변화회의(2009)등 지구 온난화에 따른 환경 규제와 화석 연료를 대체할 수 있는 신재생에너지에 대한 관심이 점차 늘어남에 따라 국내에서도 그린 홈 100만호 보급 사업 등 신재생에너지에 대한 투자가 늘어나고 있다. 신재생에너지 중 지열을 직접 이용하는 지열 냉난방 시스템은 다른 신재생에너지에 비하여 초기 투자비가 적고 소규모로도 이용이 가능하며, 연중 일정한 온도를 유지하는 지층의 항온성을 이용하기 위해 지중열교환기를 설치하여 이를 통해 건물의 냉난방에 필요한 에너지를 공급하므로 효율적이고 환경 친화적이며 반영구적인 에너지 활용방법이다. 지열 냉난방 시스템은 냉난방에 필요한 온도로 상승 또는 하강시키기 위한 열펌프(Heat Pump), 지반과 열교환을 위한 지중열교환기(Ground Heat Exchanger), 공조 설비(Distribution system)로 구성되며, 지중열교환기는 지열을 회수하는 열교환기의 회로구성에 따라 밀폐형(Closed loop)과 개방형(Open Loop)으로 구분되며 설치 방식에 따라서 수직형, 수평형, 지표수형, 지하수형으로 나눌 수 있다. 이 중 Fig. 1과 같은 수직 밀폐형 지중열교환기는 건물이 밀집되어 설치면적이 제한적인 국내 상황에 적합한 방법이다

수직 밀폐형 지중열교환기의 단면은 Fig. 2(a)와 같이 일반적으로 직경 15cm 보어홀에 지중과 열교환을 위한 순환 유체를 순환 시킬 수 있도록 유입과 유출 파이프가

U-tube 형태로 관입되고 벤토나이트나 시멘트 그라우트 등으로 뒤채움하게 된다. 지중열교환기에 시공되는 그라우트는 순환 파이프와 지반 사이의 열적 단락을 방지하고 지표 오염수로부터 지하수 오염을 방지하는 목적으로 시공된다(IGSHPA, 2000). Fig. 2(b)는 냉방 모드에서 지중열교환기와 주변 지반에서 발생하는 열전달 과정을 나타내는 모식도이다.

일반적으로 수직 밀폐형 지중열교환기의 설계는 GLD, GLHEPro, EED, GchpClac 등과 같은 상용 설계프로그램을 이용하여 이루어진다. 이러한 설계프로그램의 입력치 중, 지층의 열전도도가 가장 중요한 요소 중 하나이다. 지층의 열전도도는 Mogensen(1983)에 의해 제안된 후, 실무적으로 현장 열응답시험(In-situ Thermal Response Test, 이하 TRT)을 수행하고 시험결과를 선형 열원 모델(line-source model)로 해석하는 방법으로 얻게 된다 (Austin, 1995; Spilker, 1998; Smith and Perry, 1999; IGSHPA, 2000; Shonder and Beck, 2000; Zhang and Murphy, 2000; Martin and Kavanaugh, 2002; Beier and Smith, 2002; Sohn et al., 2005; Sohn, 2007; Marcotte and Pasquier, 2008; Lee et al., 2010; Lamarche et al., 2010). 이 방법을 통해 지중 유효열전도도를 얻게 되는데, 이는 지반 자체

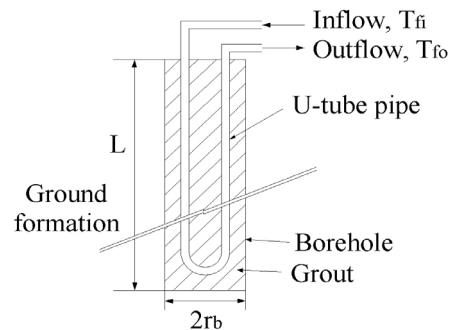
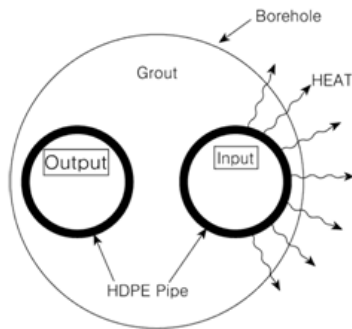
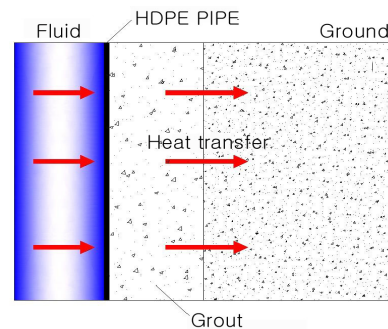


Fig. 1. Schematics of closed-loop vertical ground heat exchanger



(a) Cross section of heat exchanger



(b) Mechanism of heat transfer (cooling mode)

Fig. 2. Cross section of heat exchanger and heat transfer mechanism (Choi et al., 2008)

뿐만 아니라 보어홀(순환파이프, 그라우트)의 열저항을 포함한 등가 열전도도이다. 수직 밀폐형 지중열교환기 경우에는 현장 열응답시험으로부터 구한 지중 유효열전도도를 직접 설계입력치로 적용할 수 있으나 최근에 관심이 고조되고 있는 에너지파일, 스탠딩 컬럼 웰(SCW) 등은 선형 현장 열응답시험으로 설계에 사용할 수 있는 지중 열전도도를 예측할 수 없다. Pahud and Hubbuch (2007)은 쥐리히 공항청사의 에너지파일 시공현장에 수직밀폐형 지중열교환기를 추가로 설치하고 열응답시험을 수행하여 얻어진 지중 유효열전도도를 에너지파일의 설계에 적용하는 방법을 적용하였다. 하지만, 전술했듯이, 이 방법으로 구해진 지중 유효열전도도는 지반과 보어홀의 영향을 포함한 등가 열전도도로 실제 지반만의 열전도도와는 다소 오차가 있다.

최근에 CFD 수치해석을 활용하여, 보어홀 현장 열응답시험 모사, 지중온도 변화 및 운전시간 그리고 지열교환기의 배열 및 형상 등에 대한 세부적 성능예측이 가능성을 제시하고 있다(Li et al., 2006; Woo et al., 2007; Singorelli et al., 2007; Marcotte and Pasquier, 2008; Zanchini and Terlizze, 2008; Gil et al., 2009; Kim et al., 2010; Raymond et al., 2011). 본 논문에서는 시험시공 현장에 설치된 수직 밀폐형 지중열교환기의 열응답시험 결과를 평가하기 위해 현장조건과 동일한 수직 밀폐형 지중열교환기 모델을 수치해석에 적용하였다. 유한체적해석(FVM) 프로그램인 FLUENT를 통한 3차원 열전달 거동해석을 위해 파이프 직경 및 두께, 보어홀, 지반등을 현장 시공 조건과 동일하게 모델링을 하였다. 또한, 현장

열응답 시험(TRT)에서 측정된 시간에 따른 순환수의 유입, 유출 온도 차이 및 지반의 깊이별 온도 변화를 User Define Function(UDF)을 이용하여 해석 모델에 적용하였으며 다양한 보어홀 조건과 역해석을 통해 산정된 원지반의 열전도도를 입력치로 적용하였다.

본 논문에서는현장 열응답시험에 대한 역해석을 통해 보어홀 영향을 배제한 지중 열전도도를 산정하는 방법을 제시하고 있다. 즉, 동일한 지반조건에 다양한 시공조건(그라우트 종류, 첨가재 종류, 파이프 형상)을 갖는 6개의 서로 다른 수직밀폐형 지중열교환기 중에서 3번과 4번 지중열교환기에 수행된 열응답시험 결과와 가장 근접하도록 하는 지반의 열전도도를 역해석을 통해 유추하고 이를 나머지 4개 지중열교환기에 적용한 수치모사 결과와 현장 열응답시험 결과와 비교를 통해 역해석을 통해 예측된 지중 열전도도의 타당성을 보였다.

## 2. 현장 열응답 시험 결과에 대한 역해석

### 2.1 현장 조건

지중열교환기 시공과 현장 열응답 시험이 진행된 시험시공 현장은 강원도 원주지역으로 Fig. 3과 같이 지반이 대부분 연암층으로 구성되어 있다. 현장 시공 및 열응답 시험은 전열성 그라우트의 성능과 순환파이프 단면 특성을 분석하기 위하여 실시하였다. 따라서, 순환파이프를 관입한 보어홀에 시멘트 그라우트와 벤토나이트 그라우트를 각각 주입 후, 수직 밀폐형 지중열교환

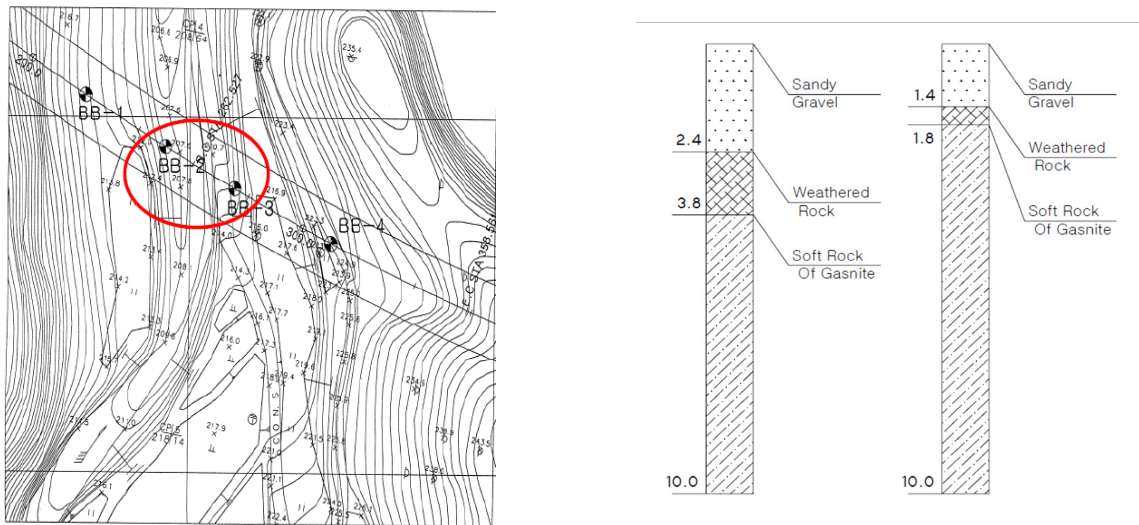


Fig. 3. Location and geological profile of test-bed site

기에 대한 현장 열응답 시험(TRT)을 실시하였다. 천공 작업 중 인근 보어홀로 지하수가 유출된 사실로부터 암반층은 지하수를 함양하고 있는 파쇄 대수층이 잘 형성된 것으로 판단된다.

보어홀은 Fig. 4와 같이 1번홀을 제외한 모든 보어홀이 약 150m까지 관입이 이루어 졌으며 각각의 보어홀의 수평 이격거리는 5m로 시공되었다. 그러나 시공 후, 보어홀 하부에 굴착 시 발생하는 슬라임이 쌓여 최종 천공 깊이는 보어홀마다 다소 차이가 있다. 5, 6번 보어홀은 1, 2번 보어홀과 같은 종류의 그라우트를 사용하되 파이프단면은 Gil et al.(2009)과 Lee et al.(2010)이 제안한 3공형단면을 사용하여 파이프 단면형상 대한 영향을 비교 검토하였다. 3공형 단면은 U-tube 파이프 단면에 비해 유출입 파이프 사이에 부분적인 단열 구간이 형성하여 파이프 간 상호 열간섭을 감소시킬 수 있어 전체 시스템의 열전달 효율을 향상 시키는 것으로 예상되었다. 따라서, 본 연구에서는 파이프간 열간섭을 감소시키기 위해 U-tube 파이프 사이에 파이프 하나를 추가로 삽입한 형태로 3공형 파이프를 시공하였으며 추가로 삽입한 파이프에는 물을 채워 보어홀에 파이프 관입시 지하수에 의한 부력에 저항하도록 하였다.

현장 시험시공은 Table 1과 같이 그라우트재의 종류, 첨가제 종류, 지중열교환기 파이프 단면 형상에 따라 상호 성능을 비교할 수 있도록 지중열교환기를 시공하였

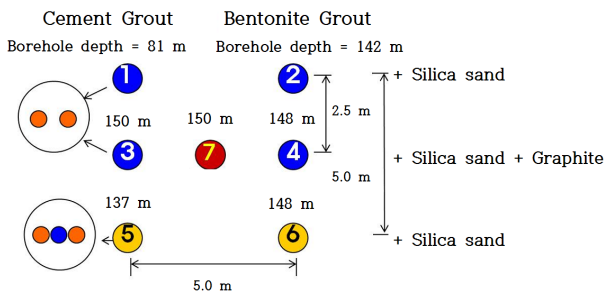


Fig. 4. Layout of test boreholes

Table 1. Grout types and pipe sections of boreholes

Pipe section	Borehole No.	Grouting method
U-tube	1	Cement + Silica sand
	2	Bentonite + Silica sand
	3	Cement + Silica sand + Graphite
	4	Bentonite + Silica sand + Graphite
3 pipe type	5	Cement + Silica sand
	6	Bentonite + Silica sand

다. 1, 3, 5번 보어홀은 시멘트 그라우트로 뒤채움을 하고 2, 4, 6번 보어홀은 벤토나이트 그라우트로 뒤채움을 하여 그라우트 종류에 따른 열전달 효율을 비교하였다. 또한, 1, 2번 보어홀은 첨가제로 천연규사만을 사용하고 3, 4번 보어홀은 천연규사와 흑연을 함께 배합하여 흑연에 의한 재료의 열전도 향상을 검토하였다. 마지막으로 5, 6번 보어홀은 1, 2번 보어홀과 같은 종류의 그라우트를 사용하되, 파이프 단면은 새로이 제안된 3공형 단면을 사용하여 파이프단면 형성에 따른 영향을 비교 검토하였다.

## 2.2 3차원 수직 밀폐형 지중열교환기의 열전달거동

### 2.2.1 수직 밀폐형 지중열교환기 모델링

본 연구에서는 CFD 수치해석을 위해 유한 체적 해석 프로그램인 FLUENT를 이용하여 현장에 시공된 수직 밀폐형 지중열교환기를 현장시공 조건과 동일하게 3차원 수치해석 모델링을 실시하였다. 각각의 보어홀은 보어홀의 깊이, 순환파이프(HDPE)두께 및 단면 형상을 현장 조건과 동일하도록 모델링하였으며 HDPE 순환파이프는 두께 0.5cm이고 외경 4.3cm이며, 보어홀 직경 15cm, 경계면 효과를 최소로 하기 위하여 지반의 해석 범위는 7.5m로 적용하였다. FLUENT를 이용하여 열전달 거동을 평가하기 위해 유체의 흐름(Fluid) 부분은 최대한 정밀하게 3차원 격자로 구성을 하였으며 Fig. 5와 같이 파이프 두께를 모사함으로써 순환수가 파이프를 통해 순환하면서 지중으로 열을 방출 또는 흡수하고 열전달이 파이프를 통하여 그라우트로 이루어지도록 하였다.

파이프 내 순환수의 유속은 현장 열응답 시험 시 측정된 값과 동일하게 Table 2와 같이 적용 하였으며, 현장 열응답 시험과 동일한 열 부하 조건으로 수치해석을 수행하기 위해 시간에 따라 유출 파이프에서 나온 순환수의 온도에 열응답 시험기에서 가열에 의해 추가되는

Table 2. Fluid velocity circulating heat exchange pipes

	Borehole No.	Fluid velocity (m/s)
U-tube	1	0.930
	2	0.703
	3	0.617
	4	0.605
3 pipe type	5	0.700
	6	0.641



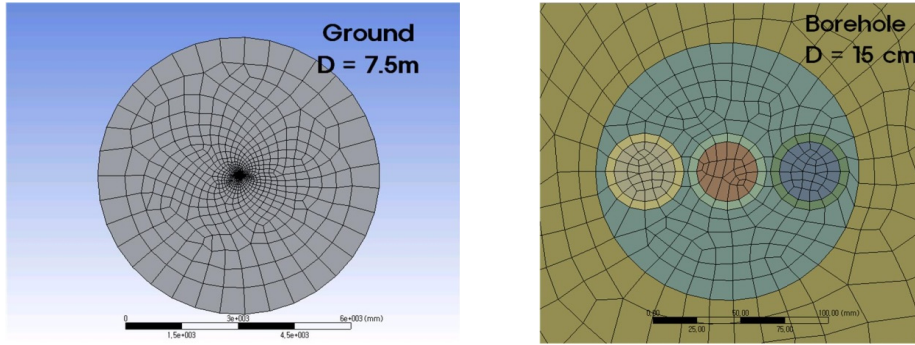


Fig. 5. Numerical modeling configuration of heat exchanger (3 pipe type)

Table 3. Modeling properties for borehole and ground (Korea Expressway Corporation, 2007; Niekamp et al., 1984)

Borehole No.	Components	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Specific Heat (J/kg·K)	Thermal conductivity (W/m·K)	Viscosity (kg/m·s)
All 1~6	Fluid	998.2	4182	0.6	0.001003
	Pipe	955	525	0.4	-
	Ground	2600	790	3.0, 4.0	-
1	Cement grout	2300	510	1.6	-
2	Bentonite grout	1800	3200	1.1	-
3	Cement grout	2200	840	2.1	-
4	Bentonite grout	1700	3500	1.2	-
5	Cement grout	2300	510	1.6	-
6	Bentonite grout	1800	3200	1.1	-

온도를 일정하게 증가시켜 유입 파이프로 들어가는 순환수 유입 온도를 경계조건으로 적용하기 위해 FLUENT에서 제공하는 UDF(User Define Function)를 이용하였다.

또한 현장 열응답 시험 전, 현장에서 측정된 지중의 깊이별 온도를 이용하여 다음 식 (1)에서 계산된 깊이별 지중온도 분포를 수치해석에 적용하였다.

$$\text{지중온도}(K) = 286.6K + 0.0225(K/m) \times \text{깊이}(m) \quad (1)$$

수치해석에 적용된 그라우트 재료의 열물성치는 현장시공 중 시료를 채취 하여 실내시험으로 측정된 물성치를 적용을 하였다. 지반을 구성하는 암반층은 현장에서 보어홀 천공 중 채집한 화강암 시편으로부터 보어홀 전체 깊이에 대해 화강암이 주로 분포하고 있다고 판단하였다. 문헌(Engineering Toolbox)에서 제시하는 일반적인 화강암의 열전도도는 2.6~4.0W/mK 범위를 가지므로 수치해석에서는 먼저 3번 보어홀에 대해서 이 지역 원지반의 평균 열전도도를 3.0W/mK과 4.0W/mK으로 적용하여 역해석을 통해 현장 열응답 시험과 비교하였다. 즉, 현장 열응답 시험과 가장 유사한 결과를 보이

는 원지반의 열전도도를 역해석을 통해 산정한 후, 나머지 보어홀에 산정된 원지반의 열전도도를 적용하여 현장 열응답 시험 결과와 비교하였다. 이는 수치해석 시, 다른 물성치에 비해 원지반의 열전도도는 해석에서 고려되는 깊이가 지표면부터 150m까지 이므로 각 깊이마다 실험을 통해 정확한 값을 추정하기가 불가능하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 이 지역 원지반의 평균 열전도도를 3.0W/mK와 4.0 W/mK의 두 가지 경우에 대해 시멘트 그라우트로 시공된 지중열교환기(3번 보어홀)에서 수행된 현장 열응답 시험 결과를 수치해석 결과와 비교하여 현장 원지반 열전도도를 유추한 후, 이 값을 나머지 보어홀에 대한 수치해석에 적용하여 수치해석 모델의 적용성과 원지반의 열전도도를 평가하였다. 다음 Table 3은 각각의 수직 밀폐형 지중열교환기에 대해 수치해석에 적용된 시멘트 그라우트, 벤토나이트 그라우트, 파이프, 지반의 물성치를 나타낸다.

## 2.2.2 지중 유효 열전도도 산정

지중 열교환기가 삽입된 보어홀의 지중 유효 열전도도는 지중 열교환기로 열이 주입되거나 추출될 때 지중

열교환기 유입, 유출수의 온도 변화로부터 구해진다. 그러므로 수직 밀폐형 지중열교환기의 성능은 지중열교환기 파이프 내를 순환하는 유체와 파이프 주위 지반의 구성, 그라우팅 재료 등과 밀접한 관련이 있다. 하지만 보어홀의 열저항, 그라우팅 재료의 열물성, 파이프와 보어홀 벽면 사이의 간격 등 열교환기 성능에 미치는 변수들을 모두 개별적으로 고려하기는 불가능하므로 현장 열응답 시험(TRT)을 통해 지중의 구성 인자들의 특성을 종합하여 유효 열전도도라는 개념을 설계에 적용한다. 지중 유효 열전도도를 산정하기 위한 이론으로 선형 열원 모델(Line-source model)과 원통형 열원 모델(Cylinder-source model)이 있다. 본 연구에서는 지중열교환기를 무한길이의 직선 열원으로 가정한 선형 열원 모델(Line-source model)을 적용하였다. 선형 열원 모델에서는 열전달이 지중열교환기와 지반의 접촉면에서 일정한 열 유속으로 열원의 반경 방향으로만 열전달이 이루어지고, 열원의 온도는 항상 일정하게 유지된다고 가정하며 지반의 열적 물성치는 일정하고, 지하수의 이동은 고려하지 않는다. Carslaw and Jaser(1959)는 선형 열원에서 반경방향 거리( $r$ )에서 시간에 따른 매질의 온도차를 다음 식 (2)과 같이 제시하였다.

$$T(r,t) - T_i = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q}{4\pi\lambda} Ei\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \quad (2)$$

여기서,  $q$ 는 보어홀의 유효 길이당 주입열량(W/m),  $\lambda$ 는 유효 열전도도(W/mK),  $a(=\lambda/\rho c)$ 는 열확산계수( $m^2/s$ ),  $T_i$ 는 초기 지반의 온도(K)이다.  $\frac{r^2}{4\alpha t}$ 가 매우 작은 경우, 식 (2)의 지수적분 항을 다음 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$Ei\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \approx \ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - \gamma \quad (3)$$

여기서,  $\gamma$ 은 Euler 상수로 0.5772이다. 적분구간을 따라서 보어홀 벽면(보어홀 중심에서  $r_b = r$  만큼 떨어진 지점)의 임의의 시간에서 초기 온도와와의 차이는 다음 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$T_f(t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[ \ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - \gamma \right] + qR_b + T_i \quad (4)$$

식 (4)는 선형 형태로 배열하면 다음 식 (5)와 같이 표현 될 수 있다.

$$T_f(t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln(t) + q[R_b + \frac{1}{4\pi\lambda} \ln\left(\frac{4\alpha}{r^2}\right) - \gamma] + T_i \quad (5)$$

$q$ 가 상수라면, 다음 식 (6)과 같이 간단하게 표현 할 수 있다.

$$T_f(t) = m \ln(t) + c \quad \left( m = \frac{q}{4\pi\lambda} \right) \quad (6)$$

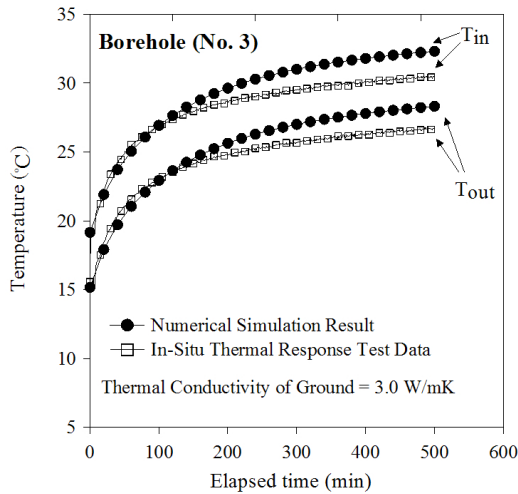
그러므로 현장 열응답시험으로 부터 입출구 평균온도와 시간에 대한 반대수 관계를 작도하여 기울기( $m$ )를 산정한다. 산정된 기울기와 주입된 평균 열 공급량을 다음 식 (7)에 대입하여 현장의 지중 유효 열전도도를 산정한다.

$$\lambda = \frac{q}{4\pi m} = \frac{q}{4\pi} \frac{\ln(t_2) - \ln(t_1)}{T_f(t_2) - T_f(t_1)} \quad (7)$$

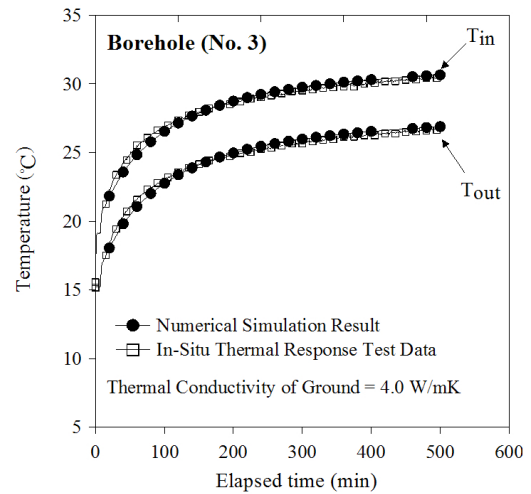
### 3. 해석결과 분석

#### 3.1 원지반의 열전도도 예측

현장 열응답 시험 초기에는 열용량이 일정하게 공급되지 않아 약간의 오차를 나타내는 것으로 알려져 있다. Gehlin et al.(2003)는 초기 열용량이 일정하지 않은 것을 고려하여 시험 시작 후 초기 5시간 가량은 해석결과 분석에서 제외해야 한다고 제안하였다. 또한, Lee et al.(2008)도 선형최소자승법을 이용하여 초기 시간을 제외하여야 실험오차를 최소화 할 수 있다고 하였다. 따라서 수직 밀폐형 지중열교환기의 열전달 거동을 평가하기 위해 3번 보어홀에 대해서 파이프를 순환하는 유체의 초기 안정화 시간(약 300분)까지를 고려하여 총 500분에 대한 수치해석을 실시하였다. Fig. 6은 시멘트 그라우트를 사용한 3번 보어홀의 현장 열응답 시험 결과와 원지반의 열전도도 3W/mK와 4W/mK를 수치해석에 적용한 해석 결과이다. 앞 절에서 언급했듯이, 다른 물성치에 비해 대상 지역 원지반의 깊이별 열전도도는 해석에서 고려되는 깊이가 150m이므로 각 지점의 정확한 값을 추정하기 어려워, 본 연구에서는 원지반의 열전도



(a) Thermal conductivity of ground = 3W/m·K



(b) Thermal conductivity of ground = 4W/m·K

Fig. 6. Back-analysis TRT result using numerical simulations (Borehole No.3, Cement+silica sand+graphite, U-tube)

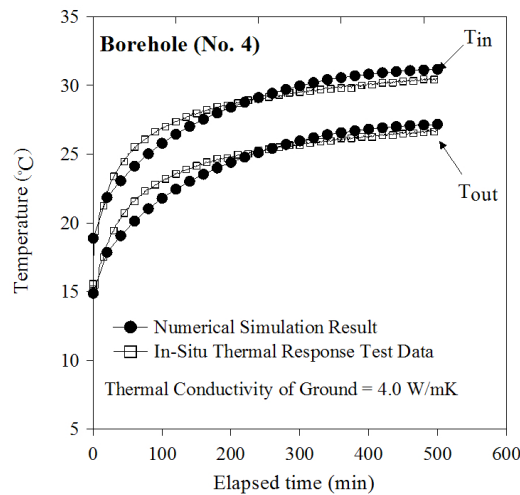


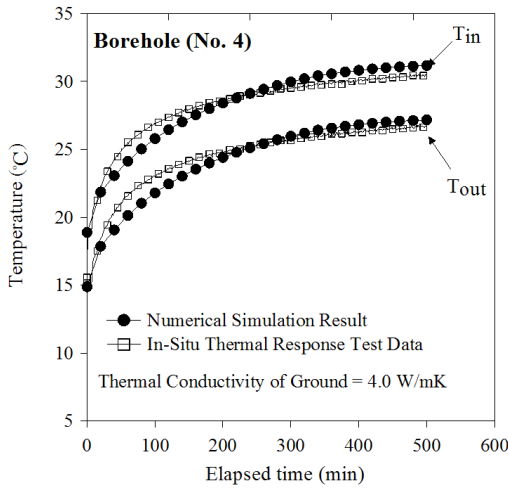
Fig. 7. Back-analysis TRT result using numerical simulations (Borehole No.4, Bentonite+silica sand+graphite, U-tube)

도를 시멘트 그라우트로 시공된 지중열교환기(3번 보어홀)에서 수행된 현장 열응답 시험 결과와 수치해석 결과와 비교하여 역해석을 통해 예측하였다.

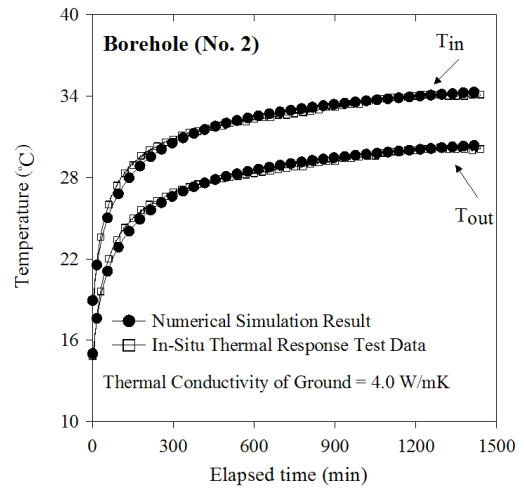
Fig. 6에서 확인할 수 있듯이, 시멘트 그라우트를 사용한 3번 보어홀 지중열교환기의 수치해석 결과, 원지반의 열전도도를 3W/mK로 적용할 때 보다 4W/mK로 적용할 때, 현장 열응답 시험 결과와 근접한 유입수와 유출수 온도변화 양상을 보였다. 또한, Fig. 7과 같이 동일한 조건에 그라우트로 시멘트 대신 벤토나이트를 사용한 보어홀 4번에 대해 원지반의 열전도도를 4W/mK로 적용하여 수치해석을 수행한 결과가 현장 열응답 시험 결과와 유사한 유입수와 유출수 온도 변화 양상을 보인다. 따라서, 본 현장의 원지반의 평균 열전도도를 4W/mK로 유추할 수 있다.

역해석을 통해 선정된 시험시공 현장 원지반의 열전도도(4W/mK)를 나머지 4개 보어홀에 대해 적용하여 수치해석을 수행하였고, Fig. 8은 1, 2, 5, 6번 보어홀에 원지반의 평균 열전도도 4W/mK를 수치해석에 적용한 결과와 각 보어홀에서 수행한 현장 열응답 시험 결과의 비교를 보여준다.

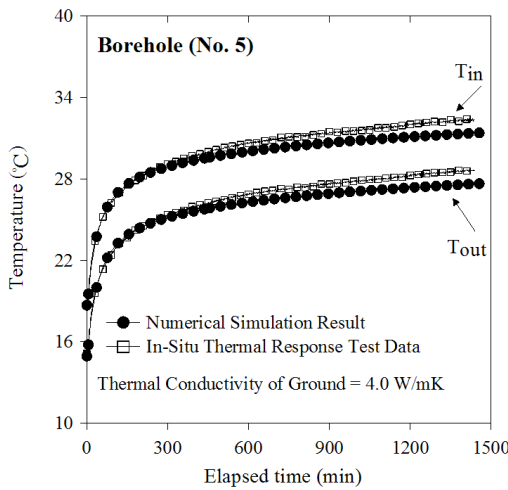
비록 5번 보어홀에서는 수치해석결과가 유입수와 유출수의 온도상승을 다소 과소평가하는 것으로 나타났지만, 대체로 모든 보어홀에서의 수치해석 결과와 현장 열응답 시험 결과가 잘 일치하였다. 이로부터 현장 열응답 시험을 실시한 현장의 원지반 평균 열전도도는 4W/mK가 적합할 것으로 사료 된다. 이는 CFD 수치해석을 통하여 수직 밀폐형 지중열교환기의 현장 열응답 시험 모사가 가능함을 알 수 있다. 그러나, 수치해석 결과는 현



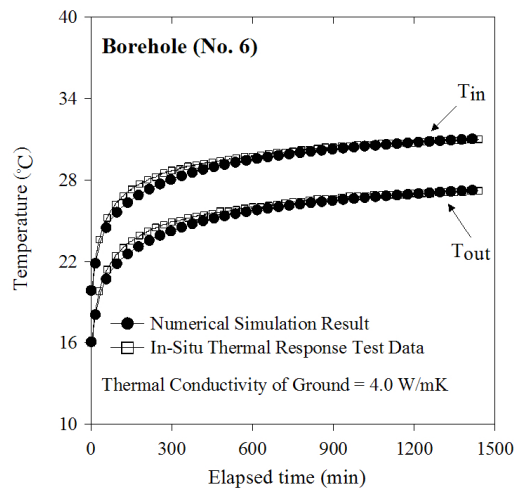
(a) Borehole No.1



(b) Borehole No.2



(c) Borehole No.5



(d) Borehole No.6

Fig. 8. Comparison of TRT results using numerical simulations (Borehole No.1, 2, 5, and 6)

장 그라우팅 상태가 양호하지 않을 수 있다는 점, 파이프의 관입 위치가 실제로 다를 수 있다는 점, 지하수의 유동을 정확하게 파악 할 수 없는 점으로 인하여 열적거동이 현장 열응답 시험 결과와 다소 차이가 발생할 수 있음을 고려해야 한다.

### 3.2 지중 유효 열전도도 산정 결과

지중 유효 열전도도를 산정하기 위해 현장 열응답 시험 및 수치해석 결과에서 온도와 시간의 관계가 직선으로 나타나는 부분의 기울기( $m$ )를 식 (7)에 대입하여 입력 열량( $Q$ )와 각 보어홀의 길이에 대한 지중 유효 열전도도( $\lambda$ )를 산출하였다. 다음 Fig. 9은 현장 열응답 시험 결과(TRT)와 원지반의 평균 열전도도 4W/mK를 적용

하여 수치해석을 통해 지중 유효 열전도도를 산정한 결과이다.

수치해석 결과 평균적으로 5시간 이후에 온도-시간 관계가 선형화 되는 것으로 나타났다. 현장 열응답 시험에서 계산된 지중 유효 열전도도와 수치해석에서 계산된 지중 유효 열전도도를 다음 Table 4에 정리하였다.

현장 열응답 시험 결과와 수치해석 결과 모두 시멘트 그라우트를 사용한 1, 3, 5번 보어홀의 경우 벤토나이트 그라우트를 사용한 보어홀에 비해 상대적으로 높은 지중 유효 열전도도를 보였다. 또한 그라우트에 첨가재료 흑연을 첨가한 경우가 첨가하지 않은 경우보다 높은 지중 유효 열전도도가 얻어졌으며, 3공형 순환 파이프가 U-tube 순환 파이프보다 지중 유효 열전도도가 높게 나타났다. 이는 첨가재료 흑연을 첨가한 경우와 시멘트 그



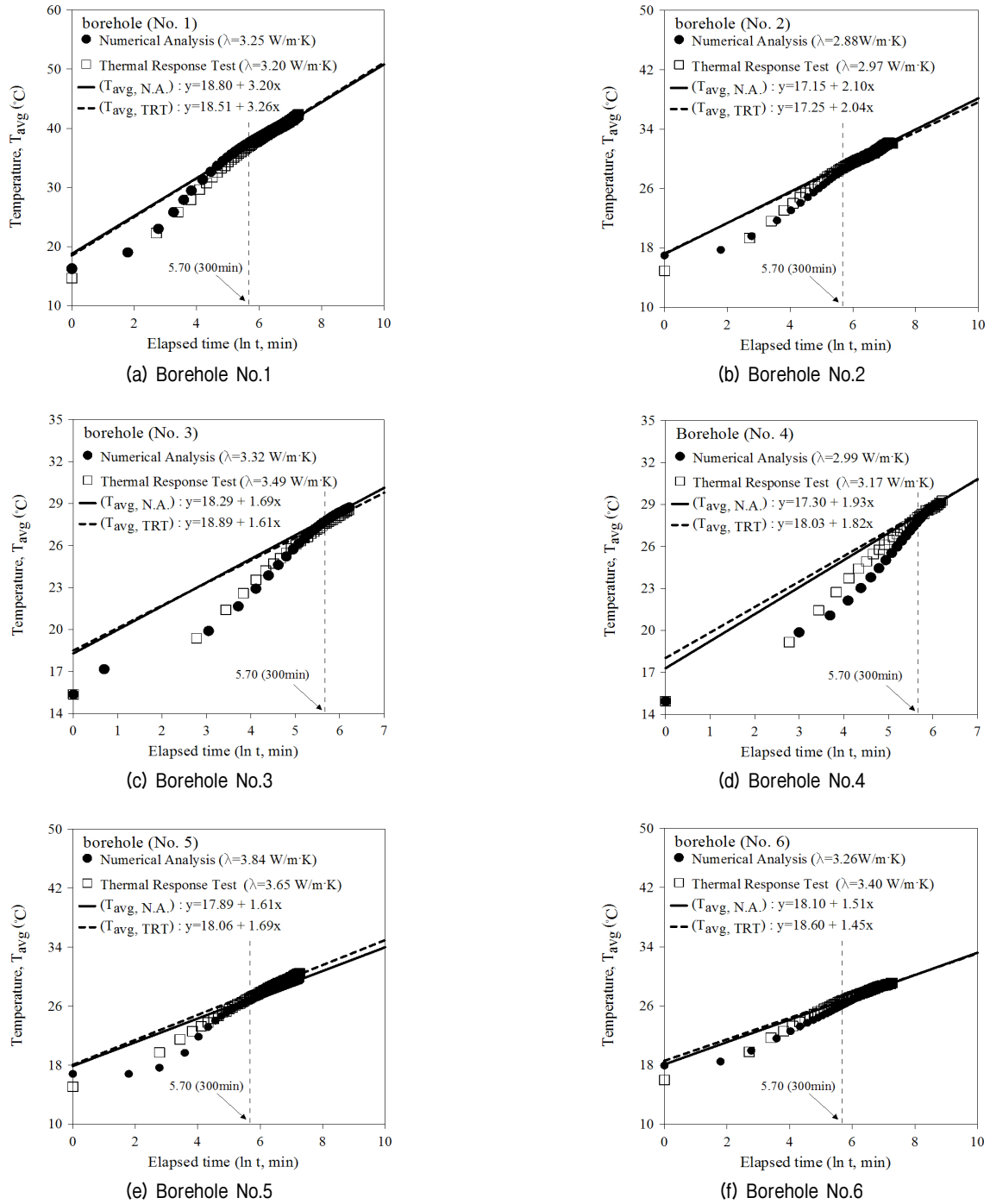


Fig. 9. Estimation of effective thermal conductivity of ground

Table 4. Results of effective thermal conductivity of ground

Borehole No.	Grouting method	Pipe section	Effective thermal conductivity (W/m $\cdot$ K)	
			TRT results	Numerical analysis
1	Cement + Silica sand	U-tube	3.20	3.25
2	Bentonite + Silica sand	U-tube	2.97	2.88
3	Cement + Silica sand + Graphite	U-tube	3.49	3.32
4	Bentonite + Silica sand + Graphite	U-tube	3.17	2.99
5	Cement + Silica sand	3 pipe type	3.65	3.84
6	Bentonite + Silica sand	3 pipe type	3.40	3.26

라우트로 시공 할 경우 벤토나이트 그라우트보다 높은 열전달 효율을 기대할 수 있으며 기존의 U-tube보다는 3공형이 유출과 유입 파이프 사이의 열간섭을 감소시켜 높은 열전달 효율을 기대할 수 있을 것으로 사료된다. 현장 열응답 시험결과와 수치해석으로 평가된 유효 열전도도가 거의 유사하게 계산 되었으므로 수치해석을 통하여 수직 밀폐형 지중열교환기의 현장 열응답 시험 모사가 가능함을 알 수 있으며, 역해석을 통하여 원지반의 열전도도를 유추할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 역해석을 통해 지중열교환기가 시공된 현장의 원지반 열전도도를 유추하고 이를 적용한 수치해석 결과와 현장 열응답 시험을 비교하여 지중 유효 열전도도를 산정하고 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 제시한다.

- (1) 유한체적해석 프로그램인 FLUENT를 통한 3차원 열전달 거동 해석을 위해 파이프 직경 및 두께, 보어홀, 지반등을 현장 시공 조건과 동일하게 모델링한 결과, 현장 열응답 시험에서 얻어지는 실시간 유입수와 유출수 온도변화를 수치해석을 통해 적절히 모사할 수 있음을 확인하였다.
- (2) 지중열교환기가 시공된 Test bed 시공 현장 원지반의 평균 열전도도는 현장 열응답 시험 결과에 대한 역해석을 통해 4W/mK로 평가하였다.
- (3) 현장 열응답시험 결과에 대한 역해석을 통해 순환과이프와 그라우트를 포함한 보어홀 영향을 배제한 현장 원지반 평균 열전도도와 이를 산정하는 방법을 제안하였다. 또한, 역해석에 적용한 이외의 지중열교환기에 적용한 수치해석 모사결과와 현장 열응답 시험 결과와의 비교를 통해 획득된 현장 원지반 열전도도의 신뢰성을 검증하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업(06건설핵심D04)과 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2010-0011159)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고 문헌

1. Austin, W. A. (1995) *Development of an in situ system for measuring ground thermal properties*, M.S. Thesis, Oklahoma State University, US.
2. Beier, R. A. and Smith, M. D. (2002) "Borehole thermal resistance from line-source model of in-situ tests", *ASHRAE Transactions*, Vol. 108, pp.212-219.
3. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C. (1959) "Conduction of heat in Solid", 2nd edition, *Oxford Science Publications*, pp.261-262.
4. Choi, H-S, Lee, C-H, Choi, H-P, and Woo, S-B (2008), "Study on physical characteristics of grout material for backfilling ground heat exchanger, *Journal of Korean Geotechnical Society (KGS)*, Vol.24, No.1, pp.37-49.
5. Engineering Toolbox : [www.Engineeringtoolbox.com](http://www.Engineeringtoolbox.com)
6. Gehlin, S. E. A., Hellstrom, G., and Nordell B. (2003), "The influence of the thermosiphon effect on the thermal response test", *Renewable Energy*, Vol.28, pp.2239-2254.
7. Gil, H., Lee, K., Lee, C., and Choi, H. (2009), "Numerical evaluation on thermal performance and sectional efficiency of closed-loop vertical ground heat exchanger", *Journal of Korean Geotechnical Society (KGS)*, Vol.25, No.3, pp.57-64.
8. IGSHPA (2000), "Closed-Loop/Ground-Source Heat Pump System : Design and Installation Standards 2000", *Oklahoma state University, stillwater Oklahoma*.
9. Kim E-J, Roux, J-J, Rusaouen, G., and Kuznik, F. (2010) "Numerical modelling of geothermal vertical heat exchangers for the short time analysis using the state model size reduction technique", *Applied Thermal Engineering*, Vol.30, pp.706-714.
10. Korea Expressway Corporation (2007), *Study on applicability of cast-in-place PSC with design strength above 60Mpa*, Final Report, Figure 3.109-3.118.
11. Lamarche, L., Kaji, S., and Beauchamp, B. (2010), "A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems", *Geothermics*, Vol.39, pp.187-200.
12. Lee, C., Park, M., Min, S., Choi, H., and Sohn, B. (2010), "Evaluation of performance of grouts and pipe sections for closed-loop vertical ground heat exchanger by in-situ thermal response test", *Journal of Korean Geotechnical Society (KGS)*, Vol.26, No.7, pp.93-106.
13. Lee, S., Woo, J., and Kim, D. (2008), "A study of determining initial ignoring time of line source model used in estimating the effective soil formation thermal conductivities", *Journal of Energy Engineering*, Vol.17, No.3, pp.167-174.
14. Li, X., Chen, Z., and Zhao, J. (2006) "Simulation and experiment on the thermal performance of U-vertical ground coupled heat exchanger" *Applied Thermal Engineering*, Vol.26, pp.1564-1571.
15. Marcotte, D. and Pasquier, P. (2008) "On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test", *Renewable Energy*, Vol.33, pp.2407-2415.
16. Martin, C. A. and Kavanaugh, S. P. (2002) "Ground thermal conductivity testing control site analysis", *ASHRAE Transactions*, Vol.108, pp.945-952.
17. 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.

18. Niekamp, A., Unklesbay, K., Unklesbay, N., and Ellersieck, M. (1984) "Thermal properties of bentonite-water dispersions used for modeling foods", *Journal of Food Science*, Vol.49, pp.28-31.
19. Pahud, D. and Hubbuch, M. (2007) "Measured thermal performance of the energy pile system of the Dock Midfield at Zurich Airport", *Proceedings of European Geothermal Congress 2007*, Unterhaching, Germany, pp.1-7.
20. Raymond, J., Therrien, R., Gosselin, L., and Lefebvre, R. (2011) "Numerical analysis of thermal response tests with a groundwater flow and heat transfer model", *Renewable Energy*, Vol.36, pp. 315-324.
21. 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.
22. Signorelli, S., Bassetti, S., Pahud, D., and Kohl, T. (2007) "Numerical evaluation of thermal response tests", *Geothermics*, Vol.36, pp.141-166.
23. Smith, M. D. and Perry, R. L. (1999) "Borehole grouting: field studies and thermal performance testing", *ASHRAE Transactions*, Vol.105, pp.451-457.
24. Sohn, B. (2007), "Evaluation of ground effective thermal conductivity and borehole effective thermal resistance from simple line-source model", *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol.19, No.7, pp.512-520.
25. 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.
26. Spilker, E. H. (1998) "Ground-coupled heat pump loop design using thermal conductivity testing and the effect of different backfill materials on vertical borehole length", *ASHRAE Transactions*, Vol.104, pp.775-779.
27. Woo, S., Kim, J., Shin, S., and Whang, K. (2007), "The Comparison of the EWT&LWT between Field Measurement and CFD of Vertical-type Geothermal Heat Exchanger" *Korean Journal of Geothermal Energy*, Vol.3, pp.11-16.
28. Zanchini, E. and Terlizzeses, T. (2008) "Finite-element evaluation of thermal response tests performed on U-tube borehole heat exchangers", *Proceedings of the COMSOL Confernece*, Hannover.
29. 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.

(접수일자 2011. 7. 6, 심사완료일 2012. 12. 6)