

# PHC 에너지 파일의 열교환율 예측에 관한 연구

## Prediction of Heat Exchange Rate in PHC Energy Piles

윤 석 <sup>1</sup>	Yoon, Seok	이 승 래 <sup>2</sup>	Lee, Seung-Rae
박 현 구 <sup>3</sup>	Park, Hyun-Ku	박 도 원 <sup>4</sup>	Park, Do-Won
고 규 현 <sup>5</sup>	Go, Gyu-Hyun		

### Abstract

The use of energy pile foundation has increased for economic utilization of geothermal energy. In particular, coil-shaped ground heat exchanger (GHE) is preferred to the conventional U-shaped exchanger to ensure better efficiency of heat exchange rate. This paper presents a numerical and experimental study on the heat transfer behavior of PHC energy piles. Field thermal performance tests (TPTs) were conducted for the PHC energy piles installed in a partially saturated weathered granite soil deposit, in which two types of GHEs were considered: W and coil shaped GHEs. Besides, three-dimensional finite element analyses were also conducted, and the results were compared with the experimental results. According to the results of TPT and numerical analyses, the coil shaped GHE showed 10~15% higher heat exchange rate than the W type GHE in the PHC energy piles.

### 요 지

최근 들어 경제적인 지열에너지 활용을 위하여 에너지 파일의 적용이 확대되고 있다. 특히 더 높은 열 교환 효율을 확보하고자 에너지 파일의 경우 보다 높은 열효율을 얻기 위해 통상적인 U자형 지중 열교환기가 아닌 코일형 지중 열교환기를 매입하는 경우가 늘어나고 있다. 본 논문에서는 PHC 에너지 파일에 의한 지중 열 전달 거동에 대한 수치 해석 및 실험적 연구를 수행하였다. 화강풍화토로 이루어진 현장에 PHC 에너지 파일을 설치하고 W자형과 코일형 지중 열교환기를 설치한 후 이에 대한 현장 열성능 실험을 수행하였다. 또한 3차원 유한요소해석을 수행하여 지중 온도 및 지중 열교환기 내 순환수 온도 변화를 예측하였고 이를 실험값과 비교하였다. 냉방 부분 가동 조건 하에서 코일형 열교환기 이용시 W자형을 이용했을 때보다 10~15% 열교환율이 상승되는 것을 알 수 있었다.

**Keywords :** Energy piles, Thermal performance test, Numerical analysis, Heat exchange rate

### 1. 서 론

지중 열교환기 시스템은 지중에 설치된 열교환기를

통해 흐르는 물 또는 부동액과 같은 순환유체를 이용하여 열을 추출 또는 배출하는 시스템으로 비교적 일정한 온도를 유지하는 지중을 열원으로 이용하여 여름철에

1 정회원, KAIST 건설및환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., KAIST)  
 2 정회원, KAIST 건설및환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., KAIST, Tel: +82-42-350-3617, Fax: +82-42-350-7200, srlee@kaist.ac.kr, 교신저자)  
 3 정회원, 삼성물산 건설부문 토목 사업부 대리 (Member, Assitant Manager, Civil and Infrastructure Business Unit, Samsung C&T Corporation)  
 4 비회원, KAIST 건설및환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., KAIST)  
 5 비회원, KAIST 건설및환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., KAIST)  
 \* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

는 열에너지를 방출하고 겨울철에는 열에너지를 흡수하는 시스템이다. 지중 열교환기 시스템은 크게 수직형 및 수평형으로 구분할 수 있는데, 수직형 중 밀폐형은 수 십미터에서 수 백미터에 달하는 시추공을 설치해야 하는 이유로 과다한 초기 시공비 문제가 야기될 수 있다. 이에 대한 대안으로써 최근에는 말뚝, 슬라브 등의 구조물의 기초 설치 시 열 교환기를 매입하는 방안이 적용되고 있으며 이 중에서 말뚝 기초에 지중 열교환기를 매입하는 에너지 파일이 가장 널리 사용되고 있다 (Brandl, 2006).

에너지파일의 설치 심도는 일반적으로 수십 미터 이내로 고려되므로 기존 수직 밀폐형 시스템에서 고려하는 단일 U자형 지중 열교환기로는 충분한 열 교환 면적을 확보하는데 어려움이 있다. 따라서 Fig. 1과 같이 단일 U자형 지중 열교환기 이외에도 코일 형태의 지중 열교환기를 매입하는 방안이 적용되고 있다. 에너지 파일 시스템은 초기 투자비가 저렴하며 건축 공정상 별도의 공사비가 필요 없는 등의 장점이 있다.

문헌에 따르면, 단일 U자형 지중 열교환기 또는 여러 개의 U자형 지중 열교환기가 설치된 에너지 파일의 경우 다양한 실험적, 이론적 연구가 수행되었으며 이를 바탕으로 한 많은 해석 모델이 제안되어 있다(Morino and Oka, 1994; Laloui et al., 2006; Pahud and Hubbeck, 2007; Sekine et al., 2007; Choi et al., 2011). 국내의 경우 PHC 파일 기초를 이용한 지중 열교환기 개발 및 성능 평가(Yu, 2008)와 에너지 파일의 열적 거동 인자 분석(Jeong et al., 2010), 그리고 에너지 파일의 열교환 효율

및 성능, 열응력에 의한 역학적 거동 평가(Min et al., 2010) 등이 있다. 그에 반해 코일형 지중 열교환기가 매입된 에너지 파일의 경우 코일의 복잡한 기하학적 형상으로 인한 해석의 어려움 및 짧은 적용 연한으로 인해 많은 연구가 수행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 화강풍화토로 이루어진 현장에 PHC 에너지 파일을 설치하고 W자형과 코일형 지중 열교환기를 파일 내 설치한 후 현장 열성능 실험을 수행하여 에너지 파일의 열교환율을 측정하였다. 열성능 실험은 부분운영조건(8시간 운용, 16시간 대기)으로 4일간 진행하였으며 4일간 측정된 값을 근거로 추세선 분석(regression analysis)을 통하여 3개월 동안의 열성능 값을 예측하였다. 또한 3차원 유한요소해석을 수행하였으며 그로부터 예측된 순환수 온도 변화를 이용하여 열교환율을 산정하고 이를 실험값과 상호 비교하였다. 수치해석과 현장 열성능 실험을 통해 PHC 에너지 파일 내 W자형과 코일형 지중 열교환기의 열효율을 분석하여 이의 적용성에 대해 논의해 보았다.

## 2. 현장 열성능 실험

### 2.1 에너지 파일 및 지중 열교환기 설치 조건

본 연구에서는 수원시 인근 부지에서 PHC 파일을 이용한 현장 열성능 실험을 수행하였다. 에너지 파일은 PHC 파일 내부에 PB(Polybutylene) 소재의 파이프(외경

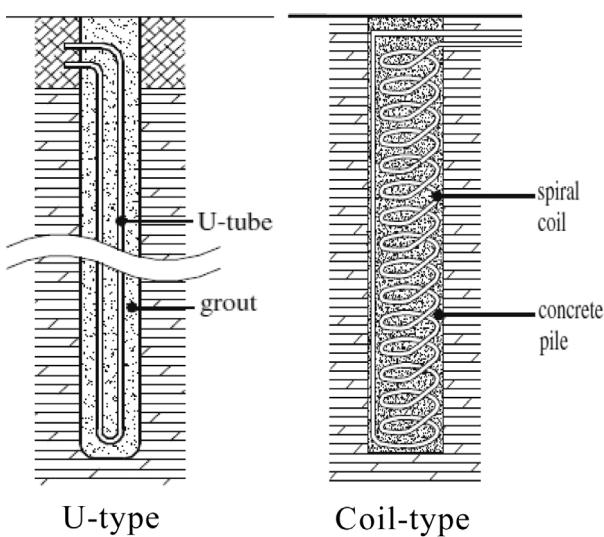


Fig. 1. A vertical borehole and a pile with coil type GHEs (Man et al., 2010)

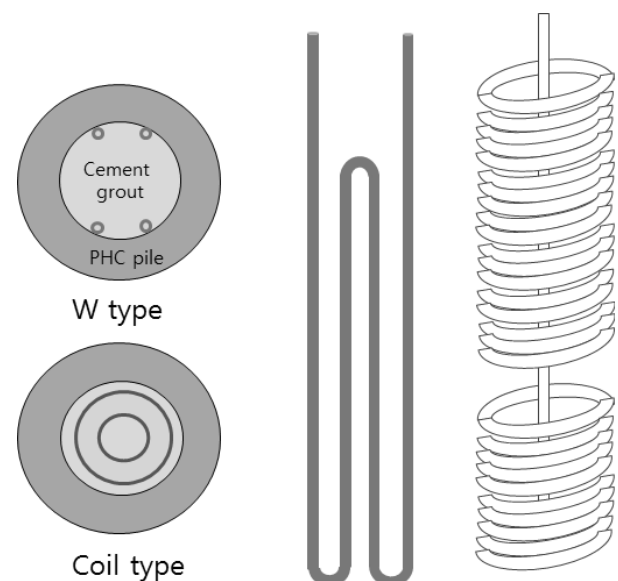


Fig. 2. Diagram of energy piles

/내경: 20mm/16mm)를 W자 및 코일 형태로 결속한 후 내부에 시멘트 그라우트를 채운 형태로 구성되어 있으며 열교환기 배치 상태는 Fig. 2와 같으며 두 파일 간 간격은 10m 이다. 코일형 열교환기의 양 끝에서의 피치 간격은 5cm 정도로 유지되었으며 W자형 열교환기는 시공 여건을 고려하여 PHC 파일 벽면에 설치하였으며 열교환기 입출구 부위에 전기식 센서인 RTD(Resistance Temperature Detector) 센서를 설치하였다. 실험지역에 대해 지반조사를 수행한 결과 풍화토와 풍화암으로 구성되어 있었다. 그 중 풍화토는 19/30~50/12의 N값을 가지고 추정할 때 중간내지 조밀한 상대밀도를 나타냈다. 본 현장의 지반은 실트 및 세립질과 조립질 모래로 분류되어 채취되었고 지하수위는 파일 두부에서 GL(-)4.5m 심도에 위치하였다. 또한 GL(-)11.50m 심도 이하에서는 풍화암이 출현하는 것으로 나타났다. Table 1은 실험에

사용된 에너지 파일 및 지중 열교환기의 제원을 나타내며 Fig. 3의 (a)~(f)는 열성능 실험 전 에너지 파일의 주요 시공과정을 보여주고 있다.

## 2.2 열성능 실험 원리

지중 열교환기의 열전달 메커니즘은 열전달 유체가 보어홀 내의 파이프 내를 이동하면서 그라우트 재료와 주변의 지반으로 열을 흡수 또는 방출하는 과정이다. 지중 열교환기와 주변 지반으로의 열전달 거동은 복잡하고 복합적인 메커니즘이 관여하지만 일반적으로 지반으로의 열전달은 전도에 의해 이루어진다(Brandl, 2006). 그리고 에너지 파일의 열교환율을 산정하기 위해서는 열전달 매개체의 열 저항을 산출하여 열교환율을 산정하여야 한다. 본 연구에서는 실험을 통하여 열교환기로 유입되는 온도를 일정하게 제어한 후 유출수 온도를 측정 후 식 (1)을 이용하여 열교환율을 산정하였다.

Table 1. Specifications of energy piles

GHE	W type	Coil type
Inner diameter of pile (mm)	225	245
Outer diameter of pile (mm)	400	400
Pile length (m)	13.27	12.8
Pipe length (m)	48	196
Type of grout	Cement	Cement

$$Q/L = \dot{m}c(T_{f,inlet} - T_{f,outlet})/L \quad (1)$$

여기서,  $\dot{m}$ 은 순환수의 질량 흐름 속도(mass flow rate, kg/s)이고  $c$ 는 순환수의 비열 그리고  $L$ 은 파일의 길이이



(a) Production of GHE



(b) Installation of GHE into piles



(c) Attachment of sensors



(d) Cement grouting



(e) Heat conservation of pipes




(f) Connection to TPT equipment

Fig. 3. Construction process of energy piles

Table 2. TPT equipment

Item	Specification
Heater	Capacity 5 kW
Water Tank	20 L (SUS 304)
Flow meter	2~20 lpm
Pump	40 m head, 100 lpm
Sensor	RTD



다. 본 연구에서 제작된 열성능 실험기는 지중의 보어홀에 매설된 지중 열교환기 내부를 순환수로 공급하고 유체의 온도변화를 감지하는 시스템으로 구성되어 있다. 지반의 유효 열전도도를 측정할 수 있는 열응답 실험장치와 같이 순환수를 공급하는 수조 내에 히터를 통하여 일정한 전력을 공급할 수 있다. 또한 히터 내의 온도를 일정하게 제어할 수 있는 온도 제어기가 설치되어 있기에 열교환기 유입수 온도를 일정하게 유지하고 유출수 온도를 측정하면 지반과의 열교환율을 측정할 수 있는 기능도 탑재되어 있다. 즉 본 장비를 이용하면 지반의 열전도도를 측정할 수 있는 열응답 실험과 열효율을 측정할 수 있는 열성능 실험이 가능하다고 할 수 있다. Table 2는 열성능 실험기의 제원을 나타낸다.

### 3. 열전달 수치해석 기법

일반적으로 지열히트펌프에 적용되는 지중 열교환기는 고밀도 폴리에틸렌 또는 폴리부틸렌 소재의 파이프가 적용되며, 파이프 내부에 흐르는 순환수와 주변 매질(그라우트 및 지반)의 온도 차이로 인한 대류성 열전달(convective heat transfer) 또한 주요 열전달 메커니즘으로 고려된다. 이와 같은 열전달을 수치적으로 해석하기 위해서는 순환 유체-파이프-주변 매질에 대한 모델링이 요구된다. 일반적으로 지중열교환기 해석에 적용되는 전산유체동역학 해석코드(computational fluid dynamics code, CFD code)는 순환 유체에 대한 유체방정식과 파이프에 대한 매우 상세한 격자망을 요구하며 특히 순환 유체의 난류흐름(turbulent flow) 조건 및 코일형 파이프가 고려될 경우 계산량이 증가한다. 따라서 본 연구에서는 에너지 파일 내의 W자형과 코일형에 대해 순환유체와 주변 매질 간의 열전달 거동을 효율적으로 계산하기 위한 수치해석기법을 적용하였다. 적용된 해석기법은 ABAQUS Standard에 사용자 서브루틴(user subroutine)

URDFLD 및 FILM이 결합된 방법과 CFD 수치해석 프로그램인 Comsol Multiphysics로 구현하였으며 현장 열성능 실험과 비교하여 그 적절성을 살펴보았다.

#### 3.1 열전달 지배방정식

본 연구에 적용된 ABAQUS Standard 프로그램은 열전도 및 지반에서의 이류현상(advection)을 포함하는 열전달 해석을 지원하며, 이에 대한 지배방정식은 식 (2)와 같다.

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} + \rho_w c_w \vec{V} \cdot \nabla \theta = \nabla \cdot (\lambda \nabla \theta) \quad (2)$$

여기서,  $\rho$ 는 지반의 밀도,  $c$ 는 지반의 비열,  $\rho_w$ 는 물의 밀도,  $c_w$ 는 물의 비열,  $\vec{V}$ 는 이류속도,  $\theta$ 는 온도,  $\lambda$ 는 지반의 열전도도를 의미한다. 식 (2)의 이류속도  $\vec{V}$ 는 식 (3)의 Darcy의 법칙에 의해 결정되며,  $k$ 는 지반의 투수계수,  $i$ 는 동수경사를 의미한다.

$$\vec{V} = k \cdot i \quad (3)$$

지반에 지하수 흐름이 없는 경우  $i = 0$ 이 되어 위의 구성방정식 식 (2)는 일반적인 열전도 방정식이 된다.

#### 3.2 W자형 열교환기 열전달 모델링

본 연구에서는 Fig. 4에 도시된 순환수-파이프-그라우트(또는 지반) 간의 에너지 평형 관계를 파이프의 열특성이 등가적으로 고려된 절점 기반(node-based), 유체-그라우트(지반)간 대류성 열전달 경계조건이 식 (4)로 고려하는 해석기법을 적용하였다(Choi et al., 2011).

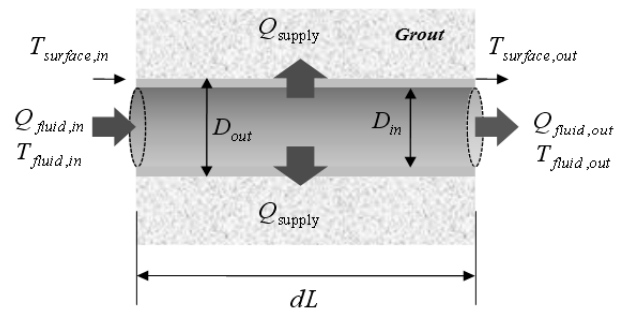


Fig. 4. Energy balance around heat exchanger

$$q|_{\Gamma_g} = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial t} = \begin{cases} h_{eq}(\theta_g - \theta_f), & \text{on-time} \\ 0, & \text{off-time} \end{cases} \quad (4)$$

여기서,  $\Gamma_g$ 는 파이프 외벽면 경계 영역,  $\theta_g$ 는 파이프 외벽면 경계에 놓인 그라우트 온도(K),  $\theta_f$ 는 파이프 내벽면 경계에 놓인 순환수 온도(K),  $h_{eq}$ 는 등가 대류성 열전달 계수이다. 파이프 벽을 따라 유발되는 비정상 열전달이 없다고 가정할 경우, 위의 등가 대류성 열전달 계수는 식 (5)와 같이 정의될 수 있다.

$$h_{eq} = \left[ \frac{D_o}{2\lambda_{pipe}} \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right) + \frac{D_o}{D_i h} \right]^{-1} \quad (5)$$

여기서,  $D_o$ 는 파이프의 외경,  $D_i$ 는 파이프의 내경,  $\lambda_{pipe}$ 는 파이프의 열전도도(W/mK),  $h$ 는 순환수의 대류성 열전달 계수로서 난류 흐름에 대한 식 (6)의 Dittus-Boelter의 관계로부터 정의될 수 있다.

$$h = 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^n \frac{\lambda_{fluid}}{D_{in}} \quad (6)$$

여기서, Re는 레이놀드 수, Pr은 Prandtl 수,  $n$ 은 heating 시 0.4이고 cooling 시 0.3,  $\lambda_{fluid}$ 는 물의 열전도도를 의미한다.  $n$ 은 경험적인 상수로써 냉방과 난방에 다른 값을 적용한다(Winterton, 1998). 한편, 열교환 파이프 경계 격자 절점에서의 Newton의 cooling(또는 heating) 평형 관계는 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 5의 평형 관계를 만족하기 위한 경계부 각 절점 위치에서의 순환수 온도는 식 (7)과 같이 결정된다.

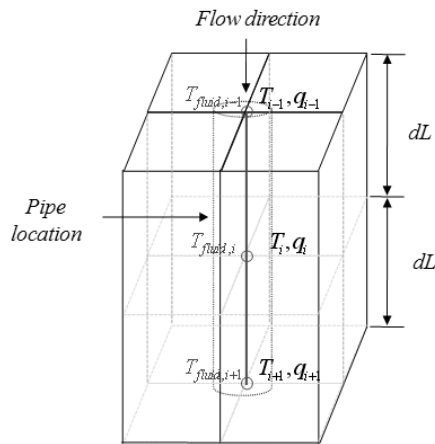


Fig. 5. Grid scheme for calculation of circulating fluid temperature

$$\theta_{f,i} = \begin{cases} \theta_{f,i-1} - \frac{q_i + q_{i-1}}{2} \frac{\pi D_{out} dL}{\dot{m} c_f} & \text{(for cooling)} \\ \theta_{f,j-1} + \frac{q_i + q_{i-1}}{2} \frac{\pi D_{out} dL}{\dot{m} c_f} & \text{(for heating)} \end{cases} \quad (7)$$

여기서,  $q_i$ 는 경계 절점  $i$ 에서의 열흐름량(W),  $\dot{m}$ 은 순환수의 질량 흐름 속도(kg/s),  $dL$ 은 절점 간 거리,  $c_f$ 는 순환수의 비열(J/kgK)을 의미한다.

### 3.3 코일형 열교환기 열전달 모델링

코일형 파이프의 공간적인 위치는 원통형 좌표계에 서 일정한 반경  $r$ 을 갖는 대신 회전각  $\theta$  및 깊이  $z$ 가 변화하는 3차원 특성을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 이를 반영하여 Fig. 6과 같이 Spiral 코일형 열교환기를 Ring-코일 형태로 가정하고, 파이프-지반 경계에서 축대칭 조건에 대한 1차원 열평형방정식 식 (8)을 적용하였다(Nakayama et al., 2002).

$$\begin{aligned} & \rho_f l_p c_f \frac{\partial \theta_{f,n+1/2}}{\partial t} + \rho_f u_f c_f [(\theta_{f,n+1} - \theta_{f,n})] \\ & = \frac{4h^* l_p}{D_{in}} (\theta_g - \theta_f)_{n+1/2} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, 아래 첨자  $n$ 은 흐름 방향에서의 위치,  $\theta_f$ 는 순환수의 온도(K),  $\theta_g$ 는 그라우트(또는 지반)의 온도(K),  $\rho_f$ 는 순환수의 밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $c_f$ 는 순환수의 비열(J/kgK),  $l_p$ 는 단일 코일 피치에 대한 파이프의 길이(m),  $D_{in}$ 은 파이프 내경(m), 그리고  $h^*$ 는 등가의 대류성 열전달계수(W/mK)를 의미한다. 식 (8)의 관계에 대해 central implicit 유한차분기법을 적용하면, 순환 유체의 온도를 식 (9)와 같이 산정할 수 있다.

$$\theta_{f,n+1}^k = \frac{\left[ \rho_f u_f c_f - \frac{1}{2} \left( \frac{4h^* l_p}{D_{in}} + \frac{\rho_f l_p c_f}{\Delta t} \right) \right] \theta_{f,n}^k + \frac{4h^* l_p}{D_{in}} \left( \frac{\theta_{g,n+1}^k + \theta_{g,n}^k}{2} \right) + \frac{\rho_f l_p c_f}{\Delta t} \left( \frac{\theta_{f,n+1}^{k-1} + \theta_{f,n}^{k-1}}{2} \right)}{\left[ \rho_f u_f c_f + \frac{1}{2} \left( \frac{4h^* l_p}{D_{in}} + \frac{\rho_f l_p c_f}{\Delta t} \right) \right]} \quad (9)$$

여기서,  $\Delta t$ 는 계산 시간 증분, 아래 첨자  $n$ 과  $k$ 는 흐름 방향 위치 및 시간 증분 순서를 의미한다.

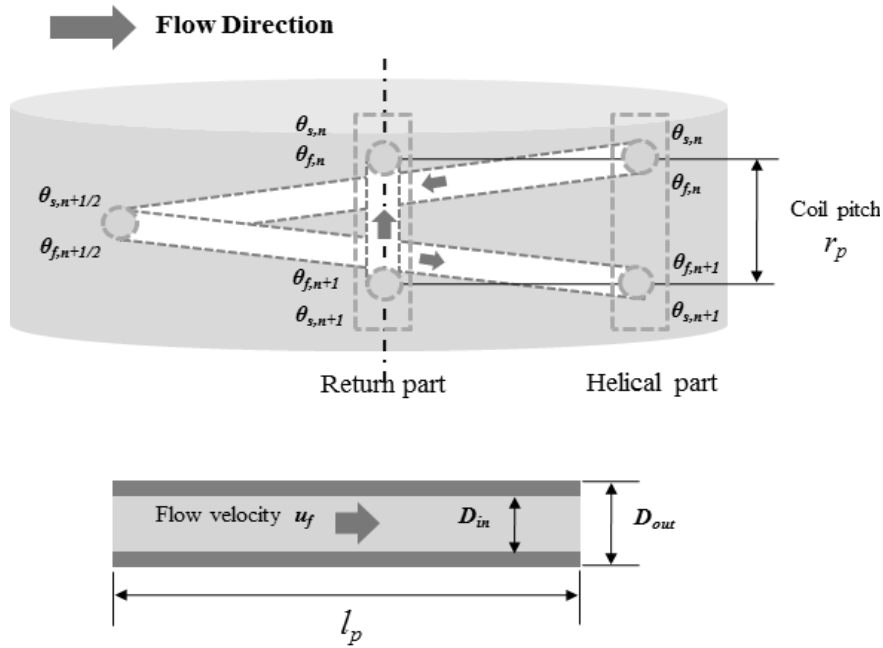


Fig. 6. Modeling of spiral-coil

### 3.4 코일형 열교환기 CFD 수치해석

절점 기반 대류성 경계조건을 실제 3차원 파이프 형상에 대해 적용하기 위하여 코일형 열교환기의 경우 3.3 절의 수치해석 외에도 CFD 기반의 3차원 유한요소모델 해석 프로그램인 COMSOL Multiphysics(Verson 4.3)을 이용하여 열교환기 형상 및 배치에 따른 에너지파일의 열적 거동을 해석하였다. 대류와 전도에 의한 수치 모델의 지배 방정식은 식 (10)과 같다.

$$\rho A c u \nabla T = \nabla \cdot A \lambda \nabla T + f_D \frac{\rho}{2 d_h} |u|^3 + Q + Q_{wall} \quad (10)$$

여기서,  $Q$ 는 일반적인 열원을 나타내며,  $Q_{wall}$ 은 파이프 벽면을 통한 열 교환에 의해서 생기는 열원을 나타낸다.  $f_D \frac{\rho}{2 d_h} |u|^3$  항은 점성에 의한 열손실에 해당한다.  $d_h$ 는 수리역학적 평균 지름이며  $d_h = 4A/Z$ 로 나타낼 수 있다( $A$ 는 파이프 단면적,  $Z$ 는 윤변). 또한  $f_D$ (무차원)는 Darcy의 마찰계수,  $u$ 는 점선속도를 나타낸다.

### 3.5 열성능 실험 수치해석

열성능 실험 시뮬레이션을 위한 유한요소모델은 Fig. 7과 같다. 유한요소모델은 10(가로)×10(세로)×16m(높이) 크기를 갖고 있으며 Fig. 7에는 2(가로)×2(세로)m 부분만 나타내었다. 해석 모델은 그라우트와 PHC 파이프,

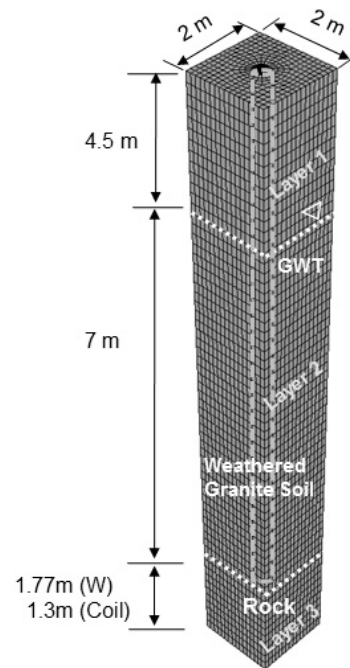


Fig. 7. Finite element model for simulation

그리고 지반으로 구성되어 있으며 6절점 및 8절점 열전달요소(DC3D6 및 DC3D8)가 적용되었다. COMSOL을 이용한 코일형의 경우 Free tetrahedral 격자망이 사용되었으며 최대 요소 크기는 0.590m, 최소 요소 크기는 0.025m이다. 반면, 열교환기 벽면의 격자요소 형성은 직접 격자망을 구성하지 않고 COMSOL Pipe 모듈에 내장된 wall layer 기능을 이용하였다. 지반은 지하수위 위치에 따라 건조-포화 영역으로 나뉘었으며 파이프 주변의 큰

온도 구배를 고려하여 주변 영역의 요소를 조밀하게 분할하였다. 말뚝을 둘러싸고 있는 지반(2m×2m×15m)은 지하수위를 기준으로 불포화층(Layer 1)과 포화층(Layer 2)으로 나누어져 있으며 말뚝 하반부는 암반층(Layer 3)으로 구성된다. Fig. 7에서의 수치해석에 사용된 열물성치는 Table 3과 같다. Layer 1은 지하수위 위의 건조시료를 나타내며 현장의 시료를 채취하여 Hukseflux사의 비정상 탐침(non-steady state probe) 장비인 TP-08을 이용하여 열전도도를 측정하였다. 또한 Layer 2는 지하수위 아래로써 열전도도는 Park et al.(2012)이 제안한 현장 함수비와 단위중량에 따른 화강풍화토의 열전도

도식을 이용하여 도출하였다. 시멘트 그라우트, PHC 파일, PB 파이프 그리고 순환수의 물성값은 관련 문헌을 참고하였다(Jeong et al., 2010). 여기서 시멘트 그라우트의 열전도도는 시멘트 배합조건에 따라 달라질 것으로 판단되나 본 연구에서는 시멘트 양생 후의 열전도도를 측정하지 못하여 Jeong et al.(2010)의 값을 참고하였다.

#### 4. 실험 및 수치해석 결과 비교

Fig. 2와 같이 W자형과 코일형 열교환기가 설치된 에너지 파일에서 현장 열성능 실험을 수행하였다. 실제 상

Table 3. Input thermal properties used in the simulation

Material	Thermal conductivity (W/mK)	Specific heat (J/kgK)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Layer 1	1.10	1160	1800
Layer 2	2.40	1280	2140
Layer 3	3.24	823	2640
Cement grout	2.02	840	3640
PHC pile	1.62	790	2700
PB pipe	0.38	525	955

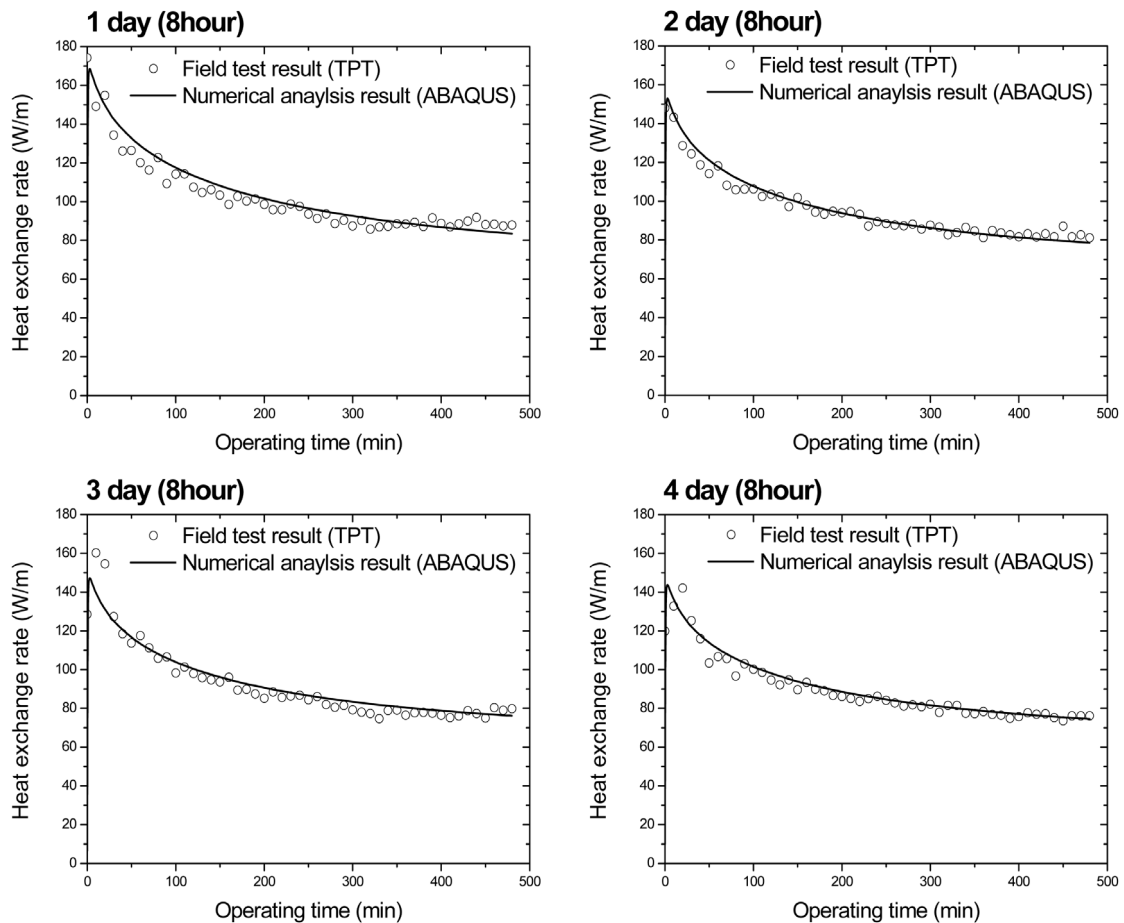


Fig. 8. Four-day heat exchange rate of W type GHE

업용 건물의 냉난방 운영을 모사하기 위해 하루 8시간 가동-16시간 정지를 반복하여 4일간 열성능 실험을 수행하였다. 온도 제어 전 10분간 무부하 운전을 실시하였으며 지반의 초기 온도는 17°C 였다. 에너지 파일로 유입되는 순환수 온도는 냉방 운영조건을 가정하여 30°C로 설정하였다. 위의 운전 조건과 현장 조건을 그대로 시뮬레이션 하여 수치해석을 수행하였으며 이를 실험

결과와 비교 분석하였다. Fig. 8은 W자형 열교환기 이용시 4일간의 열교환율을 나타내며 Fig. 9는 코일형 열교환기 이용시 4일간의 열교환율을 보여준다. 각 일에 대한 열교환율은 8시간 가동시 얻어진 열교환율을 단순 산술 평균하여 계산된 값이다. 4일간의 예측된 열교환율을 근거로 Fig. 10과 같이 회귀분석(regression analysis)을 수행하여 추세선 식을 산출하였으며 산출된 식을 근

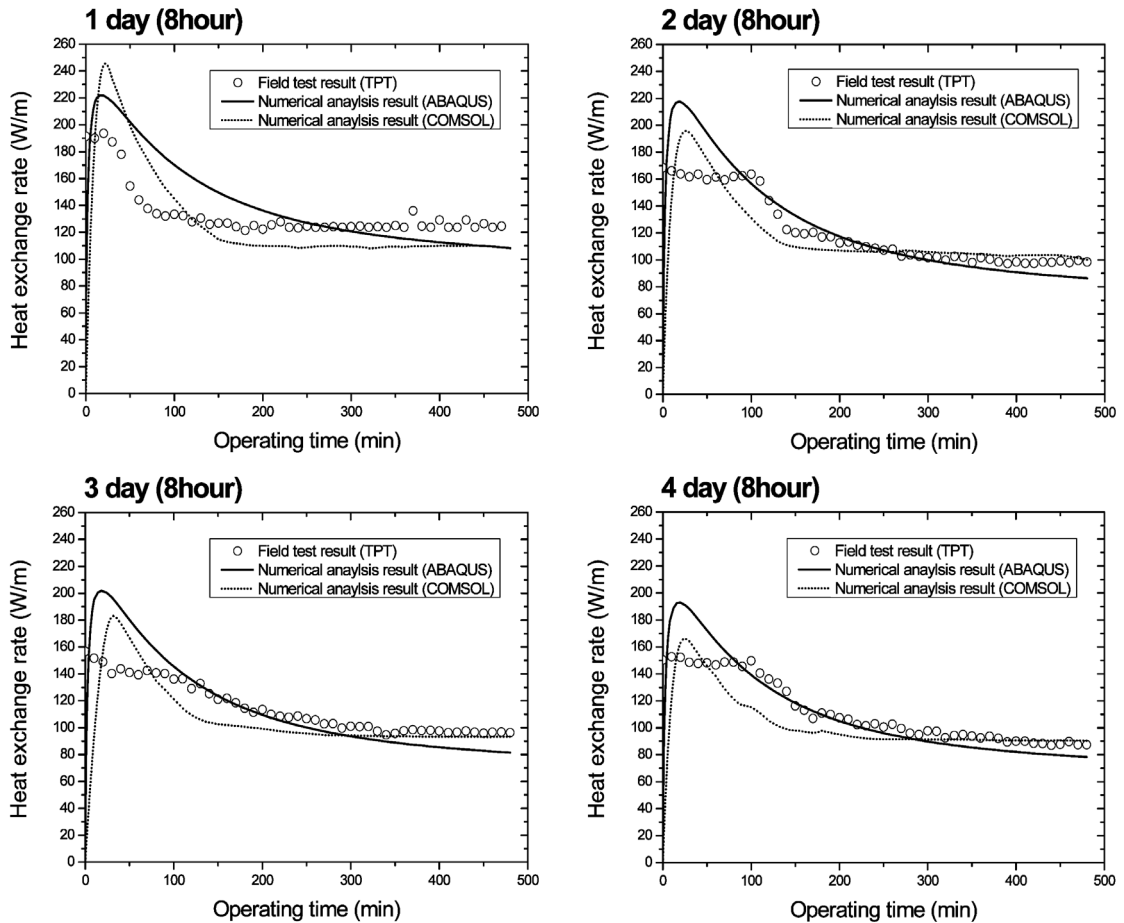


Fig. 9. Four-day heat exchange rate of coil type GHE

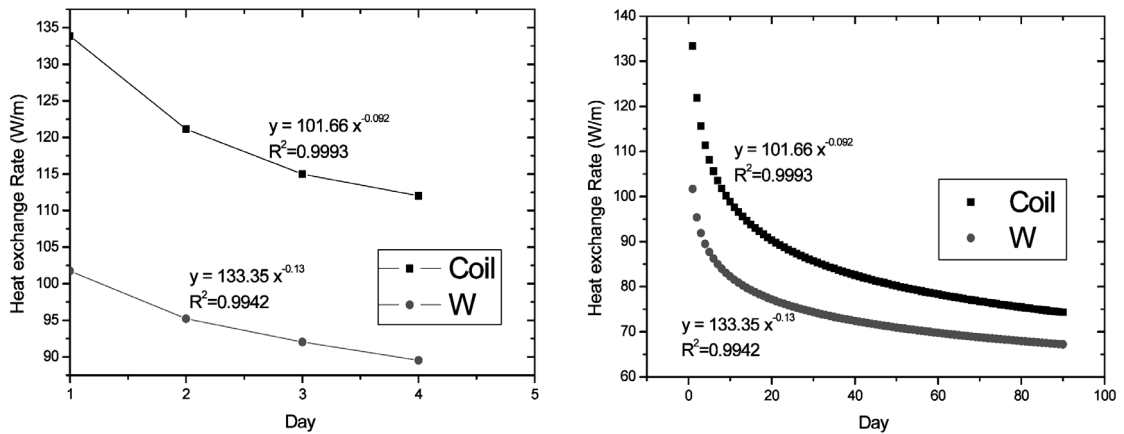


Fig. 10. Heat exchange rate by regression analysis



거로 3개월 가동시 열교환율 값을 예측한 후 이를 수치 해석 결과와 비교하였다(Fig. 10). 4일간 계속된 실험값을 근거로 산출된 추세선 식의  $R^2$ 값은 거의 1에 가까웠기에 본 회귀분석을 통한 3개월 동안의 열교환율 값을 예측하는데 큰 오차 없이 사용될 수 있는 것으로 판단하였다. Fig. 11은 W자형 열교환기의 3개월 간 부분 운전 에 따른 열교환율 값을 나타내며 Fig. 12는 코일형 열교환기의 3개월 간 부분 운전시에 따른 열교환율 값을 나타낸다. 실험 및 수치해석 결과는 상당히 일치하였으며 이는 수치해석 모델이 열교환율 값을 비교적 정확하게 모사하는 것을 알 수 있다. 코일형 열교환기를 이용한 4일간의 수치해석의 경우 ABAQUS 및 CFD 수치해석을 각각 수행하였으며 CFD 해석이 조금 더 실험값과 근사한 결과를 보였으나 큰 우수성을 보이지는 않았다. CFD 해석의 경우 8시간 가동 16시간 휴지의 부분운전 조건을 3개월 장기간 시뮬레이션 하기에는 시간이 과다

하게 소요되어 비교 차원에서 4일동안만 시뮬레이션을 수행하였다. 코일형 열교환기 이용시 열교환율을 산정한 결과 실험과 수치해석 결과는 10% 가량의 오차가 발생하였다. 이는 수치해석시 코일형 열교환기의 모델링에 대한 오차가 어느정도 발생한 것으로 판단되며 또한 코일형 열교환기의 경우 일반 W자형에 비해 수두 손실이 많이 발생되기에 실험시 유량이 일정하게 제어되지 못한 점 등에 의한 차이인 것으로 판단된다. 실험 및 수치해석 결과 3개월 동안 코일형 열교환기 이용시 W자형을 이용했을 때보다 파이프 길이당 열교환율은 약 10~15% 상승되는 것을 알 수 있다. 하지만 파이프 길이당 열교환율은 반대로 W자형이 코일형에 비해 350~400% 높음을 알 수 있다. 전체 시공비 중에 열교환기 파이프 비용이 차지하는 비중은 극히 미미하기에 경제성을 고려해도 코일형 열교환기의 열교환 성능이 W자형에 비해 우수할 것으로 판단된다. 이는 코일형 열교환기 적용

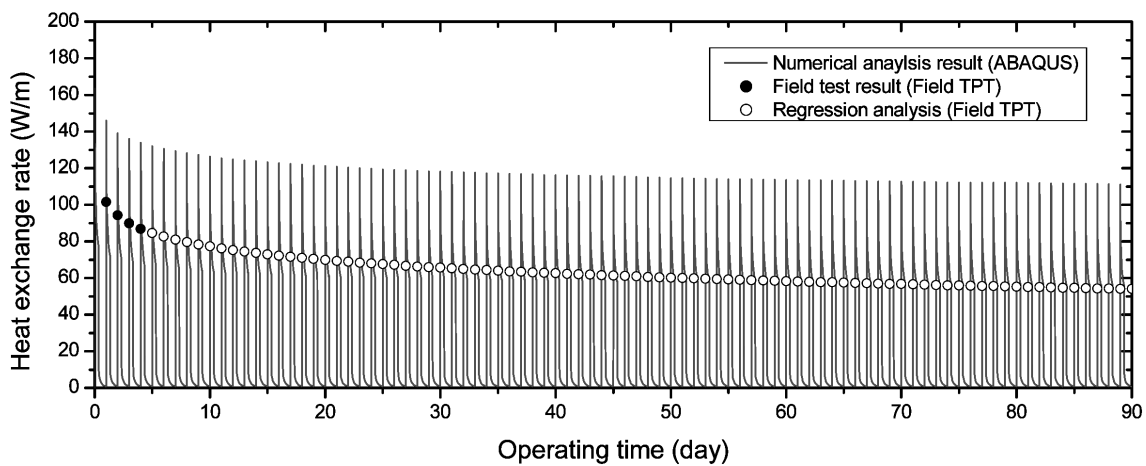


Fig. 11. Three-month heat exchange rate of W type GHE

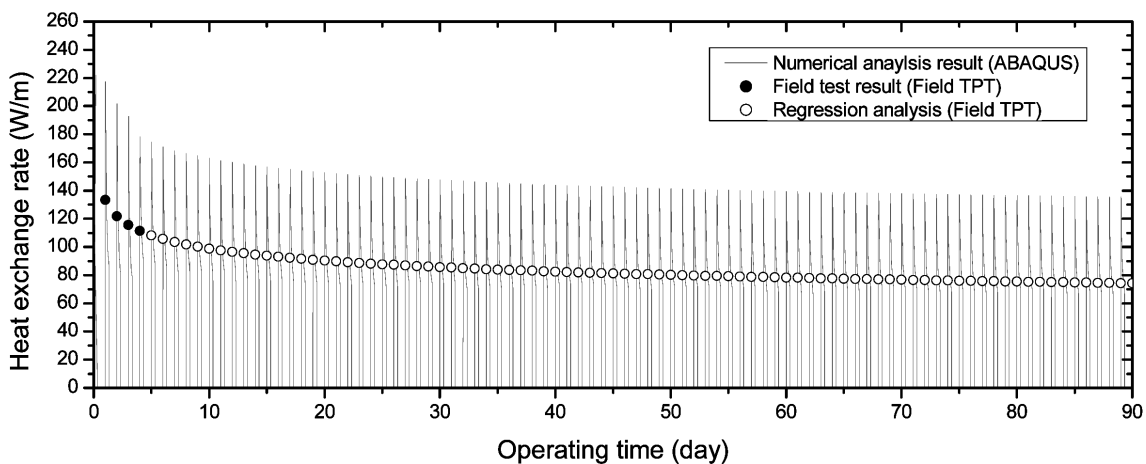


Fig. 12. Three-month heat exchange rate of coil type GHE

Table 4. Summary of numerical analysis and experimental results

GHE type		Four-day heat exchange rate (W/m)					Three-month heat exchange rate (W/m)
		1day	2day	3day	4day	4-day average	3-month average
W type	Experiment	102	95	92	90	95	73.7 (Regression analysis)
	ABAQUS	104	96	93	91	97	74.8
Coil type	Experiment	134	121	115	112	120	84.8 (Regression analysis)
	ABAQUS	137	124	116	111	123	94
	CFD	135	122	115	109	120	-

시 그라우트 및 지반과의 넓은 열교환 면적으로 순환수가 머무르는 시간이 길기 때문에 지반으로의 방출열량이 크기 때문인 것으로 판단된다. 또한 시간이 지날수록 열교환율은 감소하는데 이는 시간이 지날수록 지반의 온도가 증가할 것이며 이는 지반과 순환수의 온도차의 감소를 초래하기 때문이다. Table 4는 시간에 따른 열교환기 형태별 열교환율 결과값을 나타낸다.

## 5. 결론

본 논문에서는 화강풍화토 지층으로 구성된 현장에 PHC 에너지 파이프를 설치하고 W자형과 코일형 지중 열교환기를 설치한 후 현장 열성능 실험을 수행하여 열교환율을 산정하였다. 또한 3차원 유한요소해석을 수행하여 현장 실험을 그대로 모사하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 현장 열성능 실험을 통해 냉방 가동 조건을 가정하여 지중으로 투입되는 순환수 온도를 30도로 제어하였으며 8시간 운전, 16시간 휴지 운영 조건으로 4일간 열성능 실험을 수행하였다. 4일간 측정된 열교환율을 근거로 추세선 식을 산출하여 3개월 가동 시 열교환율 값을 추정하였다. W자형의 경우 4일간 실험값을 근거로 추세선을 이용하여 산정된 3개월 동안의 파이프 길이당 열교환율은 73.7W/m(파이프 길이당 열교환율 : 20.4W/m), 수치해석을 통한 열교환율 값은 74.8W/m(파이프 길이당 열교환율 : 20.7W/m)였다. 또한 3개월 동안의 코일형 열교환기 이용 시 실험을 통한 추정값은 84.8W/m(파이프 길이당 열교환율 : 5.5W/m), 수치해석을 통한 예측값은 94W/m(파이프 길이당 열교환율 : 6.1W/m)값을 보였다.

(2) 본 연구에서 적용한 3차원 유한요소 수치해석은 현장 실험 결과를 비교적 정확하게 모사하는 것을 알 수 있었다. 코일형 교환기 실험과 수치해석 간에는 10% 가량의 오차가 발생하였는데 이는 실제 시공 시 코일 피치가 일정하게 유지되지 못한 시공상 오차인 것으로 판단된다. 코일형 열교환기를 이용한 4일간의 수치해석의 경우 ABAQUS 및 CFD 수치해석을 각각 수행하였으며 CFD 해석이 조금 더 실험값과 근사한 결과를 보였으나 큰 우수성을 보이지는 않았다. 코일형 열교환기 적용시 W자형을 이용했을 때보다 파이프 길이당 열 교환율은 10~15% 가량 열교환율이 상승되는 것을 알 수 있다. 하지만 파이프 길이당 열 교환율은 반대로 W자형이 코일형에 비해 350~400% 높음을 알 수 있다. 전체 시공비 중에 열교환기 파이프 비용이 차지하는 비중은 극히 미미하기에 경제성을 고려해도 코일형 열교환기의 열교환 성능이 W자형에 비해 우수할 것으로 판단된다.

(3) 일반적으로 수직 밀폐형의 열교환율이 40~70W/m 인 것을 감안할 때(European Geothermal Energy Council, 2008), 에너지 파이프는 충분한 열교환율을 가지는 것으로 판단되며 본 현장처럼 파이프의 근입 깊이가 짧게 고정된 경우 U 또는 W자형 보다는 열교환 면적이 넓은 코일형 열교환기를 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원 건설기술혁신산업(11기술혁신E04)과 U-city 석·박사 지원사업으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. ABAQUS Inc. (2004), *ABAQUS User's manual version 6.5*, Rhode Island.
2. Brandl, H. (2006), "Energy foundations and other thermo-active ground structures." *Geotechnique*, Vol.56, No.2, pp.81-122.
3. Choi, J. C., Lee, S. R., and Lee, D. S. (2011), "Numerical simulation of vertical ground heat exchangers: Intermittent operation in unsaturated soil condition." *Computer and Geotechnics*, Vol.38, pp.949-958.
4. COMSOL Multiphysics User's guide (2011), *COMSOL Multiphysics version 4.2a*.
5. European Geothermal Energy Council (2008), *Ground source heat pump: A guide book*, Brussel.
6. Jeong, S-S., Song, J-Y., Min, H-S., and Lee, S-J. (2010), "Thermal influential factors of energy pile", *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.6, No.6C, pp.231-239.
7. Laloui, L., Nuth, M., and Vulliet, L. (2006), "Experimental and numerical investigations of the behavior of a heat exchanger pile", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.30, No.8, pp.763-781.
8. Man, Y., Yang, H., Diao, N, Liu, J. and Fang, Z. (2010), "A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchangers", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.53, pp.2593-2601.
9. Min, S., Lee, C., Park, M., Koh, H., and Choi, H. (2010), "Numerical study of heat transfer efficiency, performance and mechanical behavior induced by thermal stress of energy pile", *Journal of the Korea Society of Geothermal Energy Engineers*, Vol.6, No.2, pp.9-13.
10. Morino, K. and Oka, T. (1994), "Study on heat exchanged in soil by circulating water in a steel pile", *Energy and Buildings*, Vol.21, No.1, pp.65-78.
11. Nakayama, A., Kuwahara, F., Kokubo, N., Ishida, T., and Ohara, M. (2002), "A numerical model for thermal systems with helically-coiled tubes and its experimental verification", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.38, pp.389-398.
12. Pahud, D. and Hubbuck, M. (2007), "Measured thermal performances of the energy pile system of the dock midfield at Zürich airport", *Proceedings of European Geothermal Congress*, Unterhaching, Germany, pp.1-7.
13. Park, H., Park, H., Lee, S-R., and Go, G-H. (2012), "Estimation of thermal conductivity of weathered granite soils", *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.32, No.2C, pp.69-77.
14. Sekine, K., Ooka, R., Yokoi, M., Shiba, Y., and Hwang, S. (2007), "Development of a ground-source heat pump system with ground heat exchanger utilizing the cast-in-place concrete pile foundations of buildings", *ASHARE Transaction*, Vol.113, pp.558-566.
15. Winterton, R., H., S. (1998), "Where did the Dittus and Boelter equation come from?", *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol.41(4/5), pp.809-810
16. Yu, H. (2008), "Development and performance evaluation of ground heat exchanger utilizing PHC pile foundation of building", *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol.28, No.5, pp.56-64.

(접수일자 2013. 1. 27, 수정일 2013. 6. 23, 심사완료일 2013. 9. 12)