

단일심정 지열히트펌프의 수치적 모델링 Part I: 수치해석 모델 검증

Numerical Simulation of Standing Column Well Ground Heat Pump System Part 1: Validation of the Numerical Model

박 두 희¹ Park, Du-Hee 김 광 균² Kim, Kwang-Kyun
곽 동 엽³ Kwak, Dong-Yeop 장 재 훈⁴ Chang, Jae-Hoon
박 시 삼⁵ Park, Si-Sam

Abstract

Geothermal energy is gaining wide attention as a highly efficient renewable energy and being increasingly used for heating/cooling systems of buildings. The standing column well (SCW) is especially efficient, cost-effective, and suitable for Korean geological and hydrological conditions. However, a numerical model that simulates the SCW has not yet been developed and applied in Korea. This paper describes the development of the SCW numerical model using a finite-volume analysis program. The model, through hydro-thermal coupled analyses, simulates heat transfer through advection, convection, and conduction. The accuracy of the model was verified through comparisons with field data measured at SCWs in the U.S. and Korea. Comparisons indicated that the SCW numerical model can closely predict the performance of a SCW. The numerical model was used to perform a comprehensive parametric study in the companion paper.

요 지

지열은 고효율 신재생에너지로 각광을 받고 있으며 건축물의 냉난방 설비 시스템으로 활용이 점차 확산되고 있다. 지열 히트펌프 중에서 지하수를 열원으로 사용하는 단일심정(Standing column well)은 특히 효율이 높고 초기설치비용이 저렴하며 국내 지반·수리조건에 적합하다. 반면, 국내에는 아직 SCW의 성능을 평가할 수 있는 수치해석 모델이 없으며 국내 자료를 적용한 수치해석이 수행된 바 없다. 본 연구에서는 SCW 수치해석 모델을 유한체적해석 프로그램을 이용하여 구축하였다. 수치적 모델은 수리·열 연계해석을 수행하여 열이류, 대류, 전도를 모두 모사한다. SCW 모델은 미국과 국내에서 계측된 현장 데이터를 통하여 검증하였다. 비교 결과 본 연구에서 구축된 수치해석 모델은 정확하게 SCW의 거동을 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 검증된 수치해석 모델은 동반논문에서 매개변수연구에 활용되었다.

Keywords : Finite-volume method, Geothermal Heat Pump, Hydro-thermal coupled analysis, Numerical model, Standing column well

1 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ., dpark@hanyang.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사 후 과정 (Member, Post Doc., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ.)

3 UCLA 건설환경공학과 박사 과정 (Ph.D Course, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Univ. of California, Los Angeles)

4 한양대학교 건설환경공학과 석사 과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ.)

5 정회원, GS건설(주) (Member, Ph.D., GS E&C Corp.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

화석연료의 고갈로 인한 에너지 위기를 극복하고, 화석연료의 연소과정에서 발생하는 대기오염 물질에 의한 지구 온난화 현상을 해결하기 위한 방안으로 국내외에서 신재생에너지 이용에 대한 관심이 날로 증가하고 있다. 신재생에너지 중에서 초기투자비용 및 에너지 효율적인 측면에서 가장 실용화에 근접한 시스템은 지열 에너지를 이용한 지열 히트펌프 시스템(ground source heat pump system)이라고 할 수 있으며, 최근 들어 국내외 건축물의 냉난방 설비 시스템으로 많이 사용되고 있다. 다양한 종류의 지열 열펌프 시스템 중, 현재 국내외에서 주를 이루고 있는 시스템은 지중 열원 열펌프 시스템(ground-coupled heat pump system)과 지하수 열원 열펌프 시스템(ground-water heat pump system)이다. 지중 열원 시스템은 지하수 열원 시스템과 비교하였을 때 열전달 성능이 다소 떨어져 초기 지열을 포집하기 위한 면적을 많이 차지하며 초기 공사비용이 높은 단점이 있다. 이에 반해 지하수 열원 열펌프 시스템은 열전달 성능, 설치공사비용 및 설치면적 등 여러 가지 측면에서 상대적으로 우수하다(Kavanaugh 등, 1997).

지하수 열원 히트펌프 시스템중 가장 보편적인 방식은 단일심정(SCW, Standing Column Well)이며 이를 수주 지열정, 에너지정(energy well), 난류정(turbulent well)이라고도 한다(한정상 등, 2006). SCW는 단일 수직 심정에서 지하수를 뽑아서 히트펌프로 통과시켜 열을 추출·배출한 후, 이를 동일한 심정에 다시 재주입하는 방식으로 현재 해외에서 활용실적이 크게 증가하고 있는 추세이다. SCW는 기반암 심도가 60m 이하이며 지하수 조건이 우호적일 경우에 특히 매우 효율적이다. 국내는 일반적으로 기반암 심도가 얕고(대략 50m 미만) 지하수위가 높으며(지표면으로부터 약 5~10m, 국가 지하수 정보센터 자료: <http://www.gims.go.kr>), 지하수량이 풍부하여 SCW를 적용하기 위한 이상적인 조건을 가지고 있다(한정상 등, 2006).

반면 현재 국내에는 SCW 관련된 활용 실적이 많지 않고 연구 성과 또한 미비한 실정이다. 또한 국내 지반/지하수 특성이 반영된 설계기준이 아직 정립되지 않아 대부분의 미국의 설계지침(Bose 등, 1988; Collins 등, 2002; Rawling, 2004)을 수정 없이 사용하고 있는 실정이다. SCW의 활용 증대를 위해서는 광범위한 계측결과와 수치해석 결과를 기초로 국내지반특성을 반영한 설

계기준이 수립되어야 하지만 아직 현장계측결과도 부족하고 수치해석모델 또한 개발되어 있지 않은 상황이다.

본 연구에서는 SCW 성능을 평가하기 위한 수치해석 모델을 구축하였다. 수치해석 모델은 심정과 주변지반에서의 물의 흐름과 열전달을 동시에 모사할 수 있는 정밀한 모델이다. 구축된 SCW 수치해석 모델의 정확성은 미국과 국내 의뢰에서 계측된 데이터를 통하여 검증하였다.

2. SCW 시스템

SCW는 약 300m 이하의 연중 온도가 일정한 지하수를 열원으로 이용하는 히트펌프 시스템이다. 그림 1은 SCW를 개략적으로 도시한 구성도이다. SCW의 유입관(suction pipe)은 심정의 저부에서 연중 일정한 온도의 지하수를 채수하여 히트펌프로 공급하며 히트펌프의 열교환기를 통과시켜서 열을 추출·배출한 후 심정 상부에 설치된 유출관(discharge tube)을 통하여 심정으로 환수한다. 유입구는 심정 저부에 위치하지만 실질적으로 지하수를 뽑아내는 수증펌프는 상부에 위치한다. 이는 수증펌프의 심도가 증가할수록 펌프의 양수 동력비가 과다하게 소요되어 비경제적이기 때문이다. 유입관으로부터 히트펌프로 펌핑되는 지하수를 유입수라고 하며 유출관으로 방출되는 물을 유출수라고 한다. 유입수와 유출수를 통합하여 순환수라고 한다. 겨울에는 지상에 비해 상대적으로 따뜻한 순환수를 채수하여 히트펌프

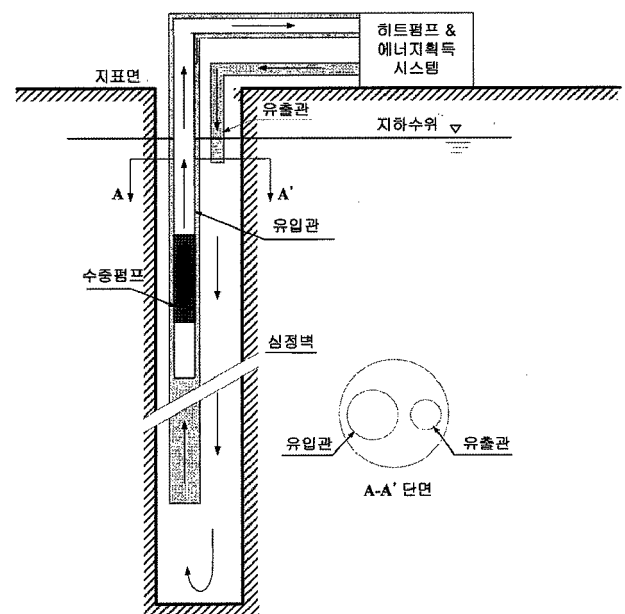


그림 1. 단일심정시스템의 개략도

의 열교환기를 통과시킨 후 온도가 상승한 냉매의 열에너지는 난방용으로 이용하고 열이 추출되어 차가워진 순환수는 심정으로 환수된다. 여름에는 반대로 난방용으로 이용되며 열이 흡수되어 따뜻해진 순환수로 재주입된다.

지중열 히트펌프 시스템이 단순하게 열전도를 통하여 열을 포집하는 반면, SCW는 단일 심정 내에서 유출수, 유입수, 파이프, 주변지반, 지하수 등이 복합적이며 다양한 경로를 통하여 열교환을 하게 되며 열전달 경로로는 심정 벽면에서의 순환수-지반 열전도, 지층에서의 열복사, 순환수-지반 그리고 심정 내 순환수의 열대류, 펌핑으로 인하여 발생하는 지하수의 반경방향 흐름과 이로 인한 열이류 등이며 이러한 열이동 메커니즘은 그림 2에 도식화하였다. 심정 벽면을 통한 지하수의 반경방향 흐름은 심정 저부에서는 펌핑으로 인한 수두저하로 인해 지하수가 흡입되는 반면, 상부에서는 유출관에서 환수로 인하여 순환수가 심정 밖으로 밀려나가게 된다. 심정 중간부분에서는 반경방향흐름이 0이 된다.

심정내의 온도가 과도하게 상승하거나 떨어지면 SCW를 멈추거나 일부분의 유출수를 심정 외부로 배출하여 온도를 조절할 수 있으며 이를 블리딩(bleeding)이라 한

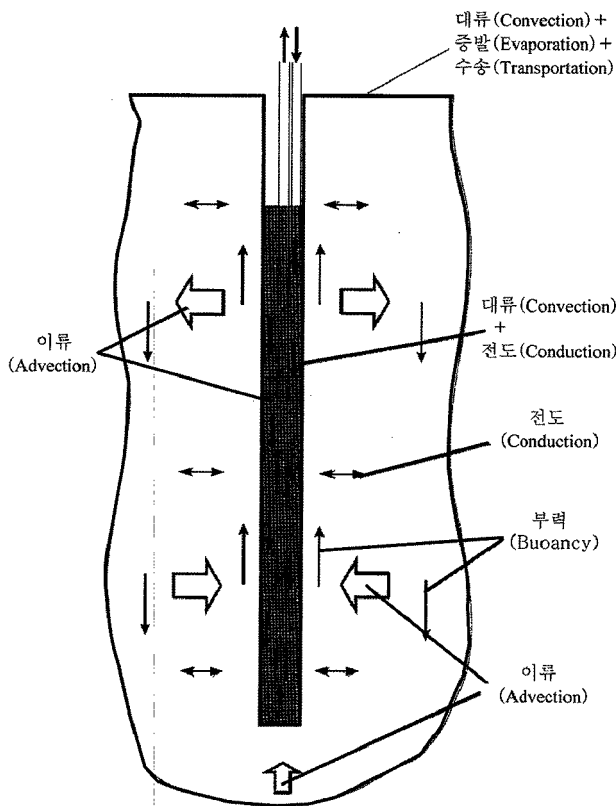


그림 2. SCW 시스템의 열 이동 메커니즘(Rees 등, 2004)

다. 블리딩을 하게 되면 유입수가 유출수보다 많아져 심정 내에 압력차가 증가하여 심정 내부로 지하수의 흡입이 증가하여 열교환이 더욱 활발해진다.

이와 같이 SCW를 모델링하기 위해서는 전술한 다양한 열교환 메커니즘을 모사해야 한다. SCW의 수치해석 모델은 여러 연구자들에 의해 개발되었다(Braud 등, 1983; Deng, 2004; Mikler, 1993; Oliver 등, 1981; Orio, 1995; Rees 등, 2004; Yuill 등, 1995).

Braud 등(1983)과 Oliver 등(1981)은 물의 흐름을 층류로 가정하고 열전도만이 열전달 메커니즘에 고려된 수치모델을 개발하였다. 하지만 이는 SCW의 장기거동 모사에 대하여 열이동을 과소예측하고 블리딩을 고려하지 못하는 단점이 있다. Mikler(1993)와 Yuill 등(1995)은 SCW 주변의 대수층을 전도와 대류를 통해 수리적-열적 에너지 이동을 모사하였으나 대수층을 층류와 등방성으로 단순화하고 블리딩을 모사하지 않았으며 수직방향의 열전달을 고려하지 않았다. Orio(1995)는 Kelvin의 층이론을 이용하여 SCW의 열전달을 모델링하였다. Orio(1995)는 블리딩이 유효 열전도도를 증가시킬 수 있음을 밝혀냈지만 Kelvin의 층이론으로는 이를 직접적으로 모사할 수 없었다. Deng(2004)과 Rees(2001)는 수리-열 연계해석이 가능한 2차원 축대칭 수치해석 프로그램을 개발하였으며 이를 계측자료를 통하여 검증하였다. 이 모델은 균등한 지반에만 적용할 수 있으며 3차원으로 확장할 수 없어 복수 SCW의 연계 성능을 평가할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 또한, 이 프로그램은 공개되지 않았기 때문에 사용할 수 없다.

3. SCW 시스템 수치해석 모델 구축

3.1 유체흐름 및 열전달 모델

본 연구에서는 Fluent(Fluent, 2006) 프로그램을 이용하여 SCW를 모델링 하였다. Fluent(Fluent, 2006)는 ANSYS사에서 개발된 유한체적 해석프로그램이며 유체흐름, 난류해석, 열전도 등 수리-열 해석에 널리 사용된다. Fluent(Fluent, 2006)는 질량 및 운동량 보존방정식을 풀어서 유체흐름을 모델링 한다. 질량보존법칙은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

여기서, $\rho =$ 밀도, $t =$ 시간, $v =$ 유속, $S_m =$ 연속체에 추가되는 질량원을 나타낸다. 한편 운동량 보존방정식은 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

여기서 $p =$ 정수압, $\vec{\tau} =$ 응력 텐서, $\rho \vec{g} =$ 중력에 의하여 작용하는 체력(gravitational body force), $\vec{F} =$ 외부에서 작용하는 체력(external body force)이다.

지반, 심정, 파이프 내의 흐름은 기본적으로 층류로 가정하였다. 지반은 Darcy flow라고 가정하였으며 지반에서의 수두(압력)손실은 식 (3)과 같이 계산하였다:

$$\nabla p = -\frac{\mu}{k} \vec{v} \quad (3)$$

여기서 $\mu =$ 점성, $k =$ 수리전도도이다. 파이프와 심정내의 흐름은 non-Darcy flow이지만 유효 수리전도도를 식 (4)와 같이 적용하여 Darcy flow로 모델링하였다(Chen 등, 1999).

$$k_{eff} = \begin{cases} k & \text{지반} \\ \frac{d^2 \rho g}{32 \mu} & \text{파이프} \\ \frac{2gd}{uf} & \text{심정내} \end{cases} \quad (4)$$

여기서, $d =$ 심정직경, $\rho =$ 물의 밀도, $g =$ 중력가속도, $\mu =$ 점도, $u =$ 심정내 평균유속, $f =$ 마찰계수이다. 특히 심정벽면과 인접한 흐름은 벽면의 거칠기 때문에 층류로 가정할 수 없으며 난류로 모델링 해야 한다. 실제로 난류해석을 수행하기 어려우며 많은 수의 변수를 산정해야 하므로 식 (4)와 같이 유효 수리전도도를 적용하는 것이 효율적이다. 난류계산을 위한 마찰계수 f 는 다음 식 (5)로 산정한다(Chen, 1979).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 3.48 - 1.7372 \ln \left[\frac{\varepsilon}{a} - \frac{16.2426}{Re} \ln A_2 \right] \quad (5)$$

여기서, Re 는 식 (6)으로 계산한다. ,

$$Re = \frac{D_h V}{\nu} \quad (6)$$

여기서, $D_h =$ 수력학적 직경, $V =$ 유체 속도, $\nu =$ 유체 동점성계수이다. 계수 A_2 는 식 (7)로 계산한다.

$$A_2 = \frac{(\varepsilon/a)^{1.1098}}{6.0983} + \left(\frac{7.149}{Re} \right)^{0.8981} \quad (7)$$

여기서, $\varepsilon =$ 표면거칠기, $a =$ 덕트반경이다.

Fluent(Fluent, 2006)에서 적용된 열 전달 모델은 다음의 식과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) \\ & = \nabla \cdot \left[k_{eff} \nabla T - \left(\sum_i h_i \vec{J}_i \right) + (\vec{\tau} \cdot \vec{v}) \right] + S_h \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $E =$ 매질의 에너지, $\rho =$ 매질의 밀도, $k_{eff} =$ 유효 열전도도, $T =$ 온도, $h =$ 엔탈피, $J =$ 확산선속, $S_h =$ 열원의 엔탈피를 나타낸다. 우변항 세 개의 항은 전도, 확산과 점성 소산으로 인한 에너지 전달을 나타낸다. 다공성 매체에서는 식 (8)을 식 (9)로 대체하게 된다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(n \rho_f E_f + (1-n) \rho_s E_s) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho_f E_f + p)) \\ & = \nabla \cdot \left[k_{eff} \nabla T - \left(\sum_i h_i \vec{J}_i \right) + (\vec{\tau} \cdot \vec{v}) \right] + S_f^h \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $n =$ 매질의 공극률, $E_f =$ 전체 유체의 에너지, $E_s =$ 전체 고체의 에너지, $\rho_f =$ 유체의 밀도, $\rho_s =$ 고체의 밀도, $S_f^h =$ 유체의 엔탈피를 나타낸다. 식 (9)의 유효 열전도도는 다음의 식과 같다.

$$k_{eff} = n k_f + (1-n) k_s \quad (10)$$

여기서 k_f, k_s 는 각각 유체와 고체의 열 전도도를 나타낸다.

Fluent(Fluent, 2006)에서는 지반은 Solid zone(Porous media)로 지정하고 심정 내 영역(유출관, 유입관, 심정 내부)은 Fluid zone으로 지정하여, 각각의 지정된 zone에 대하여 유효 수리전도도를 적용하게 된다(식 (4)). 단, 유효 수리전도도를 적용하기 위해서는 f 를 정의해야 한다. f 는 나아가 식 (5)에 의하여 결정되며, 식 (5)의 Re 를 구하기 위해서는 유속 V 가 필요하며 Re 로부터 식 (5)의 A_2 가 결정되기 때문이다. 본 연구에서는 매시간 단계마다 유속 V 로부터 $A_2 - f - k_{eff}$ 을 순차적으로 계산하는 UDF(User Defined Function)을 개발하여 해석에 적용하

였다. 또한, Fluent(Fluent, 2006)에는 장기가동 모델링을 위하여 SCW를 반복적으로 가동-정지하는 기능을 수행하는 기능이 없으므로 마찬가지로 이에 대한 UDF 모델을 개발하여 적용하였다. UDF는 SCW 가동 시에는 0보다 큰 유량을 적용하며 정지기간에는 0을 적용한다.

3.2 재료 모델 및 경계 조건

SCW 시스템의 수치 모델은 심정과 심정을 둘러싼 지반 두 구역으로 구성되어 있다. 심정은 모델 중앙에 위치하며 심정경계, 유입관, 유출관, 유입구, 유출구로 구성되어 있다. 지반은 다공성 매체(porous medium)로 모델링 하였고 지하수위는 지표면에 위치하는 것으로 가정하였다. 실제의 우물관 내 유입관 및 유출관의 단면형상은 그림 3(a)와 같지만 축대칭 해석을 수행하기 위해서 유입관과 유출관의 형상을 그림 3(b)와 같이 수정하여 나타내었다. 수정된 유출관은 링 형상이며 실제 형상과는 다르지만 실제 유출관의 단면적과 동일하도록 링의 두께를 결정하였다.

수치 모델의 측면, 상부 및 하부 경계면은 압력 입력 경계를 적용하였고 지표면에서의 전체수두는 대기압으로 초기화하였다. 지반의 온도는 주어진 지열경사에 상응하도록 초기 온도 경계조건을 적용하였다. 지반 입력 물성은 수리전도도, 열전도도, 밀도, 비열 및 공극률이며, 파이프의 입력물성치는 밀도, 비열, 열전도도이다. 지반은 균일하지 않을 경우, 다층으로도 모델링이 가능하다. SCW 설계변수는 심정 심도, 심정 직경, 유입 및 유출관의 직경, 유입 및 유출구의 심도이다.

심정과 주변지반에서의 물의 흐름은 유입관과 유출관의 유량을 적용함에 따라 활성화된다. 블리딩을 사용하지 않을 경우에는 유입관-유출관의 유량을 동일하게 적용하며, 블리딩을 적용할 경우에는 유출관의 유량을

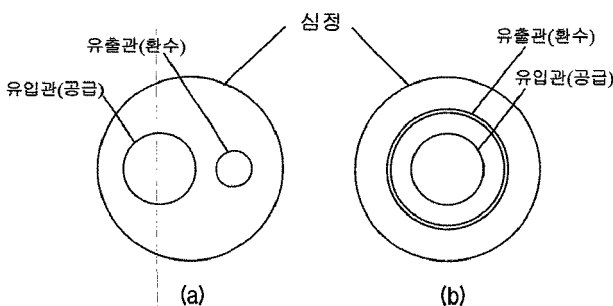


그림 3. SCW 단면 (a) 실제형상, (b) 축대칭해석에서 적용된 등가환산 형상

블리딩율만큼 감소시켜 유입수의 양을 상대적으로 크게 적용하여 지하수의 흡입량을 증가시킨다. 해석 시, 유입구의 유입유량과 유출구의 유출수 온도 및 유출유량을 경계조건으로 적용하였으며 이로 인한 유입구의 유입온도를 계산하였다.

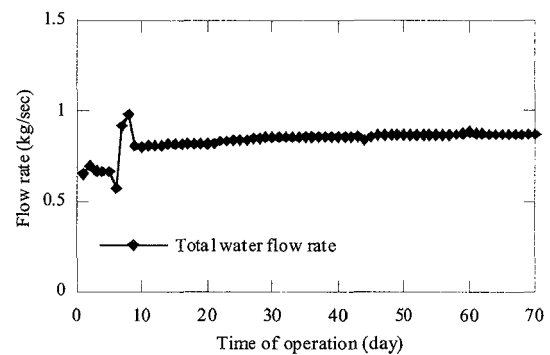
4. 해석 모델링 검증

본 연구에서 제안된 수치해석 모델의 정확성을 검증하기 위하여 미국 Pennsylvania State 대학에 설치된 SCW와 국내 의령 체육진흥센터에 설치된 SCW의 현장 계측 데이터와 수치해석 결과를 비교하였다.

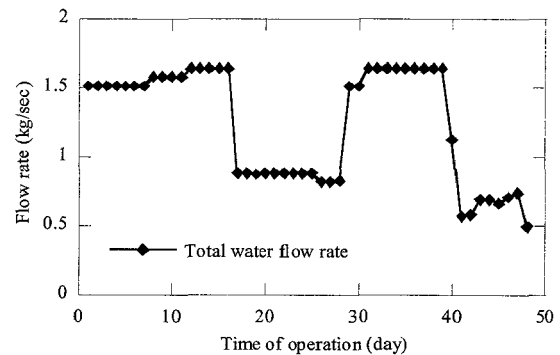
4.1 미국 Pennsylvania State 자료 검증

Mikler(1993)는 Pennsylvania State 대학 내에 심도 320m의 SCW를 모니터링 목적으로 설치 및 운영하였다. Pennsylvania State 대학에 설치된 SCW의 대상 지반은 석회암이며 심정의 직경은 약 15cm, 심도는 350m 이다. 지하수위는 지표면으로부터 30m 하부에 위치한다.

Mikler(1993)는 온도측정센서를 심정에 깊이별로 설



(a) 난방모드



(b) 냉방모드

그림 4. Mikler(1993) 현장실험 검증에 적용한 입력유량

치하여 심정 내 지하수의 온도를 측정하였다. 또한 온도 측정센서를 유입관과 유출관 입구에 설치하여 유입수 및 유출수 온도를 측정하였다. 심정 내 순환하는 물의 유속과 유량은 유량 센서를 설치하여 계측하였다. SCW는 1992년 8월 4일부터 9월 20일까지 총 48일간 연속으로 가동되었다. 이후 42일간 SCW의 가동을 중지하였고, 그 후 12월 10일부터 2월 19일까지 연속으로 난방모

드로 운영하였다. 그림 4는 냉·난방 가동 시 측정된 유출유량을 나타내며 그림 5에는 유출수 및 유입수 온도를 도시하였다. 그림 5에서 To pump는 유입수를 의미하고 To well은 유출수를 의미한다. Mikler(1993)는 블리딩을 적용하지 않았으므로 유출수량과 유입수량은 동일하다. 전술한 바와 같이, 유출수의 유량과 온도는 입력자료로 활용되었으며 이로 인한 유입수의 온도를 계

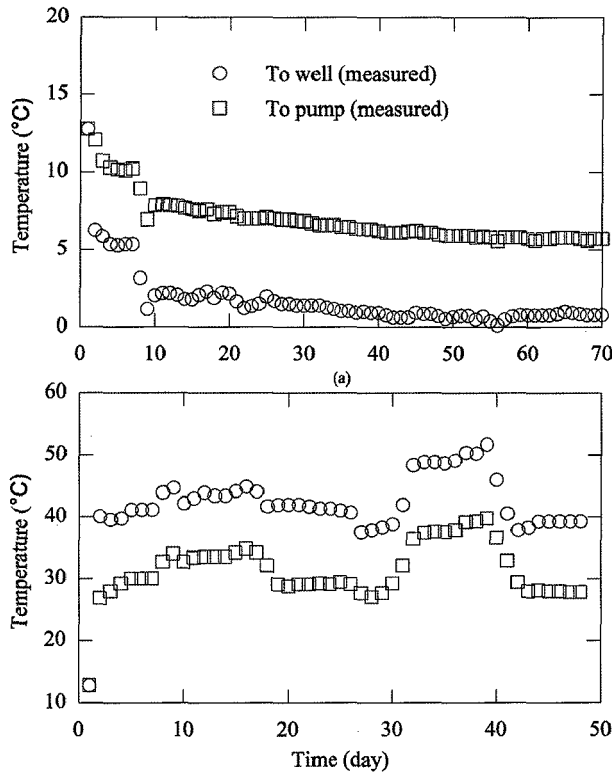


그림 5. Pennsylvania에 설치된 SCW에서 측정된 유출수 및 유입수 온도(Mikler, 1993)

표 1. Mikler(1993)의 현장실험 검증에 적용한 심정과 유입, 유출관의 치수 및 물성치

	심정	유출관	유입관
깊이	320m	2m	318m
지름	152.4mm	33.4mm	101.6mm
벽두께	-	3.05mm	6.35mm
열전도도	-	4W/m-°C	0.1W/m-°C
표면거칠기	1.5mm	1.5mm	1.5mm

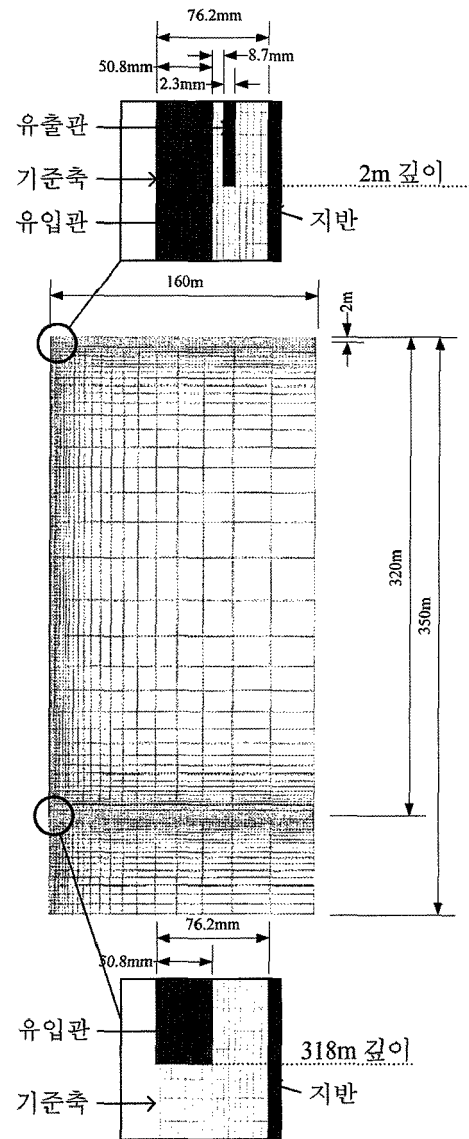


그림 6. Mikler(1993) 자료검증에 사용된 해석영역과 요소망

표 2. Mikler(1993)의 현장실험 검증에 적용한 지반의 열적 및 수리적 물성

열적 물성		수리적 물성	
열전도도 (k_s)	3.81W/m-°C	수리전도도	7.00×10^{-5} m/s
지열경사	$T(^{\circ}\text{C}) = 16.0 + 0.0225 \times \text{depth(m)}$	공극률	27.5%
밀도	2700kg/m ³	비중	1×10^{-5} m ⁻¹
비열	1000J/kg-°C	-	-

산하였으며 이를 측정치와 비교하였다. Mikler(1993)의 자료는 Deng(2004)의 수치모델을 검증하는 데에도 활용된 바 있다.

수치해석의 입력 자료는 Deng(2004)과 동일하며 표 1과 표 2에 정리하였다. 심정 내에 발생하는 난류는 식 (4)의 유효 수리전도도를 적용하여 모사하였다. 그림 6에는 SCW 시스템의 2D 축대칭 해석 영역과 요소망을 도시하였다. 해석은 지하수위 하부만을 모델링하였으며 해석 시 적용된 심정심도는 심정 깊이 320m이며 유입관은 심정저부로부터 2m 위에 위치한다(유입관 길이 = 318m). 해석영역은 수직방향으로 350m와 반경 160m를 적용하여 하부·측면 경계조건의 영향을 받지 않도록 하였다. 유출관과 유입관의 단면과 길이는 표 1에 나타내

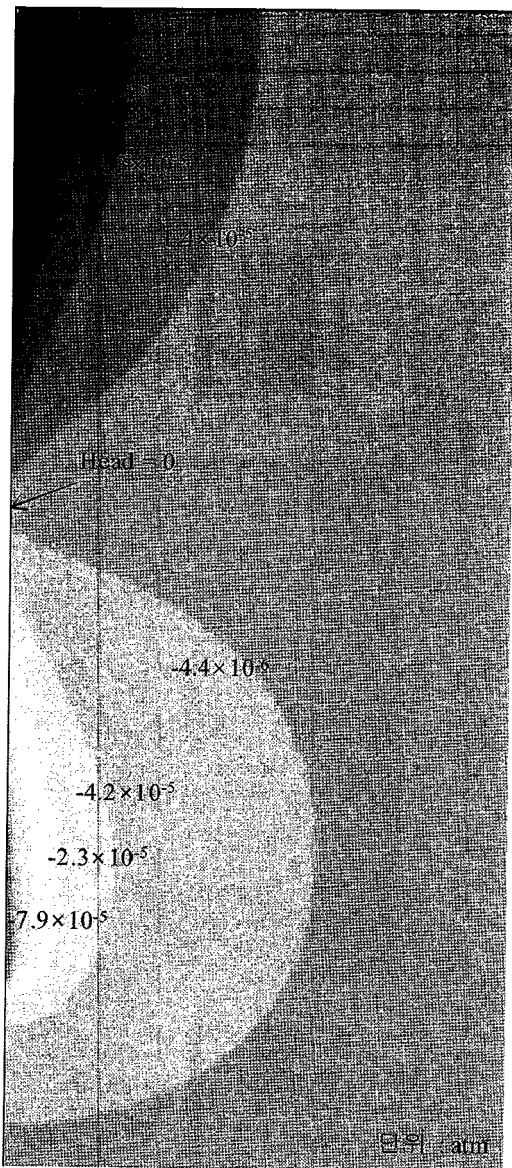
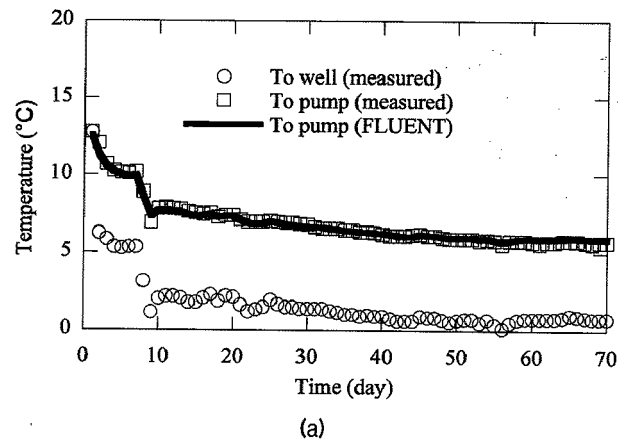


그림 7. 지반에서 계산된 압력수두 분포

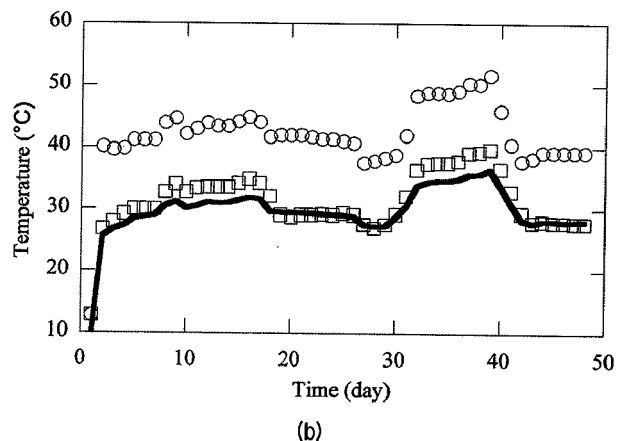
었다. 2D 축대칭 수치해석에는 총 15375개의 8절점 사각형 요소가 사용되었다.

그림 7에는 수치해석으로 계산된 수두분포를 도시하였다. 그림 7의 수두 분포는 압력 수두 분포를 나타낸다. 유입관이 지하수를 흡입하는 심정 하부에서는 음의 수두가 발생하여 주변 지하수를 흡입하고 있으며, 유출관이 순환수를 방출하는 심정 상부에서는 양의 수두가 발생하여 주변지반으로 순환수를 배출하고 있는 것을 확인할 수 있으며, 수두의 변화가 주변지반에 미치는 범위는 대략 반경 100m인 것으로 나타났다. 심도 160m 부근에서는 반경방향 흐름이 0이 되며 최대 반경방향 속도는 0.0125m/s로 계산되었다.

그림 8은 냉방과 난방 모드에서 Mikler(1993)의 예측결과와 본 연구에서 계산된 유입수의 온도를 비교하고 있다. 그림 8(a)의 난방모드 결과의 경우, 본 연구의 해석결과와 예측결과는 온도차 0.5°C 이내로 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 냉방모드(그림 8(b))는 현장계측결과와 최대 1.5°C 이내의 차이를 보이고 있으며, 완벽하게 일치하지는 않지만 전체적인 온도변화경향이 유사



(a)



(b)

그림 8. Pennsylvania SCW에서 측정된 유입수(Mikler, 1993) 및 계산된 유입수 온도 비교

한 것으로 나타났다. 그림 8는 본 연구에서 구축한 SCW 수치해석 모델은 상당히 정확하게 SCW의 성능을 예측하며 심정 내 온도변화와 열교환을 모사하는 것을 입증하고 있다.

4.2 의령 체육진흥센터 SCW

의령 체육진흥센터에는 보조 에너지원으로 두개의 SCW를 활용하고 있다. 그림 9는 체육진흥센터 SCW의 개략적인 단면을 나타낸다. SCW의 심도는 350m이며 심정의 직경은 45m까지는 약 25cm이며 이후에는 17.5cm로 줄어든다. 지하수위는 약 18m이며 연암층 심도인 20m까지 케이싱이 설치되었다. 유출구와 유입구의 깊이는 각각 18m와 345m이다. 지반구성은 인접 관측정 자료(국가 지하수정보센터 자료: <http://www.gims.go.kr>)를 근거로 산정하였다. 대상지반은 심도 20m 하부는 대부분 세일로 구성된 암반이다. 심도 18~20m까지는 풍화암, 풍화암 하부로 약 53m까지는 연암, 그리고 그 하부는 경암으로 분류되었다. SCW 심정, 유입관, 유출관의 물성은 표 3에 정리하였다.

그림 10은 SCW 시스템의 2D 축대칭 수치해석을 위한 해석영역과 요소망을 보여준다. SCW 수치해석에서는 지하수위 하부만 모델링하였다. 따라서 유출구의 위치는 해석영역에서는 심도 2m이며 심정 심도는 332m가 된다. 유입구는 심정 저면으로부터 5m 위에 위치한

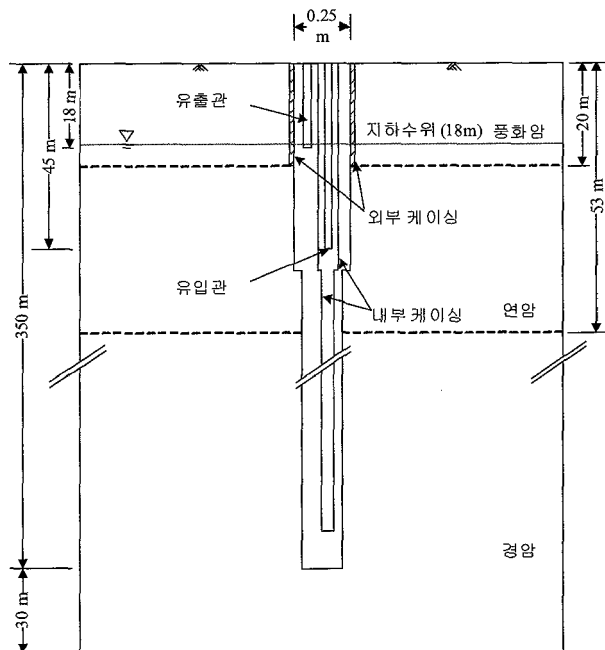


그림 9. 의령 체육진흥센터 SCW 개략도

다. 해석영역의 반경방향 폭은 160m이며 수직방향 길이는 362m이다. 2D 축대칭 해석에는 총 22873개의 8절점 사각형 요소가 사용되었다.

지반에 적용된 물성치는 표 4에 정리하였다. 세일의 열전도도는 송윤호 등(2008)의 자료를 근거로 2.5~5.8W/m·°C를 적용하였다. 퇴적암인 세일은 심도에 따라서 공극률이 감소하며 열전도도가 증가할 것으로 예측하여 풍화암층에는 2.5W/m·°C를 적용하였으며 연암층과 경암층에는 각각 3.5와 4.5W/m·°C를 적용하였다. 지반의 수리전도도는 의령 지역 관측정의 계측자료를 이용하였으며(국가 지하수정보센터 자료: <http://www.gims.go.kr>), 비

표 3. 의령군 현장 계측 데이터 검증에 적용한 심정과 유입, 유출관의 치수 및 물성치

	심정	유출관	유입관
깊이	350m	2m	345m
지름	250mm	60mm	100mm
벽두께	-	5.5mm	5.5mm
열전도도	-	0.22W/m·°C	0.22W/m·°C

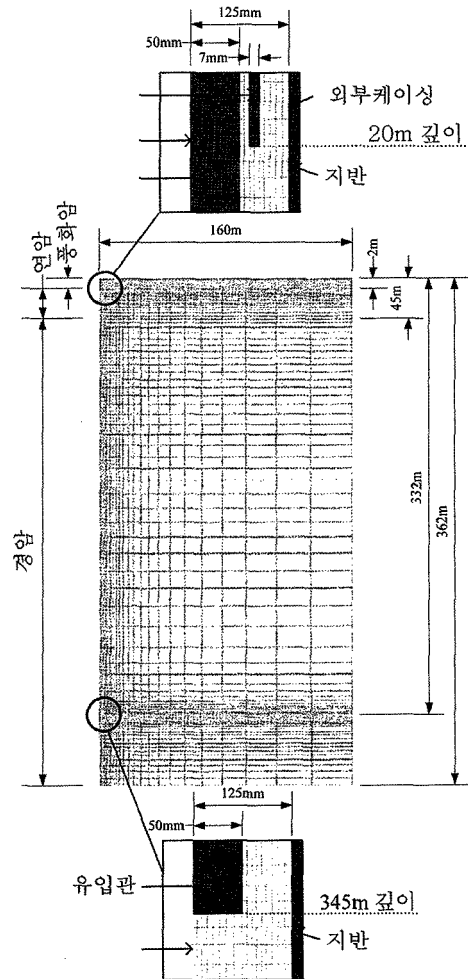


그림 10. 의령 체육진흥센터 자료 검증에 적용된 해석영역과 요소망

표 4. 의령군 현장 계측 데이터 검증에 적용한 지반의 열적 및 수리적 물성치

열적 물성			수리적 물성	
열전도도 (W/m-°C)	종암	2.5	수리전도도 (m/s)	3.52×10^{-7}
	연암	3.5		
	경암	4.5		
지열경사	$T(^{\circ}\text{C}) = 16.0 + 0.0225 \times \text{depth(m)}$		공극률(%)	5.25
밀도	2.7 kN/m^3		비중(m^{-1})	1×10^{-5}
비열	$1000 \text{ J/kg-}^{\circ}\text{C}$		-	-

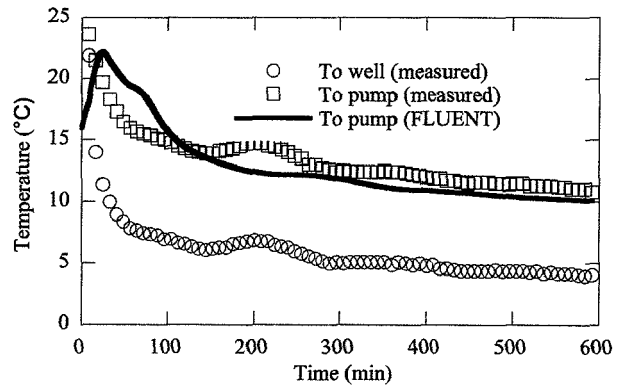
열, 비중 및 공극률은 Hellstrom(1991)이 제안한 세일의 대표값을 적용하였다.

의령 체육진흥센터 SCW의 가동시간은 평균 10시간/일이다. 단, 의령 SCW 시스템은 전술한 바와 같이 복수정으로 구성되어 있어 하나의 SCW가 연속적으로 가동되는 것이 아니라 두개의 SCW가 각각 불규칙적인 간격으로 번갈아서 가동되므로 단일 SCW가 연속적으로 가동된 경우는 제한적이었다. 가동 시 유입관과 유출관의 온도가 측정되었으나 관 입구에서 측정된 것이 아니라 각각 히트펌프 입구와 출구에서 측정되었다. 히트펌프로 연결된 관들은 공기 중에 노출되었으므로 측정 시 공기온도의 영향을 받았다. 해석 시에는 측정된 유출수의 온도를 심정 내에 위치한 관 입구의 온도라고 가정하여 입력자료로 적용하였으며 이로 인한 유입수의 온도변화를 계산하였다.

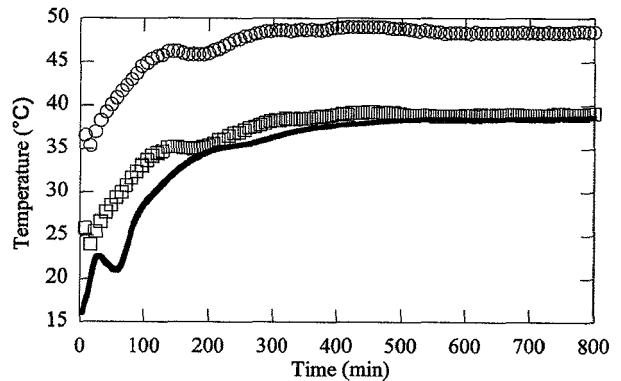
신뢰성 있는 비교분석을 위해 계측자료 중에서 가장 연속적인 데이터를 선택하여 검증에 사용하였다. 사용된 계측치는 냉방 모드인 경우 2008년 6월 5일 9시부터 22시까지 13시간 동안 측정된 데이터가 이용되었고, 난방 모드인 경우 2008년 11월 4일 23시부터 2008년 11월 5일 9시까지 10시간 동안 계측된 자료가 이용되었다. 시스템 상에서 시간별 펌프유량은 관측되지 않았으므로 평균 펌프 용량($180 \text{ l/min} \approx 3 \text{ kg/s}$)을 해석유량으로 적용하였다.

계측된 데이터와 수치해석결과는 그림 11에 비교하였다. 난방모드의 경우 그림 11(a)와 같이 가동이 지속됨에 따라 유출수의 온도가 감소하고 또한 시스템의 효율이 저하되면서 유입수의 온도가 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다. 계측된 유입수의 온도와 해석결과는 100분 이후에는 매우 유사한 것으로 나타났다. 단, 해석 초기에는 큰 차이가 있는 것으로 나타났다. 이에 대한 첫 번째 이유는 계측된 유출수와 유입수가 Mikler(1993)와 같이 파이프 입구에서 계측된 것이 아니라 지표면에 설치된 히트펌프 입구·출구에서 계측되었으며 수치해

석은 심정 내부에서의 온도를 나타내기 때문이다. 계산된 유출수의 초기온도는 지하수 위치에서의 온도를 나타내서 15°C 인 반면, 측정된 온도는 25°C 로 매우 높은 것을 볼 수 있다. 차이가 발생한 두번째 이유는 계측치는 가동 전에 충분한 휴지기를 통하여 심정 내 온도가 지열경사에 상응하는 온도로 초기화된 것이 아니라 가동 중간의 일부 데이터를 추출하여 비교한 것으로 온도 분포가 수치해석과 다르다. 마지막으로, 지반과 지하수에 대한 입력물성치는 SCW 현장에서 측정된 것이 아니라 인근 관측정에서 측정된 자료를 기반으로 산정되었으므로 정확하지 않다. 이와 같은 여러 불확실성이 존재함에도 불구하고 계측치와 해석결과는 가동시간이 경



(a) 난방 모드



(b) 냉방 모드

그림 11. 의령군 현장 계측 데이터와 해석결과 비교

과됨에 따라 점점 근접해가며 200분 이후에는 1°C 이내의 차이를 보여준다.

냉방모드(그림 11(b))에서는 SCW 가동에 따라 유출수의 온도가 증가하고 시스템 내의 온도 또한 열교환에 의해 증가하므로 유입수의 온도도 시간경과에 따라서 지속적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 현장에서 측정된 유입수의 온도와 계산된 수치는 초기에는 상당한 차이를 보이지만 200분 이후에는 매우 유사한 것을 확인할 수 있다. 가동 초기에 계측치와 해석결과가 차이가 날 수 밖에 없는 이유는 난방모드의 경우와 동일하다.

SCW 시스템은 실제 냉·난방의 목적으로 사용될 때 연속적으로 가동되는 것이 아니라 일반적으로 하루 중 일정 시간 동안만 가동되며 나머지 가동중지 기간 중에는 온도를 회복하게 된다. 이와 같은 가동-중지를 반복하는 장기 거동을 수치해석 모델이 정확하게 모사할 수 있는지를 평가하기 위하여 계측 데이터 중 2008년 11월 6일 23시부터 11월 10일 9시까지 총 4일간 평균 10시간/일 가동되는 난방구간을 선택하여 동일한 조건으로 수행한 수치해석 결과와 비교해 보았다. 그림 12에는 계측된 유입수·유출수 온도와 수치해석으로 계산된 유입수 온도를 비교하였다. 그림 12의 공백구간은 가동중지 기간을 나타낸다. 가동기간 중에는 온도가 하강하지만 가동이 중지된 시간 동안 어느 정도 지하수 및 주변지반의 온도가 회복되어 초기온도에 가깝게 상승하는 것을 볼 수 있다. SCW 가동에 따라서 이와 같이 온도 하강·회복 패턴이 반복되게 된다. 계측결과와 수치해석결과와의 유사성은 가동중지 기간과 가동 기간으로 각각 분리하여 분석해 보았다.

가동중지 기간 중에는 이류에 의한 열교환이 발생하지 않으므로 온도회복은 열대류와 열전도에 의해서만 이루어진다. 즉, 온도회복을 정확하게 예측하기 위해서

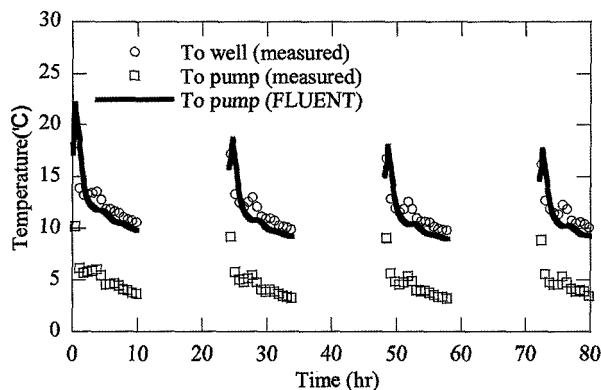


그림 12. 80시간 가동주기 동안의 의령군 현장 계측 데이터와 수치해석결과 비교

는 산정된 지반의 열물성치가 적절해야 한다. 그림 12는 수치해석 모델이 펌프 중지기간 동안 시스템의 온도 회복 정도를 상당히 유사하게 예측함을 보여주고 있다. 즉, 수치해석 모델에서 적용된 열물성치는 적절하며 수치해석 모델은 열대류와 열전도 메커니즘을 정확하게 모델링하는 것을 입증한다.

가동기간 중에는 열이류, 대류, 전도 등의 메커니즘이 복합적으로 작용하게 된다. 대류, 전도는 이미 정확성을 입증하였으므로 가동기간 시뮬레이션이 계측결과와 유사하다는 것은 지하수와 순환수 흐름, 그리고 이로 인한 열이류 메커니즘을 정확하게 모사함을 입증한다.

결론적으로 본 연구에서 구축한 SCW 수치해석 모델은 가동-중지의 반복된 운영에 따른 온도변화를 정확하게 모델링하며, 장기거동을 모사할 수 있다는 것으로 나타났다. 이 모델은 동반논문(박두희 등, 2009)에서 매개변수연구에 활용되었다.

5. 결론

본 연구에서는 지열 히트펌프 시스템의 대표적인 방식인 단일심정(SCW) 시스템의 수치해석 모델을 구축하였다. 수치해석 모델은 수리-열 연계해석이 가능한 유한체적해석 프로그램으로 구축하였다. 수치해석 모델은 지하수 흐름과 심정 내 순환수로 인하여 발생하는 열이류와 더불어서 열대류, 열전도를 모두 정밀하게 모사할 수 있는 장점을 가지고 있다. 수치해석 모델의 정확성은 미국 Pennsylvania state에 설치된 SCW 데이터와 국내 의령 체육진흥센터의 SCW에서 계측된 데이터와의 비교를 통하여 검증되었다. 비교결과 수치해석 모델은 SCW의 가동에 따른 순환수의 온도를 비교적 정확하게 예측하는 것으로 나타났다. 나아가 SCW 수치해석 모델은 국내 계측 자료를 기반으로 가동·중지를 반복하는 장기 거동 예측에 적용되었다. 비교 결과, SCW는 가동뿐만 아니라 가동중지 기간의 온도회복을 상당히 정확하게 예측하는 것으로 나타났다.

이와 같이 국내외 자료로써 검증된 수치해석 모델은 추후 대상지반별 최적화된 SCW 설계기준을 도출하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 본 모델은 SCW의 성능에 영향을 미치는 변수를 규명하며 이들의 영향 정도를 평가한 동반논문에 활용되었다.

감사의 글

본 연구는 GS 건설(주)의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 박두희, 김광균, 장재훈, 광동엽, 나상민 (2009), “단일심정 지열 히트펌프의 수치해석 모델링 Part II: 단일심정 지열히트펌프의 성능평가를 위한 매개변수 연구”, *한국지반공학회*, 제26권, 제2호, pp.45-54.
2. 송윤호, 김형찬, 심병완, 김형수 (2008), 지하 열 자원 부존·활용 정보 시스템 구축, 2005-R-GH01-P-01, 지식경제부, 과천, pp.44-56.
3. 한정상, 한혁상, 한찬, 김형수, 전재수 (2006), “수주지열정(SCW)을 이용한 천부지열 냉난방시스템 설계지침”, *자원환경지질*, 제39권, 제5호, pp.607-613.
4. Bose, J., Adams, D., Price, E., and Weaver, B. (1988), “Closed-Loop/ Ground-Source Heat Pump Systems Installation Guide”, *Oklahoma State University. International Ground Source Heat Pump Association, Still water. Oklahoma.*
5. Braud, H., Klimkowski, H., and Oliver, J. (1983), “Earth-source heat exchanger for heat pumps”, *Transactions of ASAE*, Vol.26, pp.1818-1822.
6. Chen, C., and Jiao, J.J. (1999), “Numerical simulation of pumping tests in multiplayer wells with non-darcian flow in the well bore”, *Groundwater*, Vol.37, No.3, pp.465-474.
7. Chen, N. (1979), “An explicit equation for friction factor in pipe”, *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol.18, No.3, pp.296-297.
8. Collins, P., Orio, C., and Smiriglio, S. (2002), *Geothermal Heat Pump Manual*, New York City Department of Design and Construction, New York, NY, US.
9. Deng, Z. (2004), *Modeling of standing column wells in ground source heat pump systems*, Ph.D. Thesis, Oklahoma State University, p.303.
10. Fluent Inc. (2006), *FLUENT 6.3 User's Guide*, Lebanon, NH.
11. Hellstrom, G. (1991), *Ground Heat Storage. Thermal Analyses of Duct Storage Systems-Theory*, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.
12. Kavanaugh, S., and Rafferty, K. (1997), *Ground-source heat pumps: Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
13. Mikler, V. (1993), *A theoretical and experimental study of the “energy well” performance*, Masters thesis, The Pennsylvania State University.
14. Oliver, J., and Braud, H. (1981), “Thermal exchange to earth with concentric well pipes”, *Transactions of ASAE*, Vol.24, pp.906-910.
15. Orio, C. (1995), “Design, use and examples of standing column wells”, *IGSHPA Technical Meeting*.
16. Rawling, P. (2004), *Geo Outlook*, IGSHPA, pp.26.
17. Rees, S. (2001), “Advances in modeling of standing column wells”, *International Ground Source Heat Pump Association Technical Conference & Expo*, Stillwater, Oklahoma.
18. Rees, S., Spitler, J., Deng, Z., Orio, C., and Johnson, C. (2004), “A study of geothermal heat pump and standing column well performance”, *Transactions of ASAE*, Vol.109(1), pp.3-13.
19. Yuill, G., and Mikler, V. (1995), “Analysis of the effect of induced groundwater flow on heat transfer from a vertical open-hole concentric-tube thermal well”, *TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS*, Vol.101, pp.173-173.

(접수일자 2009. 12. 8, 심사완료일 2010. 2. 18)