

지열 시스템의 도입이 지중온도환경에 미치는 영향에 대한 해석적 검토

Numerical Analysis of the Effect of Ground Source Heat Pump Systems on the Underground Temperature

남유진 (Yujin Nam)[†]
청주대학교 건축공학과

Department of Architectural Engineering, Cheongju University, Cheongju 360-764, Republic of Korea

(Received March 24, 2013; revision received May 3, 2013)

Abstract Ground heat pump systems utilize the annually stable underground temperature to supply heat for space heating and cooling. The underground temperature affects not only the underground ecosystem, but also the performance of these systems. However, in spite of the widespread use of these systems, there have been few researches on the effect of the systems on underground temperature. In this research, case studies with numerical simulation have been conducted, in order to estimate the effect of ground heat pump systems on underground temperature. The simulation was coupled with the ground water-ground heat transfer model and the ground surface heat transfer model. In the result, it was found that the underground change depends on the heat transfer from the ground surface, the heat exchange rate, and the heat conductivity of soil.

Key words Geothermal System(지열 시스템), Underground Temperature(지중온도), Numerical Simulation(수치시뮬레이션), Case Study(케이스스터디)

[†] Corresponding author, E-mail: namyujin@cju.ac.kr

1. 서 론

최근, 신재생에너지에 대한 관심이 높아짐에 따라 자연에너지를 이용한 냉난방시스템의 도입이 활발해지고 있다. 이와 같은 국내 시장의 움직임은 2004년 대체에너지법 개정 이후, 태양열 및 지열이용 냉난방시스템을 중심으로 보급이 가속화되었고, 특히, 지열이용 공조시스템은 타 열원 시스템과의 결합이 용이하고 디자인적 제약이 적은 장점을 가지고 있어 관련시장의 성장이 현저하게 나타나고 있다. 한편, 지열이용 공조시스템은 지중향온증과의 열교환을 통해 히트펌프의 성능을 향상시키는 기술로 여름철에는 지중으로 방열하고 겨울철에는 채열하는 시스템이다. 하지만, 이러한 지열이용 공조시스템의 보급이 활발해짐에 따라, 지중온도변화에 따른 지중 열오염이나 지하 생태계 파괴에 대한 우려의 목소리가 커지고 있으며, 지중환경에 대한 정량적 평가에 대한 사회적 요구가 나타나고 있다. 이러한 시대적 요구에 대응하고자 국외에서는 지열이용으로 인한 지하온도 변화와 그 영향 범위를 파악하기 위한 연구들이 수행되어 왔다. Cathomen⁽¹⁾은 지중온도변화 예측에 있어 광역 지하수유동 파악의 중요성을 강조하였으며, Tenma et al.⁽²⁾

은 3차원 지하수유동 및 열이동 광역모델을 이용한 지중온도 예측을 실시하였다. 국내에서도, 지중환경에 대한 검토나 지중 열교환기간 이격거리 산정을 위해 모델식을 활용한 몇몇 연구들^(3, 4)이 수행되고 있으나, 지중온도변화의 장기예측을 위한 해석적 검토는 드물다. 특히, 지열이용 시스템은 설비의 도입 후 일정기간 운전하였을 때 초기투자비를 회수할 수 있는 만큼, 설비도입에 있어 장기운전으로 인한 지중환경에 미치는 영향은 반드시 고려해야 할 사항이라 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 지열시스템의 채열 및 방열에 의한 지중온도의 변화범위를 검토하기 위해 3차원 지하수-지중열 이동 해석모델과 지표면 열이동 모델을 활용한 장기 시뮬레이션을 실시하였다. 또한, 케이스스터디를 통해 채열량 조건 및 지질 조건에 따른 지중온도의 영향범위를 분석하였다.

2. 수치 해석 개요

2.1 지하수 및 지중열 이동 해석모델

지중 채열량 예측이나 지중열 이동 해석에 있어, 해석작업의 편의성 및 계산속도 향상을 위해 지하를 단일

구성의 고체로 간주하고 열전도 방정식만 해석하는 연구들⁽⁵⁾이 있으나, 이러한 경우, 지하수의 유동이나 대수층내 온도성층, 자연대류 등의 영향을 정확하게 해석할 수 없다. 본 연구에서는 토양을 기체, 액체, 고체의 3상으로 구분하여 식(1)~식(3)의 방정식(질량보존의 법칙, 운동량보존의 법칙, 에너지보존의 법칙)을 각각의 상에서 모두 만족시키는 3차원 지중열-지하수 이동 모델⁽⁶⁾을 이용하여 시물레이션을 실시하였다. 에너지 보존식에서 열플럭스 j [J/m²/d]는 각 상의 열확산의 전도항과 분산항으로 구성된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_a \rho^\alpha) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\epsilon_a \rho^\alpha v_i^\alpha) = \epsilon_a \rho^\alpha Q_i^\alpha \quad (1)$$

$$v_i^\alpha + \frac{k_{ij}^\alpha}{\epsilon_a \mu^\alpha} \left(\frac{\partial p^\alpha}{\partial x_i} - \rho^\alpha g_i \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_a \rho^\alpha E^\alpha) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\epsilon_a \rho^\alpha v_i^\alpha E^\alpha) + \frac{\partial}{\partial x_i}(j_i T) = \epsilon_a \rho^\alpha Q_T^\alpha \quad (3)$$

여기서, ϵ 은 체적비율 ($0 \leq \epsilon \leq 1$), ρ 는 밀도 [kg/m³], v 는 속도벡터 [m/s], Q_i 는 질량발생항, k 는 침투 텐서(permeability tensor) [m²], μ 는 점성계수 [kg/ms], p 는 압력 [kPa], Q_T 는 에너지발생항을 나타낸다. 또한, 상점자 및 하침자의 α 는 기체, 액체, 고체의 각 상을, i 와 j 는 오일러 공간좌표계의 지수를 나타낸다.

한편, 지표면 부근의 온도변화는 지열이용에 있어 지중열교환기 상부의 채열효율 저하, 항온층 깊이 변화 등과 직접적으로 관련이 있어 지중 채열량 예측에 있어 중요한 경계조건이 된다. 일반적으로 외기온과 지표면의 대류열전달률만을 고려하는 계산수법이 이용되고 있으나, 본 연구에서는 지표면에서의 열이동을 보다 정확하게 해석하기 위해 태양복사, 지표면복사, 현열 및 잠열이동을 고려한 연성(coupling)해석수법을 도입하였다. 즉, 지표면으로부터 지중으로의 이동 열량 Q 는 지표면 전일사량(R_{sol}), 대기에서 지표면으로의 장파복사(R_{sky}), 지표면에서의 장파복사(R_{surf})에 의해 계산되며, 외기로부터의 현열이동(H_s) 및 잠열이동(L_s)에 의한 열량이 동시에 계산된다. 식(4)는 지표면으로부터의 이동 열량 계산식을 보여준다.

$$Q = R_{sol} + R_{sky} - R_{surf} - H_s + L_s \quad (4)$$

또한 각 요소의 계산에 대해서는 식(5)~식(10)과 같은 이론식 및 실험식이 이용되었다.

$$R_{sol} = (1 - \alpha_s)(J_{dn} \times \sin(h) + J_{sh}) \quad (5)$$

여기서, J_{dn} 은 지표면의 직달일사량, $\sin(h)$ 는 태양고각도,

J_{sh} 는 천공일사량, α_s 는 지표면의 일사반사율(albedo)이다.

$$R_{sky} = \sigma(273.16 + T_a)^4(0.526 + 0.076\sqrt{f}) / (1 - 0.062 \times c) \quad (6)$$

여기서, f 는 지표면 부근의 공기의 수증기 분압 [mmHg], c 는 운량, T_a 는 외기온도이다.

$$R_{surf} = \sigma(273.16 + T_a)^4(1 - 0.062 \times c) \quad (7)$$

$$H_{surf} = \alpha_c(T_s - T_a) \quad (8)$$

여기서, T_s 는 지표면온도를 나타낸다. 지표면의 대류 열전달률 α_c 는 유르게스(Jürges)의 실험식에 의해, 지표 부근의 풍속(v)을 이용하여 다음식과 같이 나타낸다.

$$\alpha_c = 5.8 + 3.9v \quad (v \leq 5 \text{ m/s}), \quad \alpha_c = 7.1v^{0.78} \quad (v > 5 \text{ m/s}) \quad (9)$$

$$L_{suft} = \beta \times 7 \times \frac{133.15}{1000} \alpha_c (f_{sat}(T_s) - T_a) \quad (10)$$

여기서, β 는 지표면의 건조의 효과를 나타내는 계수, $f_{sat}(T_s)$ 는 T_s 에서의 포화수증기압이다.

본 해석수법의 타당성에 대해서는, 선행연구⁽⁷⁾에서 지중온도변화에 대한 실측결과와 해석결과의 비교검토를 통해 검증되었다. 본 연구에서는 해석수법을 활용한 장기 시물레이션을 실시한다.

2.2 해석 개요

본 연구에서는 지중채열 및 방열에 의한 지중온도 변화 범위를 해석하기 위해, 유한요소법(Finite Element Method)에 기반한 지반 및 지하수 모델을 이용하였다. Fig. 1은 지중열교환기를 포함한 시물레이션 모델로서 40 m×40 m×30 m의 영역 내에 지중열교환기를 모의한 직경 0.2 m의 보어홀을 설치한 그림을 나타낸다. 지하수는 지표면부터 깊이 -15 m까지를 불포화 영역으로, -15 m 이하를 포화

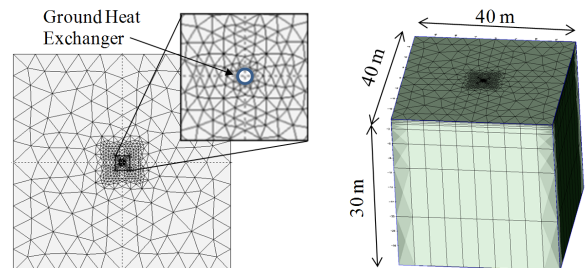


Fig. 1 Simulation Model.

Table 1 Calculation case

Case	λ (W/mK)	Q(W/m)
1-a	0.8	50
1-b	0.8	100
1-c	0.8	200
1-d	0.8	400
2-a	1.5	50
2-b	1.5	100
2-c	1.5	200
2-d	1.5	400
3-a	2.0	50
3-b	2.0	100
3-c	2.0	200
3-d	2.0	400
4-a	3.5	50
4-b	3.5	100
4-c	3.5	200
4-d	3.5	400

영역으로 설정하였다. 한편, 지반은 화강암 조건으로 가정하여 공극률을 0.01로, 투수계수는 1.0×10^{-6} m/s로 하였고, 기상조건은 부산지역의 표준기상데이터를 참고하여 입력하였다. 지하수의 흐름이 존재하는 조건에서는 토양의 투수계수와 지하수 동수구배에 의한 Darcy 법칙을 고려하여 지하수위를 입력하였다. 토양내 고체부분의 열전도율(λ)은 0.8, 1.5, 2.0, 3.5 W/mK로 설정하였다. 또한, 지중 채열량 및 방열량은 일반적인 Single U tube를 이용한 보어홀 방식의 단위깊이당 채열량(Q) 50 W/m를 기준으로 2배, 4배, 8배의 채열 및 방열을 하는 조건으로 하고, 각 케이스에 대한 지중온도변화의 영향범위를 검토하였다. Table 1은 각 케이스의 계산조건을 나타낸다. 한편, 지중 채열 및 방열 기간은 건물의 냉난방 운전조건을 고려하여, 냉방 3개월 난방 3개월 주 7일간 9:00~18:00 운전으로 설정하였다. 각 케이스의 지중열교환기 주위 지중온도변화는 열교환기 중심으로부터의 거리(d)별(3 m, 4 m, 5 m, 6 m) 및 깊이별(5 m, 20 m) 검토를 실시하였다. 해석기간은 에너지관리공단 지열설비 시공기준을 참고하여 10년으로 설정하였다.

3. 수치 해석 결과

3.1 지중열교환기 주변 온도분포

Fig. 2와 Fig. 3은 Case 1-a와 Case 1-d의 결과로 지반내 토양의 열전도율이 0.8 W/m로서 비교적 낮은 값을 가질 때, 운전개시 10년 후의 지중열교환기 주변 지중

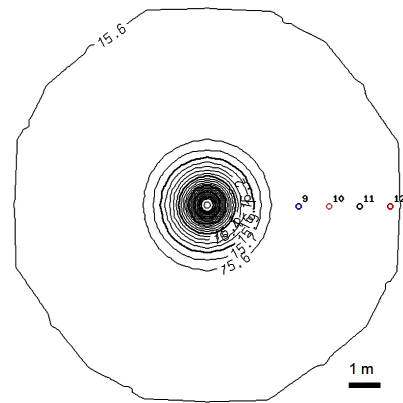


Fig. 2 Distribution of underground temperature (Case 1-a, Depth-20 m).

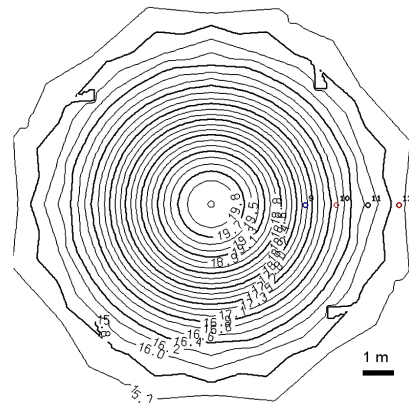


Fig. 3 Distribution of underground temperature (Case 1-d, Depth-20 m).

온도의 분포(깊이 -20 m)를 나타낸다. 단위깊이당 50 W/m의 방열의 경우(Case 1-a), 지중 채열에 의한 지중온도변화는 주로 지중열교환기로부터 2 m 이하의 거리에서 일어나고 그 변화폭도 크지 않은 것으로 나타났다. 반면, 같은 지반에서도 지중 방열량이 Case 1-a의 8배인 400 W/m의 방열을 할 경우, Fig. 3에서 보이는 것과 같이, 지중열교환기 주변의 온도가 20°C 이상 상승하며 토양 내에서의 열확산은 미약한 것으로 나타났다.

한편, Fig. 4와 Fig. 5는 λ 가 3.5 W/mK인 Case 4-a와 Case 4-d에서의 깊이 -20 m 지중 온도 분포를 각각 나타낸다. 이들의 경우, λ 가 0.8 W/mK인 Fig. 2와 Fig. 3에 비해 지중열교환기 주변 열확산이 상대적으로 활발하여 비교적 고른 온도분포를 나타내었다. 특히, Case 4-d의 경우, Case 1-d와 같은 방열량을 가짐에도 불구하고, 전반적으로 낮은 수준의 지중온도를 유지하고 있어, 지중열전도도가 지중열교환기의 열원온도변화에 중요한 인자임을 확인하였다.

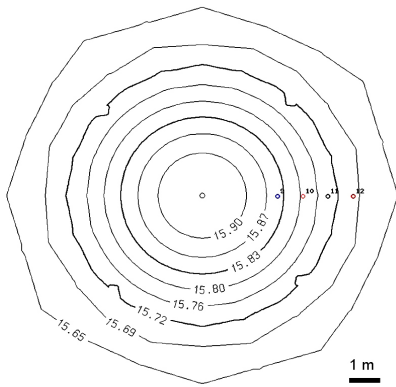


Fig. 4 Distribution of underground temperature (Case 4-a, Depth-5 m).

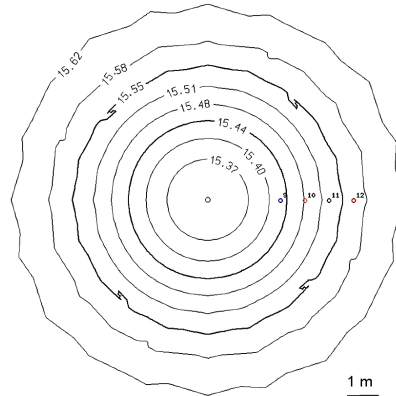


Fig. 5 Distribution of underground temperature (Case 4-d, Depth-20 m).

3.2 장기운전시의 지중온도변화

Fig. 6과 Fig. 7은 Case 1-a의 결과로 지표면으로부터 깊이 -5 m와 -20 m의 중심거리별 지중온도변화를 각각 나타낸다. 깊이 -5 m의 경우, 지중열교환기 중심으로부터의 거리에 관계없이 일정한 주기적 변화를 일으키는 것을 확인할 수 있다. 이것은 모든 케이스의 깊이 -5 m의 지중온도변화에서 나타나는 양상으로, 태양복사, 지표면 온도 등에 의한 지표면으로부터의 열류가 지중 채열 및 방열에 의한 영향보다 더 현저함을 나타낸다. 반면, 항온층인 깊이 -20 m의 온도변화 결과인 Fig. 7에서는 지중 채열 및 방열에 따른 중심거리별 온도변화가 차이를 보이고 있다. 지중열교환기 중심으로부터 3 m 거리에서는 최고 0.39°C의 온도변화가, 6 m거리에서는 최고 0.11°C의 온도변화로 큰 변동은 보이지 않았다.

한편, Fig. 8은 Case 1-d의 결과로 Case 1-a에 비해 채열 및 방열량이 8배 증가한 경우의 지중온도변화(심도 -20

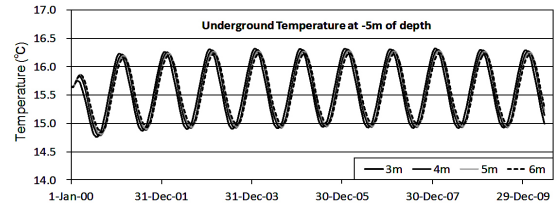


Fig. 6 Fluctuation of underground temperature (Case 1-a, Depth-5 m).

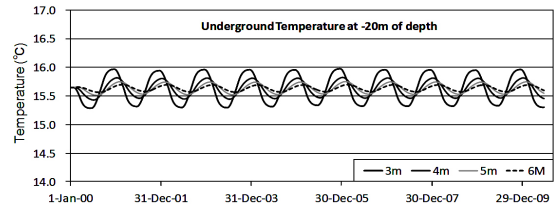


Fig. 7 Fluctuation of underground temperature (Case 1-a, Depth-20 m).

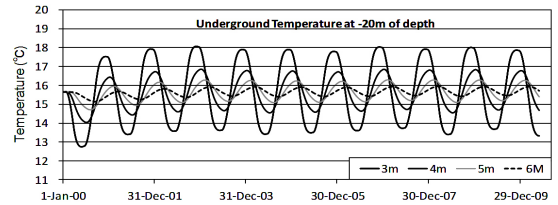


Fig. 8 Fluctuation of underground temperature (Case 1-d, Depth-20 m).

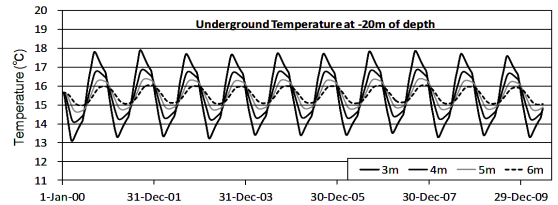


Fig. 9 Fluctuation of underground temperature (Case 4-d, Depth-20 m).

m)를 나타낸다. 지중 채열 및 방열에 의한 중심거리별 온도변화는 더욱 현저하게 나타났으며, 중심거리 3 m에서 최고 18.07°C, 4 m에서 최고 17.22°C, 5 m에서 최고 16.75°C, 6 m에서 최고 16.42°C로 계산되었다. 또한, Fig. 9는 λ 가 3.5 W/mK인 Case 4-d의 중심거리별 지중온도변화(깊이 -20 m)를 나타낸다. Case 4-d는 Case 1-d에 비해 약 4.4배 높은 열전도도를 가지는 토양 조건으로서 채열 및 방열에 따른 온도변화 속도가 비교적 빠르나, 변화폭은 Case 1-d와 비슷한 수준의 결과임을 확인하였다.

Fig. 10은 토양의 열전도도가 3.5 W/mK인 Case 4에서의 중심 거리별 지중 채열량에 따른 지중온도 변화폭(ΔT)의 최대값의 변화를 종합하여 나타낸다. 지중

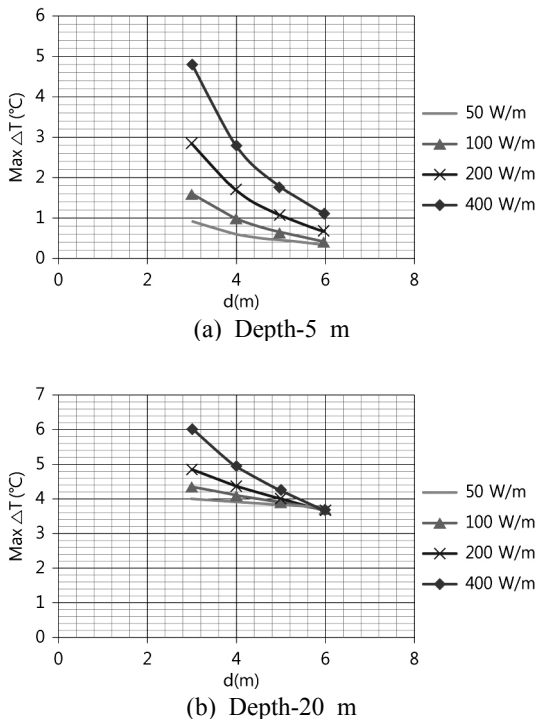


Fig. 10 Maximum ΔT according to d and Q .

채열 및 방열에 따른 지중 온도의 변화는 토양의 열전도도와 채열 및 방열량에 따라 크게 달라지며, 10년간의 지중 온도 변화폭을 1°C를 지중열교환기간 상호 열간섭의 안전범위라고 가정하면, 각 케이스별 이격거리에 대한 결정이 가능하다. 즉, λ 가 0.8 W/mK인 지질 조건에서는 채열량을 50 W/m로 설계할 시에는 최소 3 m 이상 이격하여야 한다는 결론을 도출할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 지열시스템의 채열 및 방열에 의한 지중온도의 변화범위를 검토하기 위해, 3차원 지하수 및 지중열이동 해석모델과 지표면 열이동 모델을 활용한 장기 시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 지표면으로부터 깊이 -5 m의 경우, 지중열교환기 중심으로부터의 거리에 관계없이 지중온도는 일정한 주기적 변화를 나타내며, 이것은 태양복사, 지표면 온도 등에 의한 지표면으로부터의 열류가 지중 채열 및 방열에 의한 영향보다 더 현저함에 기인한다.
- (2) 화강암 지질에서 Single U tube 방식의 채열을 가정한 조건에서 깊이 -20 m의 지중온도 변화폭은 중심으로부터 3 m거리에서 최고 0.91°C, 6 m거리에서

최고 0.32°C로 나타났다.

- (3) 한편, 같은 화강암 조건에서도 현장타설형 에너지 파일 방식과 같이 파일의 단위깊이당 200 W/m의 채열을 가정한 경우, 지중온도의 변화폭은 중심으로부터 3 m거리에서 최고 4.83°C, 6 m거리에서 최고 1.12°C로 나타났다.
- (4) 10년간의 지중 온도 변화폭을 지중열교환기간 상호 열간섭의 안전범위라고 가정하면, 각 케이스별 이격거리를 계산할 수 있으나, 상호 열간섭의 안전 변화폭에 대해서는 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.

본 연구에서는 밀폐형 지열 시스템에 대한 고려만 실시하였으나, 향후, 지하수 수위 및 지하수 이동 조건을 추가하여 개방형 지열시스템의 이격거리에 대한 검토를 종합적으로 실시할 계획이다.

참고문헌

1. Cathomen, N., 2002, Wärmetransport im Grundwasser, Auswirkung von Wärmepumpenlagern auf die Grundwassertemperatur am Beispiel der Gemeinde Altach im Vorarlberger Rheintal. Diplomarbeit, Wintersemester 2001-02, Eidgenössische Technische Hochschule, Zurich.
2. Tenma, N., Yasukawa, K., Uchida, Y., Ohtani, T., and Mori, K., 2007, Numerical Simulation of Subsurface Temperature Change Caused by Geothermal Heat Pump Systems : Study on the Subsurface Thermal Structure at the Sendai Plain 2nd paper, Journal of the Geothermal Research Society of Japan, Vol. 29, pp. 13-23.
3. Min, K. C. and Choi, J. H., 2011, Effect of the Design Parameters of Geothermal Heat Exchanger Design Length, Journal of Korean Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 7, No. 2, pp. 10-15.
4. Jang, J. H., 2011, Model development to simulate standing column well ground heat pump system and sensitivity analysis on the design parameters, MS thesis, Hanyang University, Seoul, Korea.
5. Sohn, B. H. and Choi, J. M., 2012, Performance Prediction of Geothermal Heat Pump(GHP) System with Energy Piles Using Simulation Approach, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 24, No. 2, pp. 155-163.
6. FEFLOW 5.3 Reference Manual, WASY Software.
7. Nam, Y. J., Ooka, R., and Hwang, S. H., 2007, Development of a numerical model to predict heat exchange rates for a ground-source heat pump system, Energy and Buildings, Vol. 40, pp. 2133-2140.