

## 내부 열용량을 고려한 수직 지중열교환기의 3차원 수치 모델 개발

### Development of a Three-Dimensional Numerical Model of the Vertical Ground-Coupled Heat Exchanger Considering the Effects of the Thermal Capacity

김의중(Eui-Jong Kim)<sup>†</sup>

인하대학교 건축공학과

Department of Architectural Eng., Inha University, Incheon 22212, Korea

(Received April 6, 2016; revision received July 1, 2016; Accepted: July 3, 2016)

**Abstract** A three-dimensional (3D) numerical model of the vertical ground-coupled heat exchanger is useful for analyzing the modern ground source heat pump system. Furthermore, a detailed description of the inner side of the exchanger allows to account for the effects of the thermal capacity. Thus, both methods are included in the proposed numerical model. For the ground portion, a FDM (Finite Difference Method) scheme has been applied using the Cartesian coordinate system. Cylindrical grids are applied for the borehole portion, and the U-tube configuration is adjusted at the grid, keeping the area and distance unchanged. Two sub-models are numerically coupled at each time-step using an iterative method for convergence. The model is validated by a reference 3D model under a continuous heat injection case. The results from a periodic heat injection input show that the proposed thermal capacity model reacts more slowly to the changes, resulting in lower borehole wall temperatures, when compared with a thermal resistance model. This implies that thermal capacity effects may be important factors for system controls.

**Key words** Vertical ground heat exchangers(수직형 지중열교환기), Ground-coupled heat pump(지열원 히트펌프), Thermal capacity(열용량), Three-dimensional numerical model(3차원 수치모델)

<sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: [ejkim@inha.ac.kr](mailto:ejkim@inha.ac.kr)

#### 기호설명

$b_{uv}$  : U-tube leg 간격 [m]  
 $c$  : 비열 [J/kg · K]  
 $di$  : U-tube leg 간격의 반( $b_{uv}/2$ ) [m]  
 $h$  : 지중열교환기 길이 [m]  
 $k$  : 열전도율 [W/m · K]  
 $M$  : 지열 순환 유체 유량 [kg/s]  
 $N$  : 격자 개수  
 $N_z$  : 지중열교환기의 수직방향 격자 개수  
 $n$  : 기준 시간( $n+1$  :  $\Delta t$  이후의 시간)  
 $Q$  : 지중 부하 [W]  
 $q$  : 모델 격자 사이 열류 [W]  
 $q_s$  : 계산 격자 내의 열 발생량 [W]  
 $R$  : 열 저항 [ $m \cdot K/W$ ]  
 $r$  : 실린더 중심거리 또는 반지름 [m]  
 $T$  : 온도 [°C]

$t$  : 시간 [s]  
 $W$  : 보어 홀 벽체로부터 열류 [W/m]

#### 그리스 문자

$\rho$  : 밀도 [ $kg/m^3$ ]  
 $\theta$  : 각도 [rad] 및 원주 방향

#### 하첨자

$b$  : 보어 홀  
 $f$  : 지중열교환기 순환 유체  
 $g$  : 그라우트(Grout)  
 $p$  : 파이프  
 $po$  : 파이프 외부  
 $pi$  : 파이프 내부  
 $r$  : 실린더 원심 방향  
 $s$  : 지중(ground)

## 1. 서 론

건물 냉난방용 신재생에너지 시스템 중 지열 히트펌프 시스템은 고효율 설비로 인식되어 국내외 설치 사례가 꾸준히 늘어나고 있다. 지열 시스템의 성공적인 운영을 위해서는 지중열교환기의 정밀한 설계는 물론 열 특성을 고려한 운전 전략 수립이 필요하다. 이를 위해 지중열교환기 정밀 모델링은 매우 중요하다.

기존 지중열교환기 모델은 교환기 내부의 열용량을 고려하지 않은 단순화된 지중 공간을 대상으로 한 해석 해(analytical solution)를 이용하는 것이 일반적이다. 그러나 최근 지중열 교환기 설치 방식이 다양해지고<sup>(1)</sup> 최적 제어에 대한 관심이 커지면서 상세 수치 모델에 대한 필요성이 커지고 있다.

본 연구는 지중열 교환기 내부 열용량을 고려하고 주변 지중 부분을 3차원으로 묘사한 수치 모델을 제안하고 이를 수치적으로 검증하여 앞서 언급한 연구를 위한 기본 모델로 사용하고자한다.

## 2. 지중열 교환기 모델 고찰

지중열 교환기 모델은 시스템 운전에 따라 변하는 교환기 주변 지중의 열적 거동 해석에 주안점을 두고 발전해왔다. 초기 무한 선 열원(Infinite Line Source) 모델을 시작으로 실린더 열원(Cylindrical Heat Source) 모델과 유한 선 열원(Finite Line Source) 모델이 대표적인 지중 공간 해석 모델이다. 그러나 해석 해의 경우 초기 및 경계 조건 설정이 제한되어 있기 때문에 교환기 사이의 열 간섭 및 시간 경과에 따라 동적으로 변화하는 지중 부하를 처리하기 위해서는 시간 및 공간 중첩 기법의 사용이 필수적이다. 이러한 모델링 과정에서 다양한 오차가 발생하게 되며 최근 이러한 오차의 원인을 규명하고자 하는 연구가 늘어나고 있다.<sup>(2)</sup> 한편, 스펙트럴(spectral) 변환<sup>(3)</sup> 기법을 이용하여 위와 같은 시간 중첩 과정을 제거하여 오차를 줄이는 연구도 이루어지고 있다. 그러나 활용성 및 가변성 측면에서 수치 모델이 가지고 있는 장점은 해석 해에 비해 매우 크다. 한편 교환기 주변 지중 모델은 수치적이거나 해석적이거나 상관없이 지중열 교환기 내부 영역은 단순한 열 저항으로 처리하는 것이 일반적이다.

그러나 시뮬레이션 기반 상세 설계나 시스템 운전 제어를 위해 교환기 내부 열용량을 고려하는 것이 필요하다.<sup>(4)</sup> 이는 열 저항 모델은 빠르게 변화하는 시스템 특성에 대한 반응을 제대로 표현하기 어렵기 때문이다.<sup>(5)</sup> 내부 열용량을 고려하는 대부분의 연구는 상용 프로그램을 사용하며, 동적이 아닌 경계 조건에서 교환기 내부와 바로 주변부 거동만을 분석하는 것이 일반적이다. 소수의 연구만이 교환기 내부와 외부 지중

영역을 함께 모델링하고, 이 경우에도 엔지니어링 목적의 모델로 사용하기에는 어려운 경우가 많다.

따라서 지중 공간과 교환기 내부 전체를 3차원 수치적 모델(numerical model)로 다룰 경우, 모델의 활용성은 클 것으로 예상된다.

## 3. 3차원 지중열 교환기 모델 개발

### 3.1 3차원 지중 모델

유한차분법(FDM; Finite Difference Method)을 적용하여 지중체(ground volume)를 수치 모델로 묘사하기 위해 우선 계산 격자를 직교 좌표(Cartesian coordinates) 내에서 설정해야 한다.

모델의 격자 크기는 수치 모델에서 중요한 역할을 하며 온도 구배가 크거나 물성치의 변화가 있는 곳의 격자 크기를 작게 설정하는 것이 일반적이다. 그러나 지나치게 촘촘한 격자는 계산 시간을 크게 증가시키는 원인이 된다.

본 연구에서는 지중열 교환기의 수평 및 수직 방향 격자를 Lee<sup>(6)</sup>가 제안한 방법(이하, CKLee 모델이라 부름)에 의해 구성하였으며 개략적인 개념도는 Fig. 1과

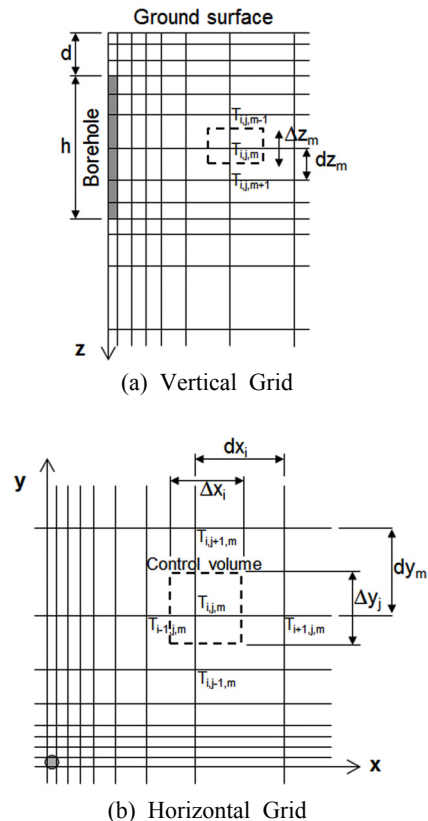


Fig. 1 FDM calculation grid for ground volume.

같다. 수직방향 격자는 최소 격자를 기준으로  $\sqrt{2}$ 의 증분 계수를 사용하여 구성하였으며, 수평방향은 보어필드(Bore-field)와 외부필드(far-field)를 구분하고 외부 필드에 대해서만 앞의 증분 계수를 적용하였다. 보어 필드는 향후 다수의 지중열 교환기를 모델링하기 위하여 별도로 설정한 것이다.

계산 격자 구성을 위한 프로그램 입력 값으로 보어홀 높이 구간( $h$ )의 격자 개수( $N_z$ )와 보어필드 면적만을 입력하면 식(1)로부터 자동적으로 최소 격자 간격을 계산하고 이로부터 전체 격자를 구획할 수 있도록 만들어졌다.

$$\Delta z_{\min} = h \frac{1}{2} (\sqrt{2} - 1) (\sqrt{2}^{N_z} - 1) \quad (1)$$

열전달 미분 방정식을 음해법(implicit scheme)을 이용하여 시간 이산화(discretization)하고, Fig. 1로 표현된 그리드의 각 절점 영역(control volume)에 대해서 공간 이산화하면, 대표 절점  $T_{i,j,m}$ 에 대한 이산화 방정식은 아래 식(2)와 같다. 모든 절점에 아래 식을 적용한 후 주어진 시간 간격마다 수렴할 때까지 반복 계산하여 전체 공간의 온도 분포를 계산할 수 있다.

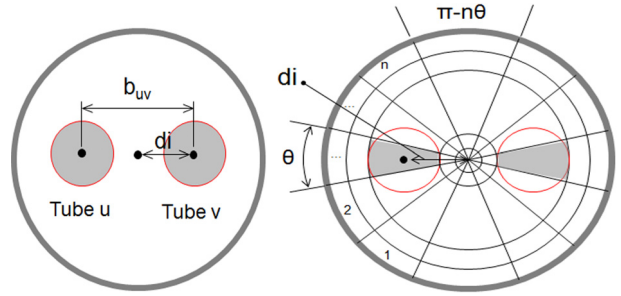
$$\frac{T_{i,j,m}^{n+1} - T_{i,j,m}^n}{\Delta t} = \left( \frac{q_{x^+} + q_{x^-} + q_{y^+} + q_{y^-} + q_{z^+} + q_{z^-} + q_s}{\rho_s c_s \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_m} \right)$$

여기서,

$$\begin{aligned} q_{x^+} &= k_s \Delta y_j \Delta z_m (T_{i+1,j,m}^{n+1} - T_{i,j,m}^{n+1}) / dx_i \\ q_{x^-} &= k_s \Delta y_j \Delta z_m (T_{i-1,j,m}^{n+1} - T_{i,j,m}^{n+1}) / dx_{i-1} \\ q_{y^+} &= k_s \Delta x_i \Delta z_m (T_{i,j+1,m}^{n+1} - T_{i,j,m}^{n+1}) / dy_j \\ q_{y^-} &= k_s \Delta x_i \Delta z_m (T_{i,j-1,m}^{n+1} - T_{i,j,m}^{n+1}) / dy_{j-1} \\ q_{z^+} &= k_s \Delta y_j \Delta x_j (T_{i,j,m+1}^{n+1} - T_{i,j,m}^{n+1}) / dz_m \\ q_{z^-} &= k_s \Delta y_j \Delta x_j (T_{i,j,m-1}^{n+1} - T_{i,j,m}^{n+1}) / dz_{m-1} \end{aligned} \quad (2)$$

### 3.2 내부 교환기 모델

본 연구에서는 위의 지중 모델과 결합할 교환기 내부(그라우트 및 유체) 모델로 열용량 모델을 제안하고 기존의 열 저항 모델과 비교하고자한다. Fig. 2(a)는 별도의 계산 격자가 필요 없는 열 저항 모델을 나타낸 반면, Fig. 2(b)는 원통형 그리드(cylindrical grid)를 이용하여 유체가 순환하는 U관에 해당하는 제어체적이 시스템과 동일 단면적 및 동일 거리를 유지하도록 격자 모양을 설정한 것이다. 내부 열용량 수치 모델은 원통형 그리드에서 정의가 편리하도록 유한 체적법(FVM; Finite Volume Method)을 이용하였다.



(a) Resistance model (b) Proposed thermal capacity model  
Fig. 2 Resistance model and proposed thermal capacity model for borehole portion.

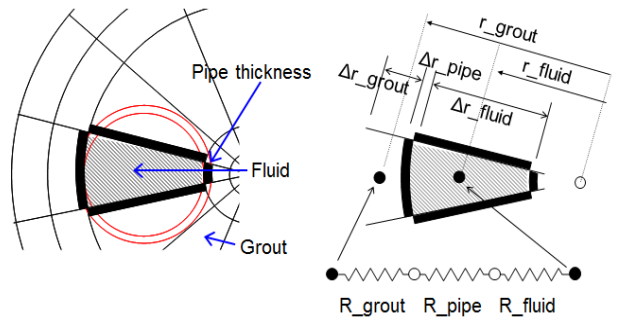


Fig. 3 Calculation of resistance values of borehole materials.

비교 대상인 열 저항 모델은 식(3)과 같이 Hellström<sup>(7)</sup>이 제안한 모델을 사용하였으며 이는 CKLee 모델에서 동일하게 사용되었다.

$$\begin{aligned} R_{uu} &= \frac{1}{2\pi k_g} \left( \ln \left( \frac{r_g}{r_{po}} \right) + \sigma \ln \left( \frac{r_g^2}{r_g^2 - di^2} \right) \right) + R_p \\ R_{uv} &= -\frac{1}{2\pi k_g} \left( \ln(b_{uv}) + \sigma \ln \sqrt{\left( \frac{r_g^2 - di^2}{r_g^2} \right) - b_{uv}^2} \right) \end{aligned}$$

여기서,

$$\sigma = \frac{k_g - k_s}{k_g + k_s}, R_p = \frac{\ln(r_{po}/r_\pi)}{2\pi k_p} + \frac{1}{2\pi h_f r_{pi}} \quad (3)$$

Fig. 3과 같이 열용량 수치 모델에서 각 절점 사이의 열류를 계산하기 위해 열 저항 값을 계산해야 한다. 그림에서 보는 바와 같이 상대적으로 열용량 값이 작은 파이프는 격자 구성에서 제외시키고 열 저항 값( $R_p$ )만을 계산에 포함시켰다.

그림은 유체 절점과 바깥 방향 그라우트 절점 사이의 통합 열 저항( $R_{tot}$ ) 계산 방법을 나타낸 것이다. 식(4)는 직렬로 구성된 각 열 저항 값의 계산식을 나타낸다.

$$R_{tot} = R_g + R_p + R_f$$

여기서,

$$R_g = \frac{\ln(r_g/(r_g - 0.5\Delta r_g + \Delta r_t))}{\Delta\theta k_g \Delta z}$$

$$R_p = \frac{\ln((r_g - 0.5\Delta r_g + \Delta r_t)/(r_g - 0.5\Delta r_g))}{\Delta\theta k_t \Delta z} \quad (4)$$

$$R_f = \frac{1}{h_f \Delta z \Delta\theta (r_f + 0.5\Delta r_f)}$$

위와 같은 원심 방향에 추가하여 원주방향 열 저항  $R_\theta (= \Delta\theta \times r / (k_g \Delta z \Delta r))$ 을 고려하면 원통형 그리드에서 각 절점의 이산화 방정식을 식(2)와 유사한 방식으로 정의 할 수 있고 아래식과 같다.

$$\frac{T_{(k,l)}^{m+1} - T_{(k,l)}^m}{\Delta t} = \left( \frac{q_{\theta^+} + q_{\theta^-} + q_{r^+} + q_{r^-} + q_f^*}{\rho c \Delta\theta \Delta r^2 \Delta z_m / 2} \right) \quad (5)$$

$$q_f^* = \left\{ \begin{array}{l} 0, \text{ for } (k,l) \notin \text{fluid} \\ Mc_f (T_{(k,l)}^{m+1} - T_{(k,l), \text{upward}}^m) \end{array} \right\}$$

여기서 하첨자  $k$ 와  $l$ 은 각각 원통형 그리드의 원심 ( $r$ ) 및 원주방향( $\theta$ ) 격자 지표를 나타내며 우측 분자의 각 항은 위에서 정의한 열 저항 값으로 계산된 방향별 열류를 나타낸다. 이 때 원통형 그리드가 U관의 상하류 지관 속 유체를 나타낼 때는 식(5)와 같이 유체 순환에 의한 열류  $q_f^*$ 를 계산에 포함시킨다.

### 3.3 모델 결합 알고리즘

위에서 정의한 지중 모델과 교환기 내부 모델을 결합하기 위해서 보어홀 벽의 온도( $T_b$ )와 열류( $W$ )를 수렴할 때까지 반복 계산(iteration)하는 방법을 사용한다. 앞서 언급한 바와 같이 각각 FDM과 FVM 방법을 이용하였기 때문에 높이에 따라 두 모델을 결합하는 방법은 Fig. 4와 같이 다소 복잡하다.

수직  $z$ 축 방향으로 두 모델은 격자 절점과 격자 중앙 점으로 각각 제어체적 중앙점이 다르므로 결합 시 수직방향 평균 값을 이용하였다. 그림에서 우측 교환기 내부 모델의 원주 방향 평균 열류를  $W(t, z)$ 라고 할 때 지중 모델의 각 절점  $n^1, n^2, n^3, n^4$ 에 대입되는 열류 값은 이웃하는 제어 체적의 열류  $W(t, z-1)$ 와의 체적가중 평균 값( $\bar{W}(t, z)$ )을 사용하며, 이 값은 4개의 절점에 동일하게 나누어서 입력하게 된다. 이 때 원통형 확산으로 계산된 열류를 직교 좌표에 적용시키기 위한 보정 계수가 필요하며 이를 부하율(load factor)이라고

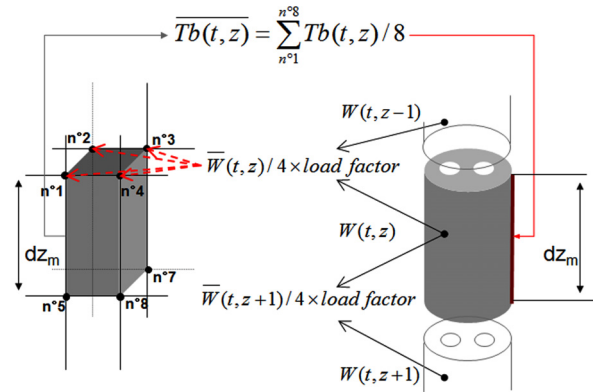


Fig. 4 Coupling method between the FDM ground model and FVM borehole model.

표시하였다. 본 연구에서는 CKLee가 제안한 값인 1.047을 사용하였다. 이 계수는 지중열 교환기 근거리 계산 엄밀 해인 CHS(Cylindrical Heat Source)모델과의 비교를 통해서 얻어진 값이다.

마찬가지로 내부 교환기 모델의 경계 조건이 되는 보어홀 벽 온도  $T_b$ 는 지중 직교 좌표에서 8개 절점의 평균 온도인  $\bar{T}_b$ (Fig. 4 참조)를 사용하였다. 이와 같은 반복 계산 과정은 Gauss Seidel 방법을 이용하여 계산 속도를 높였으며 두 모델 결합 시 수렴 조건은  $\epsilon(\%) < 10^{-3}$ 으로 설정하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 시뮬레이션 조건

본 연구에서 제안한 모델을 검증 및 평가하기 위해서 내부 열용량 부분 및 모델 결합 방법을 제외하고 대부분의 모델링 방법을 차용한 CKLee 모델을 기준 모델로 선정하였다. Table 1은 사용된 지중 및 지중열 교환기 물성치와 시뮬레이션 조건을 나타낸 것이다.

시뮬레이션 입력 값을 위해 식(6)과 같이 시간 간격마다 지중열 교환기 입구 측 유체 온도를 설정 지중 부하  $Q$ 로부터 계산하여 모델에 대입한다. 본 연구에서는  $Q = 4,000$  W의 값을 적용하여 입구 측 유체 온도를 계산하였으며 이는 길이 당 36.3 W/m의 등가 열류 값을 나타낸다. 지중 부하  $Q$ 는 건물의 냉난방 부하를 열펌프의 성능계수로 환산한 값으로 지중열교환기가 감당해야 할 부하를 말한다.

식(7)은 설정 지중 부하  $Q$ 를 일정 주기로 적용하여 유체 온도를 입력했을 때 실제 지중열 교환기 통해 전달되는 열류  $Q_b$ 를 계산하는 식이며, 이로부터  $Q_b/Q$ 로 표현되는 부하 응답률(load ratio)을 정의할 수 있다. 이로부터 모델의 반응 패턴을 확인할 수 있다.

Table 1 Soil and borehole properties

Parameter	Value
Soil thermal conductivity, $k_s$	3.5 W/mK
Soil thermal diffusivity	0.139 m <sup>2</sup> /day
Soil initial temperature	10°C
Borehole radius, $r_b$	0.055 m
Grout thermal conductivity, $k_g$	1.3 W/mK
Pipe thermal conductivity, $k_p$	0.4 W/mK
Length of borehole, $h$	110 m
Number of borehole segments in the vertical grid, $N_z$	20
Fluid mass flow rate, $M$	0.2 kg/s
Fluid specific heat, $cf$	4190 J/kgK
Applied load, $Q$	4000 W

$$T_{in}^{n+1} = T_{out}^n + \frac{Q}{Mc_f} \quad (6)$$

$$Q_b = \sum_{m=1}^{N_z} W_m \times dz_m \quad (7)$$

### 4.2 모델 검증

우선 모델의 검증을 위해 설정 부하  $Q$ 가 지속적으로 주입되었을 때 지중 교환기 벽체 온도( $T_b$ ) 변화를 기준 모델과 비교하였다.

Fig. 5는 연간 시물레이션으로 얻어진 높이에 따른  $T_b$ 를 무차원수로 표현한 것이다. 그림의 각 점은 격자 구획에 따른 절점을 나타낸 것으로 보여줄 양 끝단으로 갈수록 격자 간격이 좁아져 데이터가 많은 것을 확인할 수 있다. 비록 내부 열 교환기 부분을 서로 다른 모델로 구성하였지만 일정한 지중 부하를 지속적으로 적용했을 때 두 모델은 매우 유사한 열적 거동을 나타낸다. 마찬가지로 Fig. 6에서 보는 바와 같이, 전체 적용 부하  $Q$ 에 따라 보여 줄 높이에 따른 부분 부하도 거의 동일한 결과를 보여주고 있다. 이는 지속적인 부하를 적용할 때 내부 열용량 모델의 중요성은 크지 않다는 것을 말해 준다.

Fig. 5 및 Fig. 6의 결과는 제안 모델의 수치 검증 결과를 나타내기도 한다. CKLee 모델은 이미 충분한 수치 검증 과정을 통해 개발되었을 뿐 아니라 실증 연구에도 다양하게 활용되고<sup>(8)</sup> 있다.

### 4.3 내부 열용량 영향

식(6)에 의해 동일한 부하  $Q$ 를 두 모델에 적용시킬 지라도, 지중열 교환기 내 열용량 효과에 의해 두 모델 사이의 반응 속도에 차이가 발생하는 것이 일반적이다. 앞선 결과는 일정한  $Q$ 를 지속적으로 주입한 결과로 부하가 적용된 초기 몇 시간을 제외하고는 반응 속도가 결과에 미치는 영향은 거의 없었을 것으로 예상된다.

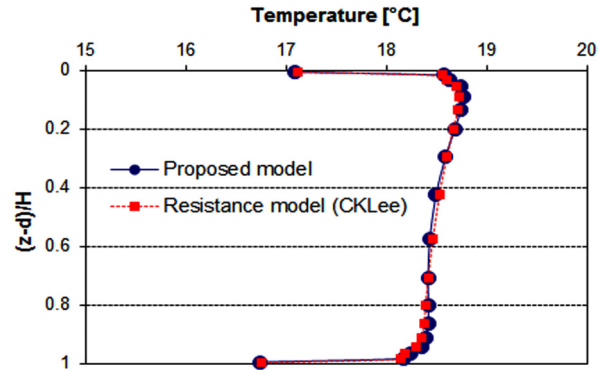


Fig. 5 Borehole wall temperature changes along the depth in one-year operation(Continuous heat injection case).

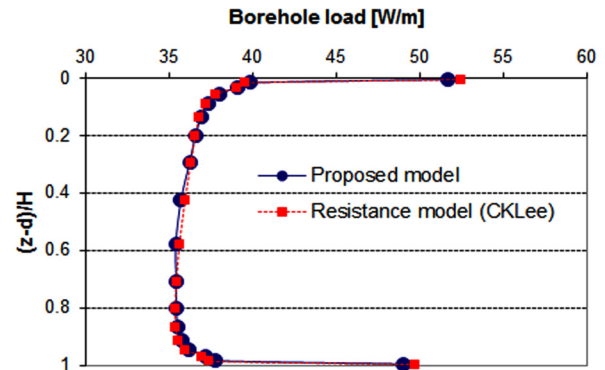


Fig. 6 Borehole load in one-year operation(Continuous heat injection case).

열용량 영향을 확인하기 위해서 12시간 주기로  $Q$ 를 적용시키고 교환기를 통해 전달되는 총 열류를 측정하여 매시간 부하 응답률( $Q_b/Q$ )을 계산하였다. 다음의 두 그림은 그 결과를 나타낸다. Fig. 7은 두 모델의 서로 다른 부하 응답률을 나타낸 것으로, 비교 대상이 되는 CKLee 모델의 경우 제안 모델에 비해 빠르게 응답하는 경향을 가지고 있다. 이는 내부 열용량을 고려하지 않는 모델에서 나타나는 일반적인 현상이다. 제안 모델의 경우 부하 적용 시 보다 느리게 반응하고, 내부 교환기 모델의 축열 효과로 인해 부하 미적용 구간에서도 상대적으로 큰  $Q_b$  값이 존재한다.

Fig. 8은 부하 응답률의 차이(Fig. 7)가 결과적으로 지중열 교환기 주변 온도 차이를 만들어내는 것을 보여주고 있다. 테스트 케이스에서는 초기 지중온도(10°C) 대비 상승 온도 약 5°C 중 0.3°C의 수준으로 약 6%의 온도 차이를 보이고 있다. 결과적으로 Fig. 7~Fig. 8를 통해 열용량 효과에 따른 모델의 응답 속도와 보여 줄 벽체 온도 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 각각 제어 전략 수립 및 장기 시물레이션을 이용한 상세 설계에서 중요한 인자가 된다.



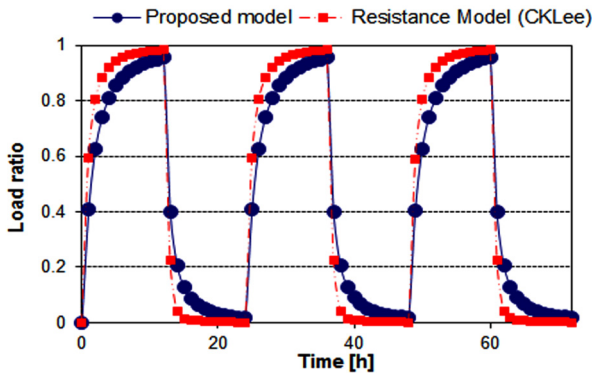


Fig. 7 Load ratio( $Q_b/Q$ ) according to thermal capacity effects(Periodic(12/12 h) heat injection case).

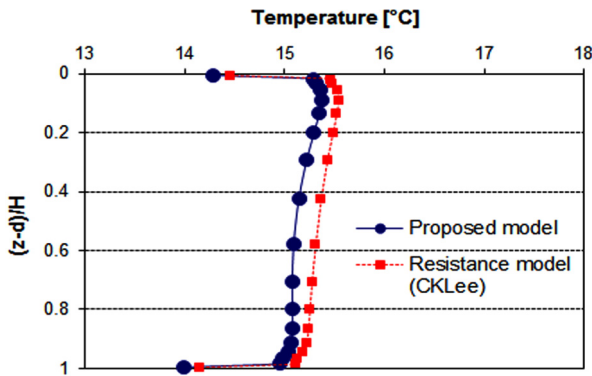


Fig. 8 Borehole wall temperature changes in one-year operation(Periodic(12/12 h) heat injection case).

## 5. 결 론

본 연구는 지중열 교환기 내부 열용량을 고려함과 동시에 지중 공간 전체를 3차원으로 묘사한 수치 모델을 제안하고 있다. 이를 위해 교환기 내부는 원통형 그리드를 이용하고 지중은 직교 좌표를 이용한 수치 모델을 제안하였으며 매 시간 간격마다 반복 계산을 통해 두 영역을 결합하는 방법을 사용하였다.

모델의 검증 및 열용량 효과를 확인하기 위해 제안 모델과 유사하나 열용량을 고려하지 않은 3차원 열 저장 모델(CKLee)을 기준 모델로 비교 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 결과, 지속적으로 지중 부하를 적용한 경우 제안 모델은 기준 모델과 거의 동일한 결과를 나타냈다. 이는 상대적으로 열용량의 효과가 적게 나타나는 정상 경계 조건을 이용하여 제안한 모델을 검증한 결과이기도하다. 한편 12시간 주기로 변하는 동적 부하 적용 테스트에서는 열용량을 고려하지 않은 기준 모델에서 보어홀 벽체 온도가 과도하게 예측되고 부하 변동에 따른 응답 속도가 빠른 경향을 보였다. 즉 내부 열용량의 영향을 시뮬레이션 결과로 확

인할 수 있었다.

본 연구에서 사용된 12시간 주기의 부하 적용 테스트에서 차이를 드러내기 시작한 열용량 효과는 실제 시간 단위 이내로(sub-hourly) 운전되는 지열 히트펌프의 제어 시스템 개발과 지열 설계 등에 더 큰 영향을 미칠 것으로 예상되며 향후 본 연구에서 제안한 모델을 이용하여 언급한 주제에 대한 연구를 진행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업으로 수행한 결과입니다(B6-2429).

## References

1. Yang, H., Cui, P., and Fang, Z., 2010, Vertical-borehole ground-coupled heat pumps : a review of models and systems, *Applied Energy*, Vol. 87, No. 1, pp. 16-27.
2. Cimmino, M. and Bernier, M., 2014, A semi-analytical method to generate g-functions for geothermal bore fields, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 70, pp. 641-650.
3. Claesson, J. and Javed, S., 2011, An analytical method to calculate borehole fluid temperatures for time-scales from minutes to decades, *ASHRAE Transaction*, Vol. 117, No. 2, pp. 279-288.
4. He, M., Rees, S., and Shao, L., 2009, Simulation of a domestic ground source heat pump system using a transient numerical borehole heat exchanger model, *Proceedings, Building Simulation, Glasgow, Scotland*, pp. 607-614.
5. Lamarche, L. and Beauchamp, B., 2007, New solutions for the short-time analysis of geothermal vertical boreholes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 7-8, pp. 1408-1419.
6. Lee, C. K. and Lam, H. N., 2008, Computer simulation of borehole ground heat exchangers for geothermal heat pump systems, *Renewable Energy*, Vol. 33, No. 6, pp. 1286-1296.
7. Hellström, G., 1991, Ground heat storage, Thermal analysis of duct storage systems : Part I. Theory, Doctoral Thesis, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.
8. Lee, C. K. and Lam, H. N., 2012, A modified multi-ground-layer model for borehole ground exchangers with an inhomogeneous groundwater flow, *Energy*, Vol. 47, No. 1, pp. 378-387.