ISSN (Print) 1226-5268 ISSNS (Online) 2287-7169
The Journal of Engineering Geology, Vol.26, No.4, December, 2016, pp. 461-471
https://doi.org/10.9720/kseg.2016.4.461

수주지열정의 지하수 유동 및 지열 이동 예측을 위한 수치 모델링 기법 개발

박성민[1] · 황기섭[1] · 문종필[2] · 김중휘[3]*
[1]주식회사 모음과 나눔, [2]국립농업과학원, [3]중원대학교 신재생에너지자원학과

Development of a Numerical Modeling Technique for Predicting Groundwater flow and Heat Transport in a Standing Column Well

Seongmin Park[1], Gisub Hwang[1], Jongphil Moon[2], and Jung-Hwi Kihm[3]*
[1]Corporation of Moum and Naum, Daejeon 34017, Korea
[2]Korea National Institute of Agricultural Sciences, Jeonju 54875, Korea
[3]Department of Renewable Energy and Resources, Jungwon University, Goesan-Gun 28024, Korea

Received 24 October 2016; received in revised form 6 December 2016; accepted 10 December 2016

수주지열정의 지하수 유동 및 지열 이동 현상을 모사할 수 있는 수치 모델링 기법을 제시하기 위하여 열-수리학적 모델인 TOUGH2를 기반으로 한 모듈을 개발하였고 두 유형의 수주지열정에서의 냉방 및 난방 운영을 수치 모의하였다. 수치 모델링 결과들은 수주지열정의 냉난방 운영이 주변 지층 및 지하수와의 열교환 및 유체 혼합에 크게 영향을 받으며, 특히 PVC 또는 PE 파이프 내부와 수주지열정 내부에서 서로 반대방향으로 유동하는 유입수와 유출수 간의 열교환이 중요한 요소임을 보여준다. 또한 본 연구에서 개발 및 제안된 수치 모델링 기법이 수주지열정의 내부 구조 및 유체 유동과 열 이동 현상을 합리적으로 모사할 수 있음을 보여준다. 이러한 수치 모델링 기법은 수주지열정의 설계, 시공 및 운영 단계에서 열교환 성능을 정량적으로 분석할 때 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 수주지열정, 천부 지열, 지하수 유동, 열 이동, 수치 모델링 기법

Numerical modules based on a conventional thermo-hydrological numerical model, TOUGH2, are developed to provide a numerical modeling technique for a standing column well (SCW). Cooling and heating operations for two different types of SCW are then simulated using these modules. Modeling showed these operations to be significantly influenced by heat exchange and fluid mixing between the SCW and the adjacent geologic formation and groundwater. The results also reveal that heat exchange between the oppositely flowing outflow and inflow in the PVC or PE pipe and the SCW borehole is an important factor. Overall, the numerical modeling technique developed here can reasonably simulate fluid flow and heat transport phenomena in the complex internal structures of a SCW. The proposed technique can be used practically for the quantitative analysis of heat exchange in a SCW at the design, construction, and operation stages.

Key words : standing column well, shallow geothermal, groundwater flow, heat transport, numerical modeling technique

서 론

산업혁명 이후 인간의 활동에 의한 막대한 양의 온실 가스 배출로 인하여 전 지구적인 기후 변화(global climate change)가 유발되었고 이에 따라서 기존에 예상하지 못한 홍수, 가뭄, 생태계 교란 등의 환경 재해가 발생하고 있다(IPCC, 2014). 이러한 전 지구적인 문제에 대응하기 위하여 온실가스 배출량을 저감하고 제한하기 위한 국제적인 협약 체제가 현재 구성되고 있다(예, 당사국총회, Conference of the Parties, COP). 온실가스 배출량을 저감하기 위해서는 필연적으로 화석 연료에 의존하는 기존의 에너지 정책에서 온실가스를 배출하지 않는 신재생에너지를 기반으로 하는 정책으로의 변화가 필요하다.

신재생에너지 중에서도 지열은 다른 에너지원에 비해서

*Corresponding author: jung0209@jwu.ac.kr
ⓒ 2016, The Korean Society of Engineering Geology
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons. org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

접근성과 지속성의 측면에서 유리한 측면이 있다. 지열 에너지의 활용은 크게 심부의 고엔탈피지열(high-enthalpy geothermal)을 이용하는 방법과 천부의 저엔탈피지열(low-enthalpy geothermal)을 이용하는 방법으로 나누어진다. 국내에서는 특히 히트 펌프(heat pump)를 통한 천부 지열 냉난방이 각광을 받고 있으며, 그 활용 사례가 증가하는 추세이다(Kwon et al., 2012). 천부 지열은 천부의 지층 또는 지하수가 연중 일정한 온도를 유지하는 특성에 착안하여 이들 지층과 지하수가 가지는 열에너지를 이용하는 방식이다. 즉 냉방은 증가한 열에너지를 지중으로 분산하여 해소하는 방식이고 난방은 반대로 지중에 분포하는 열에너지를 추출하는 방식이다. 천부 지열의 개발에 활용되는 히트 펌프 시스템 또는 지중열교환기 시스템은 열 교환 유체가 폐쇄된 관로를 따라서 순환하면서 지층 및 지하수와 열교환을 통하여 냉난방을 하는 폐쇄형(closed-type) 또는 지중 열원 히트 펌프 시스템(ground heat pump system)과 지하수가 하나 또는 다수의 관정을 통하여 양수 및 재주입 되면서 지층 및 지하수와 열교환 또는 유체 혼입을 통하여 냉난방을 하는 개방형(open-type) 또는 지하수 열원 히트 펌프 시스템(groundwater heat pump system)이 있다(Hahn et al., 2010).

이러한 개방형 또는 지하수 열원 히트 펌프 시스템 중에서 가장 보편적으로 활용되고 있는 것이 수주지열정(Standing Column Well, SCW)이다. 수주지열정은 하나의 관정을 설치하고 이를 통하여 히트 펌프로 지하수가 유입(유입수)되고 냉난방의 결과로 온도가 변화한 지하수를 다시 재주입(유출수)하는 방식이다. 이러한 수주지열정은 국외에서는 활용 사례가 증가하고 있는 실정이며, 특히 국내의 지층 및 지하수의 특성에 적합한 방식으로 알려져 있다(Hahn et al., 2006). 이러한 수주지열정의 국내 활용을 위하여 지하수 조건, 설치 심도 및 간격 등의 기본적인 설계 변수 설정을 위한 몇몇의 연구들이 수행된 바 있다(Hahn et al., 2006, 2007, 2008). 한편 수주지열정의 경우 열교환 유체가 지반 또는 지질 매체에 직접적으로 연관되어 있으며, 하나의 관정을 양수 및 재주입에 이용하기 때문에 내부에서 복잡한 열-수리학적 현상이 나타나게 된다. 이를 수치 모델을 통하여 모사하기 위한 몇몇의 연구들이 국내외에서 진행된 바 있다(Deng, 2004; Park et al., 2010a, 2010b). 그러나 아직까지는 수주지열정의 내부 구조물(열교환기 내부의 파이프 등)과 주변 지층에서 발생하는 복잡한 열-수리학적 현상을 통합적으로 해석할 수 있는 수치 모델링 기법에 대한 연구가 부족한 실정이다.

본 연구의 목적은 수주지열정의 복잡한 내부 구조 및 이들 내에서의 유체 유동과 열 이동 현상을 효과적으로 모사할 수 있는 수치 모델링 기법을 도출 및 개발하는 것이다. 이를 위하여 기존에 널리 사용되고 있는 열-수리학적 수치 모델인 TOUGH2를 기반으로 수주지열정을 다룰 수 있는 수치 모델링 모듈을 개발 및 추가하였고 사례 연구로서 서로 다른 구조를 가지는 두 유형의 수주지열정에서 냉방 및 난방 운영을 수치 모의하였다.

열-수리학적 수치 모델 TOUGH2의 모듈 개발

효율적이고 정확한 수치 모델링 기법을 제시하기 위하여 기존에 존재하는 열-수리학적 모델인 TOUGH2 (Pruess et al., 1999)를 기반으로 수주지열정 내부 및 지층에서 발생하는 복잡한 지하수 유동 및 열 이동 현상을 보다 효과적으로 모사할 수 있는 모듈을 개발하였다. TOUGH2는 미국 LBNL에서 개발한 다차원 다상 열-수리학적 수치 모델로 지하수, 환경, 석유공학 등의 분야에서 널리 사용되고 있다. 이 모델은 Integral Finite Difference Method (Narasimhan and Witherspoon, 1976)에 기반하여 모델링 영역을 이산화하기 때문에 불규칙하고 불균일한 격자 요소를 사용할 수 있는 장점이 있다. 이 모델에서는 불포화 수리특성과 모세관압력에 대한 다양한 모델을 선택할 수 있으며, 다양한 유체의 특성을 모듈(module)을 통하여 고려할 수 있다. 즉 온도와 압력의 변화에 따른 지중 유체의 밀도 및 동적점성계수 변화를 고려할 수 있다. 본 연구에서는 지하수와 수증기의 유체 특성을 고려할 수 있는 EOS4 모듈을 사용하였다.

TOUGH2의 유체 유동 및 열 이동은 다음의 지배방정식에 의해 모사된다.

$$\frac{d}{dt}\int_{V_n} M^k dV_n = \int_{\Gamma_n} F^k \cdot n d\Gamma_n + \int_{V_n} q^k dV_n \tag{1}$$

$$F^k|_{adv} = \sum_{\beta} X_\beta^k F_\beta \tag{2}$$

$$F^{NK+1} = -\lambda \nabla T + \sum_{\beta} h_\beta F_\beta \tag{3}$$

여기에서 V_n은 임의의 영역의 부피이며, 폐곡면 Γ_n에 의해 제한되는 영역이다. M^k는 단위 부피당 질량 또는 에너지이며, k는 자유도(degree of freedom)으로 1에서 NK+1의 값을 가지는데 1에서 NK는 유체의 종류(component)에 해당하며 유체 유동을, NK+1은 열 이동을 의미한다. F^k는 질량 또는 에너지 플럭스(flux) 즉, 단위 시간 동안 해당 경계를 통과하는 질량 또는 에너지를 의미한다. q^k는 질량 또는 에너지의 source(양수) 또는 sink(음수)이다. 식 (2)에서 $F^k|_{adv}$ 는 k가 1에서 NK까지의 경우로 유체 유동에 의한 이송(advection) 질량 플럭스이며, β는 유체의 상(phase)으로 F_β는 β 유체 상의 플럭스로 Darcy의 법칙에 의해 산정되고 X_β^k 는 β 유체 상내의 k 성분의 질량 분율을 의미한다. 따라서 식 (2)는 k 성분의 유체 유동에 따른 질량 플럭스가 된다. 식 (3)의 F^{NK+1}는 에너지 플럭스이며, 우변의 두 개의

항의 합으로 나타난다. 우변의 첫 번째 항은 열의 전도(conduction)이며, λ는 열전도도(thermal conductivity)이다. 우변의 두 번째 항은 열의 유체에 의한 이송(advection)이며, h_β는 β 유체 상의 비엔탈피(specific enthalpy)이다.

수주지열정은 내부에 PVC 또는 PE 파이프 등의 복잡한 구조를 가지므로 이를 단순화하여 등가(equivalent)의 격자 요소로 이산화하는 것이 필요하다. 전술한 바와 같이 TOUGH2는 불규칙하고 불균일한 격자 요소를 실제가 아닌 가상의 연결을 통하여 구성할 수 있기 때문에 이러한 등가의 격자 요소를 고려하는데 매우 적합하다. 또한 TOUGH2는 binary 형태의 실행파일 뿐만 아니라 source code 형태로 배포되고 있으므로 이를 기반으로 source code에 수주지열정의 모사에 필요한 기능을 모듈로 개발하였다. 수주지열정 내에서 일어나는 유체 유동과 열 이동을 효과적으로 모사하기 위하여 다음의 두 가지 모듈을 개발하여 TOUGH2에 통합하였다.

첫 번째로 TOUGH2는 각 격자 요소들의 경계를 통하여 질량 이동(유체 유동) 및 열 이동(열 이송 및 전도)이 반드시 동시에 계산된다. 그런데 수주지열정의 내부 구조 및 열 이동 현상을 엄밀하게 모사하기 위하여 특정한 요소들의 경계를 통하여 유체 유동은 일어나지 않고 열 이동(열전도)만이 고려되어야 한다(예, 파이프 자체의 수직 연결, 파이프와 파이프 내외부의 연결). 이를 위하여 특정 요소들 간의 연결에 대하여 식 (2)의 유체 상별 플럭스(flux)를 0으로 고정하고 이에 따라서 자동적으로 식 (3)의 우변의 두 번째 항이 0이 되어 해당 연결부에서는 이송항은 고려되지 않고 전도항만이 고려되는 기능을 모듈로 개발하였다. 특히 이러한 요소들 간의 연결은 index 값을 통하여 제어되며, 기존의 TOUGH2 입력 자료의 호환성을 최대한 유지하였다.

두 번째로 수주지열정을 통하여 히트 펌프로 유입된 지하수는 열을 얻거나(냉방) 잃은 후(난방) 다시 주입되며, 이 때 실제 냉난방의 운영은 유입수(inflow)와 유출수(outflow)의 온도 차이를 통하여 제어된다. 한편 수치 모델링에서 유입수는 유량을 sink 형태의 경계조건으로 유출수는 유량, 그리고 온도가 아닌 엔탈피(enthalpy)를 source 형태의 경계조건으로 고려한다. 따라서 실제 온도로 제어되는 운영을 모사하기 위해서는 유출수의 압력 및 온도에서의 엔탈피값을 계산하여 적용하여야 한다. 이를 위하여 수치 모델링의 일련의 비선형 반복(non-linear iteration) 내에서 이전 단계(step)의 유입수 온도에서 사용자가 입력한 온도 변화량을 가감하여 유출수 온도를 결정하고 유출수 압력 및 온도에서의 엔탈피를 EOS (equation of state)로 부터 계산하여 source 경계에 적용하는 기능을 모듈로 개발하였다. 또한 이 때 사용자가 입력하는 온도 변화량은 고정된 값이 아니라 유입 유출수의 유량과 같이 시계열 형태로 입력이 가능하도록 하였다. 그리고 실제 수주지열정의 운영에서 냉방 운영(cooling operation)의 경우 유출수가 특정 온도 이상이 되면 더 이상 열교환 효율이 발생하지 않는 것으로 간주되어 운영을 중단하거나 유입수의 일부만을 유출수로 다시 지중으로 보내는 블리딩(bleeding)을 하게 되며, 난방 운영(heating operation)에서는 반대로 유출수가 특정 온도 이하가 되면 동파를 방지하기 위하여 냉방과 마찬가지의 조치를 취하게 된다. 이를 고려하기 위하여 유출수의 최소값과 최대값을 기존의 TOUGH2 입력 자료의 호환성을 최대한 유지한 상태로 입력이 가능하도록 모듈을 설계 및 개발하였다.

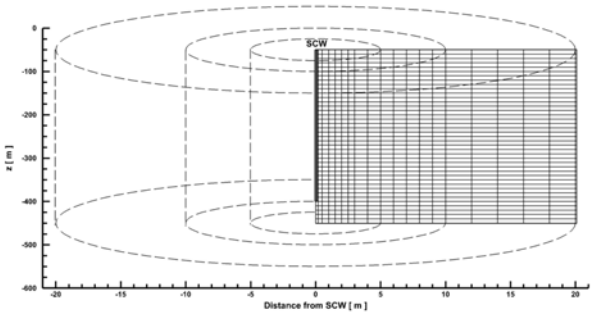

Fig. 1. Schematic diagram of the geologic formation (modeling domain), the standing column well (SCW), and the grid elements used in the numerical simulations. Vertical exaggeration is 30 times.

Table 1. Thermo-hydrological properties of the geologic formation.

Property	Value
Porosity [%]	5.0
Intrinsic permeability [m^2]	2.00×10^{-13}
Solid density [kg/m^3]	2,700
Specific heat [J/kg/°C]	960
Heat conductivity [W/m/°C]	2.84

수치 모델링 개요

수치 모델링 영역은 대상 지층에 대하여 반경 20 m (x = 0~20 m), 높이 400 m (z = -50 ~ -450 m)의 이차원 축대칭 격자로 설정하였다(Fig. 1). 여기에서 모델링 최상부인 50 m 심도(z = -50 m)에 평균적인 지하수위가 존재함을 가정하였다. 격자 요소는 수평 방향으로 20개 수직 방향으로 42개로 총 840개가 고려되었다. 대상 지층의 물성은 기존 문헌 및 수주지열정이 설치된 현장의 수리시험 결과를 참고하여 결정하였으며, Table 1에 정리되어 있다(KIGAM, 2005; Hwang, 2013; Park et al., 2013; Park et al., 2015). 한편 수주지열정은 총 길이 350 m로 50 m ~ 400 m 심도(z = -50 ~ -400 m)에 위치하고 그 직경은 200 mm이며, 1차원의 수직 격자들의 조합인 수주지열정과 대상 지층이 결합되는 형태로 모델링 영역을 설정하였다.

수주지열정은 다음의 두 가지 형태로 고려되었는데(Fig.

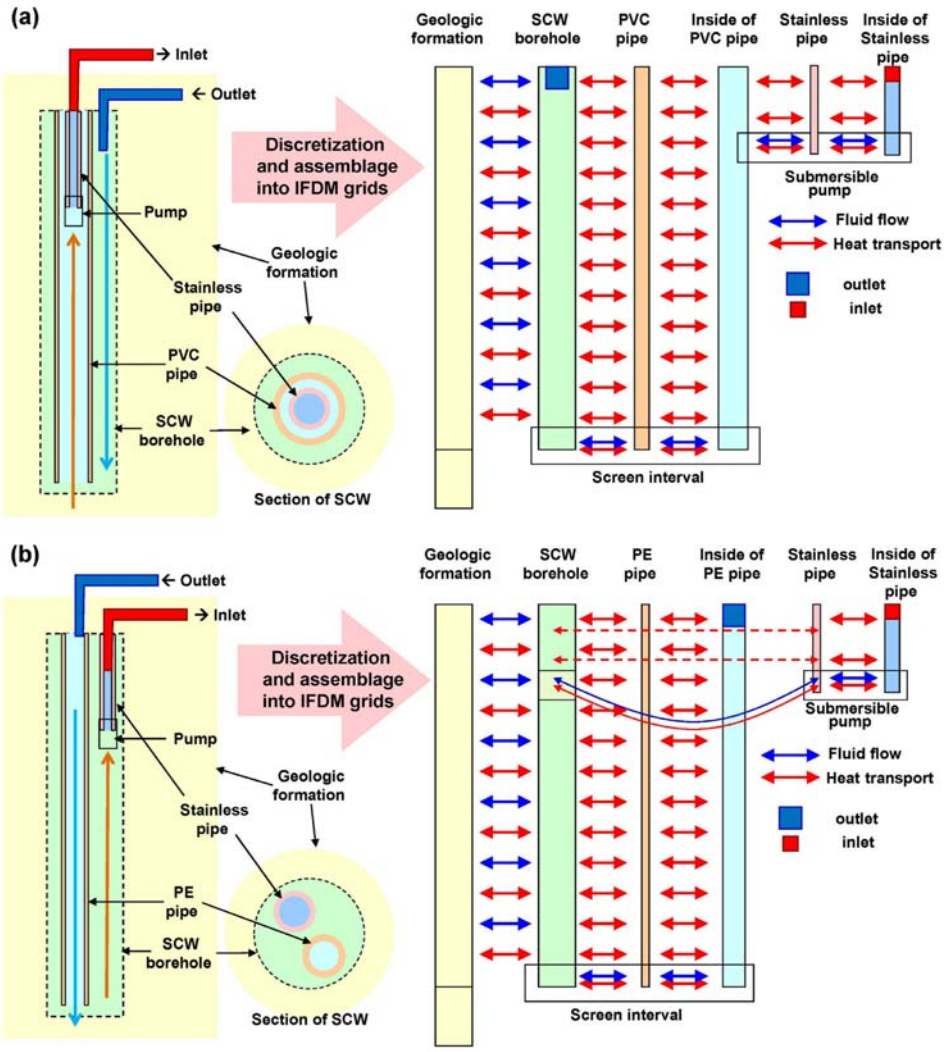

Fig. 2. Schematic diagram of the standing column well (SCW) and its discretization and assemblage for IFDM (Integral Finite Difference Method) grids: (a) type A and (b) type B.

2) 먼저 A유형(type A)은 개방형의 수주지열정을 설치할 때 가장 널리 사용되는 일반적인 방식이며, B유형(type B)은 유체 흐름이 이와는 반대되는 새로운 방식이고 Hwang (2013)에 의해 제시된 바 있다. A유형의 경우 기존의 방식으로 수주지열정의 중심에 위치한 PVC파이프를 통하여 하부의 지하수가 수중 펌프(submersible pump)로 양수되어 히트 펌프의 유입구(inlet)로 공급되며, 히트 펌프에서 지열이 활용된 후(온도 변화가 발생한 후) 다시 유출구(outlet)를 통하여 수주지열정 내부로 유입되고 지층의 유체와 유체 혼합 및 열 교환을 하면서 하부로 유동한다(Fig. 2(a)). 반면에 B유형은 A유형과는 정반대로 수주지열정 내부에 수중 펌프가 존재하여 하부로부터 상부로 이동하면서 유체 혼합 및 열 교환이 일어난 지하수가 유입구를 통하여 히트 펌프에 제공되며, 온도가 변화한 유체가 유출구를 거쳐서 수주지열정 내부에 존재하는 PE파이프를 통하여 최하부로 유동한다 (Fig. 2(b)). B유형의 수주지열정은 A유형과 비교하였을 때 좁은 PVC파이프 내로 첨단부에 수중 펌프를 설치한 스테인리스 파이프를 넣을 필요가 없으며(수주지열정 내부에 PE파이프와 병렬로 설치), 분절된 PVC파이프를 계속 접합하면서 내리는 것이 아니라 롤 형태의 PE파이프를 연속적으로 내리면서 시공할 수 있기 때문에 시공의 용이성 및 비용의 측면에서 유리하다(Hwang, 2013).

앞 절에서 언급한 바와 같이 TOUGH2 수치 모델은 IFDM (Integral Finite Difference Method)를 기반으로 하고 있어 복잡한 형태 및 구조를 가지는 대상을 등가의 부피와 질량 중심점, 질량 중심점 사이의 간격 및 접촉 면적으로 단순화하여 격자를 구성할 수 있다. 따라서 복잡한 구조를 가지는 수주지열정을 지열정 내부, PVC 파이프, PVC 파이프 내부, PE 파이프, PE 파이프 내부, 스테인리스 파이프, 스테인리스 파이프 내부 등의 구성 요소로 구분하고 등

Table 2. Specification and thermal properties of the SCW compartments.

Property	PVC pipe	PE pipe	Stainless pipe
Diameter (outer) [mm]	125	50	50
Diameter (inner) [mm]	117	42	44
Solid density [kg/m^3]	1,400	930	8,000
Specific heat [J/kg/°C]	1,046	1,900	510
Heat conductivity [W/m/°C]	0.19	0.38	16.00

가 부피와 접촉 면적 및 간격으로 환산한 후 각각을 1차원 수직 격자의 집합으로 구성하였다(Fig. 2). 이들 파이프의 열적 물성은 Table 2에 정리되어 있다(Titow, 1984; Lindeburg, 2013). 각 격자 요소의 부피와 중심점은 Table 2에 명시된 파이프들의 직경 등의 제원에 의해 산출되었고 파이프 및 내부 공간 간의 등가 간격은 Deng (2004)의 연구에서 이용한 방법을 적용하였다. 다만 이들 연구와는 다르게 본 연구에서는 각종 파이프의 내부뿐만 아니라 파이프 자체를 모두 실제로 고려하여 열 이동 현상을 엄밀하게 모사하였다. 수주지열정의 내부와 각 파이프의 내부에서는 유체 유동 및 열 이동이 모두 고려되었다. 지층과 수주지열정 간의 연결 구간에 대하여 역시 유체 유동 및 열 이동이 모두 고려되었다. 그러나 각 파이프와 파이프의 내외부의 공간은 유체 유동은 고려되지 않고 오직 열 이동만이 고려되었다. 다만 PVC 및 PE 파이프 사이에 스크린 구간이 있는 부분과 수중펌프가 있는 부분은 실제로 지하수가 유동 가능한 공간이어야 하므로 유체 유동 및 열 이동이 모두 고려되었다(Fig. 2).

수치적인 불안정성을 최소화하기 위하여 수주지열정 내부 및 각 파이프의 내부에서 유체의 유동은 Darcy의 법칙을 따르는 것으로 가정하였고 따라서 모두 Darcy-Weisbach 방정식에 의하여 유효고유투수계수(effective intrinsic permeability를 적용하였다(Chen, 1979; Olson and Wright, 1990; Sutera and Skalak, 1993; Munson et al., 1998). 각 파이프의 내부는 층류 가정을 이용하여 다음 식에 의해 산정되었다.

$$k_{effective} = \frac{D^2}{32} \tag{4}$$

여기에서 D는 파이프의 직경이다. 한편 수주지열정 내부는 대상 지층과 인접하여 난류로 고려하여야 하며, 이때 유효고유투수계수는 다음의 식에 의해 산정되었다.

$$k_{effective} = \frac{2D\mu}{fu\rho} \tag{5}$$

여기에서 μ는 동적점성계수, u는 유체의 평균유동속도, ρ는 유체의 밀도이다. 또한 마찰계수 f는 다음의 식에 의하여 산정되었다(Chen, 1979).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 3.48 - 1.7372\ln\left(\frac{\varepsilon}{a} - \frac{16.2426}{Re} lnA_2\right) \tag{6}$$

여기에서 ε는 거칠기계수(pipe roughness)로 0.0015 mm, a는 유체 이동 통로의 반지름, Re는 Reynold's number로 다음과 같으며,

$$Re = Du/\nu \tag{7}$$

ν는 운동점성계수이며, A_2는 다음의 식에 의해 계산된다.

$$A_2 = \frac{(\varepsilon/a)^{1.1098}}{6.0983} + (7.149/Re)^{0.8981} \tag{8}$$

수치 모델링 영역의 초기의 압력 조건은 지표로부터 -50 m 심도에 지하수면이 있음을 가정하고 정수압 상태의 압력을 고려하였다. 초기의 온도 조건은 주변 지층에서는 지하수면 또는 모델링 영역의 윗면(z = -50 m)에서 15°C이고 평균 지온 경사가 0.0257°C/m인 것을 가정하였다(KIGAM, 2005). 한편 수주지열정 내부는 운영 이전 내부 지하수 혼합에 의해 19.0°C로 균일한 것으로 가정하였다. 모델링 영역의 바깥쪽 경계(x = 20 m)에 대해서는 압력과 지온이 고정된 경계(Dirichlet boundary)를 고려하였다. 모델링 영역의 윗면(z = -50 m)은 압력과 지온이 고정된 경계를 반면 바닥면(z = -450 m)은 유체 유동은 불투수층으로 지온은 초기 조건이 고정되는 경계를 각각 고려하였다. 수주지열정은 6개월간 운영되는 것으로 가정하였으며, 히트 펌프의 유입수 및 유출수의 시간당 유동량은 100 ton/day (1.157 kg/s)로 하였다. 운영 방법은 냉방 운영의 경우 유입수의 온도에서 5°C 높은 온도가 유출수로 재 주입되는 것으로 하였고 이때 유출수의 온도가 30°C 이상이 되면 이를 30°C로 제한하였다. 반대로 난방 운영의 경우 유입수의 온도에서 5°C 낮은 온도가 유출수로 재 주입되는 것으로 하였고 이때 유출수의 온도가 7°C 이하가 되면 이를 7°C로 제한하였다.

수치 모델링 결과

냉방 운영에 대한 수치 모델링 결과

냉방 운영 시에 유입수 및 유출수의 시간에 따른 변화가 Fig. 3에 도시되어 있다. A유형 및 B유형 모두 히트 펌프로부터 교환된 열에 의해 유출수의 온도가 급격하게 증가하

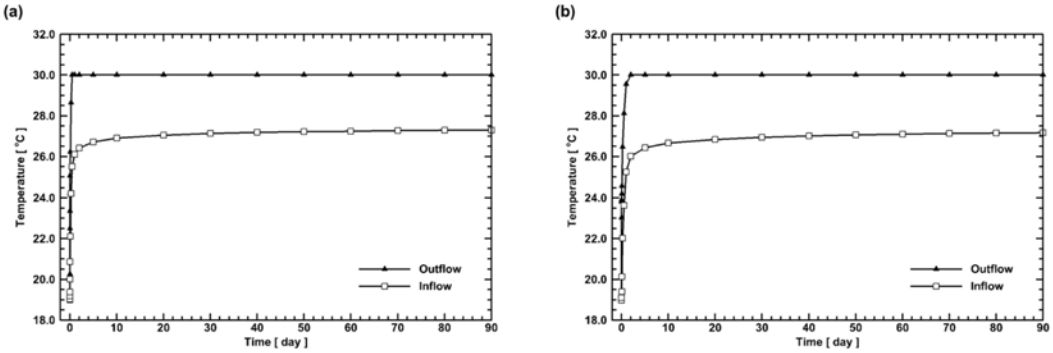

Fig. 3. Temporal changes in temperature of the outflow (from the heat pump) and the inflow (into the heat pump) during the cooling operation of the heat pump for (a) type A and (b) type B.

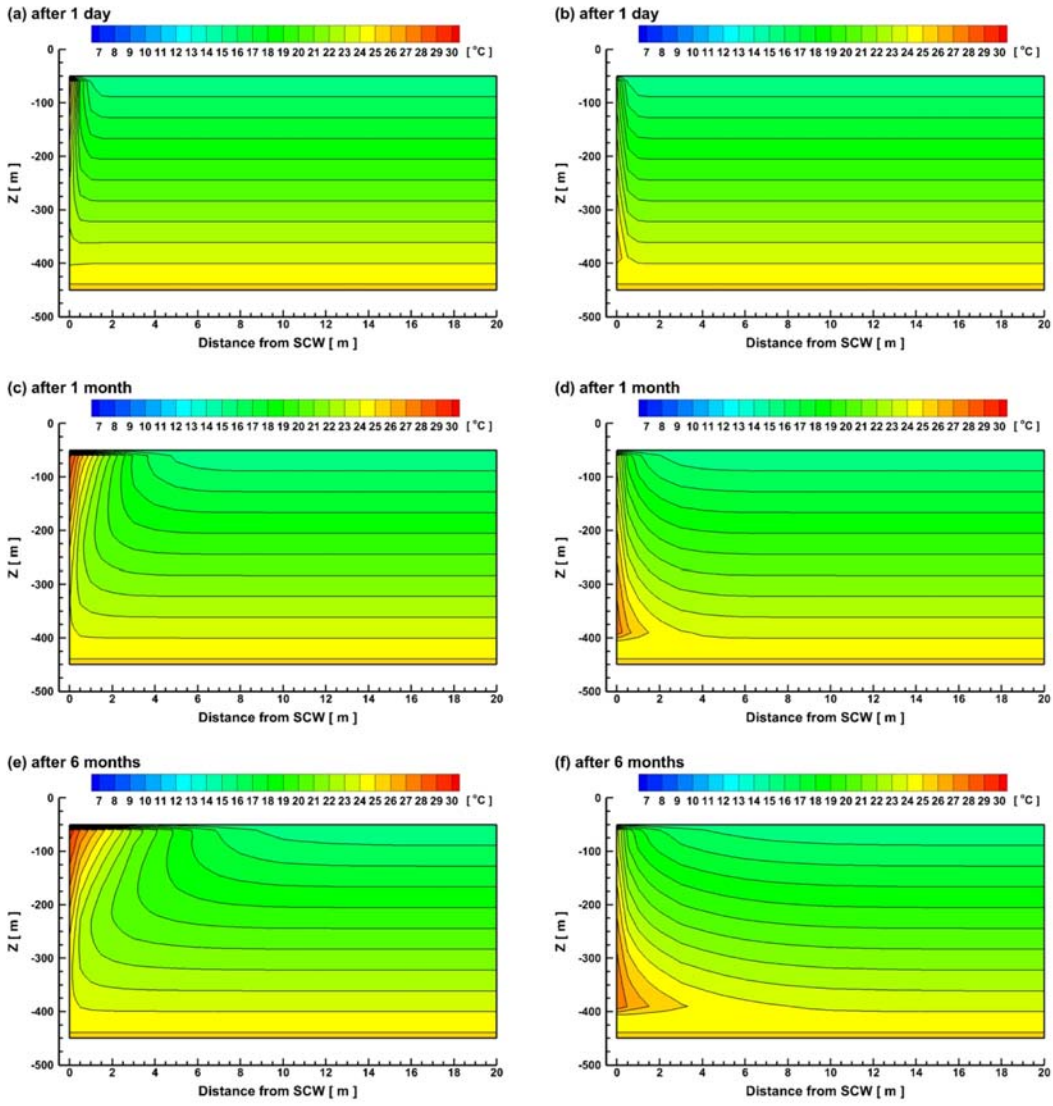

Fig. 4. Spatial distribution of temperature in the geologic formation, for (a) and (b) 1 day, (c) and (d) 1 month, and (e) and (f) 6 months since the start of the cooling operation of the heat pump for type A (left column) and type B (right column).

며, 이에 상응하여 유입수의 온도 역시 급격하게 증가한다. 이러한 급격한 증가 양상은 A유형이 B유형에 비해 더 빠르게 나타난다. 두 유형 모두 1일 이내에 유출수가 30°C에 도달하고 고정되어 5°C의 냉방을 위한 온도차가 유지되기

어렵게 된다. 또한 90일 이내에 온도 변화가 거의 정상 상태에 도달하며, 이때 유입수와 유출수의 온도차는 A, B유형에 대하여 각각 2.70℃, 2.83℃가 된다.

냉방 운영 시 대상 지층 내에서의 지온 변화가 Fig. 4에 도시되어 있다. 먼저 A유형의 경우 냉방을 통하여 온도가 상승한 유출수가 수주지열정을 통하여 빠르게 지층과 접촉하게 되며, 이에 따라서 상부 지역에서 지온이 증가하는 양상이 뚜렷하게 나타난다. 시간이 지남에 따라서 이러한 온도 상승 지역은 방사상 방향으로 확산되며, 상부에서 유출수가 바로 유입됨에 따라서 온도가 상승한 지역이 뒤집힌 쐐기 형태로 나타난다. 지온이 변화하는 지역은 6개월 후에 방사상 방향으로 약 14 m까지 나타난다(Fig. 4(e)). B유형의 경우 A유형과는 다르게 냉방을 통하여 온도가 상승한 유출수가 PE 파이프를 통하여 최종적으로 하부에서 지층과 접촉하며, 이에 따라서 하부 지역에서 지온이 상승한다. 다만 유형A에 비해서 유형B의 경우 온도가 상승한 유출수가 하부의 더 높은 온도의 지하수와 만나서 혼합되기 때문에 수주지열정 주변의 수평 방향 온도 경사가 상대적으로 완만하게 나타난다. 유출수의 지속적인 유입에 의하여 온도가 상승한 지역이 쐐기 형태로 나타난다. 이렇게 지온이 변화하는 지역은 6개월 이후에 방사상 방향으로 약 12 m까지 나타난다(Fig. 4(f)).

냉방 운영 시 수주지열정 내부 및 PVC와 PE 파이프를 통하여 이동하는 유체 온도의 수직적 분포가 Fig. 5에 도시되어 있다. 먼저 A유형의 경우 온도가 상승한 유출수가 수주지열정을 통하여 지층과 접하면서 하부로 유동하게 되고(Fig. 5(a)의 점선) 유출수보다 낮은 온도를 가지는 주변 지층의 지하수와의 열교환 및 유체 혼입에 의해 하부로 갈수록 온도가 낮아지는 경향을 보여준다. 이렇게 온도가 낮아진 유체는 하부의 스크린구간을 통하여 PVC 파이프를 거쳐 상승하여 히트 펌프에 유입되며(Fig. 5(a)의 실선), PVC 파이프의 열적 특성에 따라 파이프의 외부에서 유동하는 유출수와 열교환이 일어나서 상부로 이동할수록 온도가 상승하는 현상이 나타난다.

한편 B유형의 경우 온도가 상승한 유출수가 PE 파이프를 통하여 지층과 접촉 없이 하부로 유동하는데(Fig. 5(b)의 점선) 이때 PE 파이프 외부의 유입수와 열교환만이 일어나게 되어 하부로 이동할수록 온도가 하강한다. 한편 하부의 스크린구간에서 분사된 유출수는 수주지열정을 통하여 지층과 접하면서 상부로 이동하여 최종적으로 히트 펌프에 유입된다(Fig. 5(b)의 실선). 이러한 과정에서 더 낮은 온도를 가지는 주변 지층의 지하수와의 열교환 및 유체 혼입에 의해 상부로 유동하면서 열을 잃게 되는데 이와 동시에 PE 파이프를 통하여 하부로 유동하는 유출수와의 열교환을 통하여 반대로 열을 얻게 된다. 다만 주변 지층 내 지하수와의 열교환 및 유체 혼입에 의한 효과가 더 크게 나타나 유입수는 상부로 이동할수록 온도가 감소하는 양상이 나타나게 된다.

냉방 운영 시 A유형은 유입수가 지온 경사에 의해 더 높은 온도를 가지는 하부에서 제공되는 형태이고 반대로 B유형은 유입수가 지온 경사에 의해 더 낮은 온도를 가지는 상부에서도 동시에 유입이 가능한 형태이다. 따라서 냉방 운영 시 기본적으로 B유형이 A유형보다 더 좋은 성능을 보일 가능성이 있으며, Fig. 3과 같이 근소하지만 상대적으로

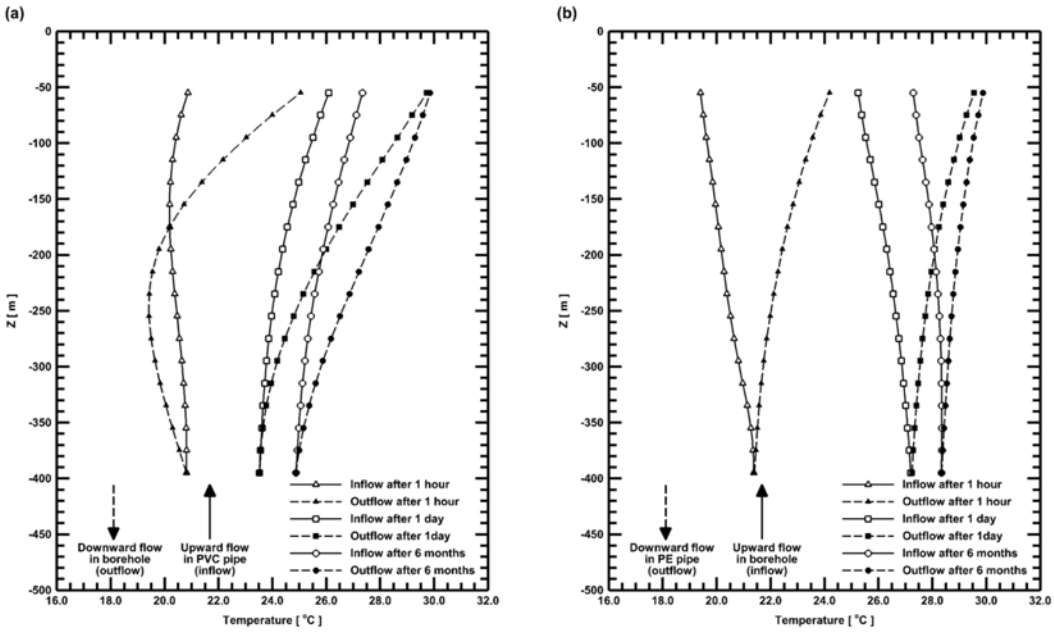

Fig. 5. Vertical temperature profiles of downward flow (outflow from the heat pump) and upward flow (inflow into the heat pump), for 1 hour, 1 day, and 6 months since the start of the cooling operation for (a) type A and (b) type B.

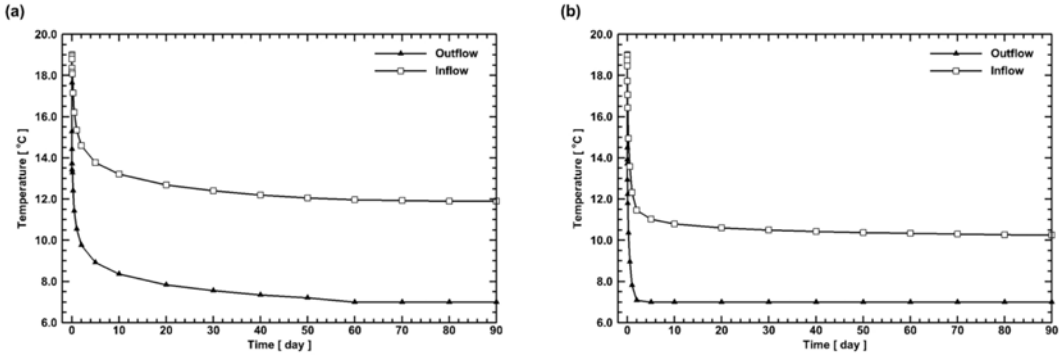

Fig. 6. Temporal changes in temperature of the outflow (from the heat pump) and the inflow (into the heat pump) during the heating operation of the heat pump for (a) type A and (b) type B.

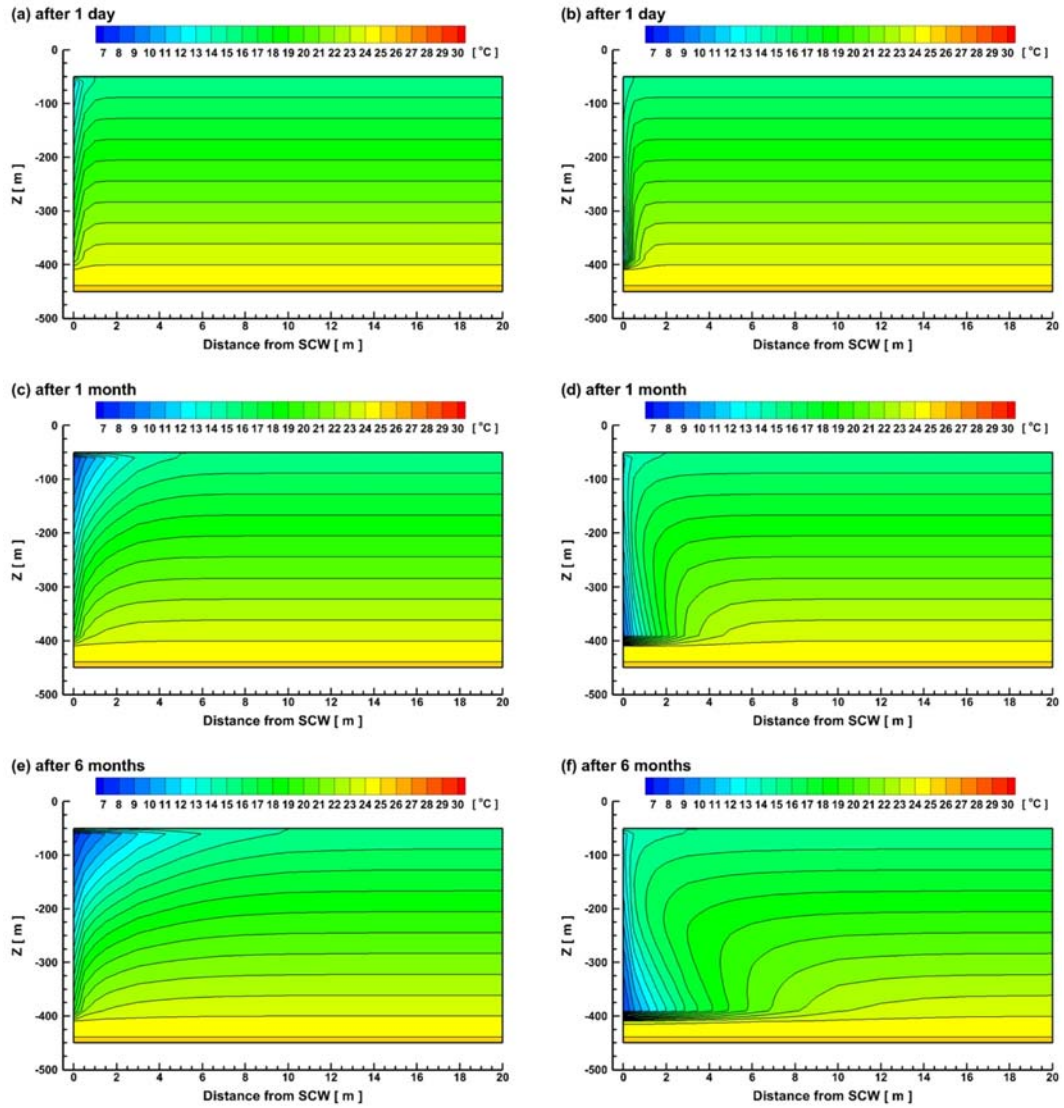

Fig. 7. Spatial distribution of temperature in the geologic formation, for (a) and (b) 1 day, (c) and (d) 1 month, and (e) and (f) 6 months since the start of the heating operation of the heat pump for type A (left column) and type B (right column).

더 큰 온도 차이를 유지할 수 있다. 그러나 그 차이가 매우 근소하게 나타나는데 이것은 PE 파이프가 PVC 파이프에 비하여 열전도도가 높아서 수주지열정 내에서 서로 반대방향으로 유동하는 유입수와 유출수 간의 열교환이 더 많이

발생하여 온도를 유지하기에 불리하기 때문인 것으로 해석된다.

난방 운영에 대한 수치 모델링 결과

난방 운영 시에 유입수 및 유출수의 시간에 따른 변화가 Fig. 6에 도시되어 있다. A유형 및 B유형 모두 히트 펌프를 통하여 열을 손실하므로 유출수의 온도가 감소하고 그 영향으로 유입수 온도 역시 감소하지만 그 감소 양상이 냉방 운영시의 온도 증가에 비해서 느리게 나타난다. 온도의 감소는 A유형이 B유형에 비해 더 느리게 나타났다. A유형의 경우 약 60일까지 유입수와 유출수의 온도차가 5℃가 유지되며, 90일 이내에 거의 정상 상태에 도달하는데 이때 온도차는 4.90℃가 된다. 반면 B유형은 A유형에 비해 유출수의 온도가 감소하여 제한 온도인 7℃에 도달하고 고정되어 난방을 위한 온도차가 유지되기 어려우며, 90일 이내에 거의 정상 상태에 도달하는데 이때 온도차는 3.25℃가 된다.

난방 운영 시 대상 지층 내에서의 지온 변화가 Fig. 7에 도시되어 있다. 먼저 A유형의 경우 난방을 통하여 온도가 하락한 유출수가 수주지열정으로 통하여 상부에서 곧바로 지층과 접촉하게 되며, 이에 따라서 상부 지역에서 지온이 감소한다. 이러한 지온 하강 지역은 방사상 방향으로 확장되어 냉방 운영 시의 지온 증가 양상과 유사하게 뒤집힌 쐐기 형태로 나타난다. 6개월 후에는 온도가 변화하는 영향 범위가 방사상 방향으로 약 14 m까지 나타난다(Fig. 7(e)). B유형의 경우 A유형과는 다르게 냉방을 통하여 온도가 하락한 유출수가 하부에서 지층과 접촉하며, 이에 따라서 하부 지역에서 지온이 하강한다. 이러한 지온 하강 지역 역시 냉방 운영 시의 지온 증가 양상과 유사하게 쐐기 형태로 나타난다. 6개월 후에는 온도가 변화하는 영향 범위가 방사상 방향으로 약 17 m까지 나타난다(Fig. 7(f)).

난방 운영 시 수주지열정 내부 및 PVC와 PE 파이프를 통하여 이동하는 유체 온도의 수직적 분포가 Fig. 8에 도시되어 있다. 먼저 A유형의 경우 온도가 하강한 유출수가 수주지열정을 통하여 지층과 접하면서 하부로 유동하게 되고 (Fig. 8(a)의 점선) 유출수보다 높은 온도를 가지는 주변 지층의 지하수와의 열교환 및 유체 혼입에 의해 하부로 갈수록 온도가 급격하게 높아지는 경향을 보여준다. 이렇게 온도가 높아진 유체는 하부의 스크린구간을 통하여 PVC 파이프를 거쳐 상승하여 히트 펌프에 유입되며(Fig. 8(a)의 실선), PVC 파이프의 열적 특성에 따라 파이프 외부로 유동하는 유출수와 열교환이 일어나서 상부로 이동할수록 온도가 하강하는 현상이 나타난다.

한편 B유형의 경우 온도가 하강한 유출수가 PE 파이프를 통하여 지층과 접촉 없이 하부로 유동하는데(Fig. 8(b)의 점선) 이때 PE 파이프 외부의 유입수와 열교환이 일어나게 되어 하부로 이동하면서 온도가 다소 상승한다. 한편 하부의 스크린구간을 통하여 지층에 분사된 유출수는 수주지열정을 통하여 지층과 접하면서 상부로 이동하여 최종적으로 히트 펌프에 유입된다(Fig. 8(b)의 실선). 이러한 과정에서 더 높은 온도를 가지는 주변 지층의 지하수와의 열교환 및 유체 혼입에 의해 상부로 유동하면서 열을 획득하는데 이와 동시에 PE 파이프를 통하여 하부로 유동하는 유출수와의 열교환을 통하여 열을 잃게 된다. 주변 지층의 지하수와의 열교환 및 유체 혼입의 효과는 주로 하부에서 우세하게 나

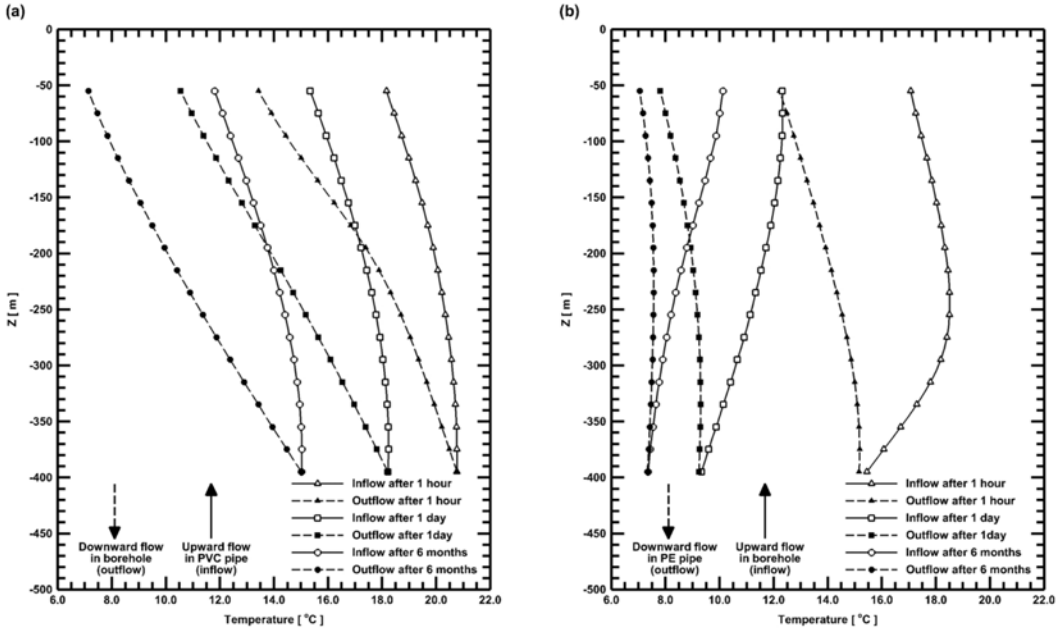

Fig. 8. Vertical temperature profiles of downward flow (outflow from the heat pump) and upward flow (inflow into the heat pump), for 1 hour, 1 day, and 6 months since the start of the heating operation for (a) type A and (b) type B.

타나 온도가 상승하는 요인이 되나 상부에서는 주변 지층의 지온 자체가 하부에 비해 낮으며, PE파이프 내 유출수와의 온도차가 증가함에 따라서 전반적으로 열을 잃고 온도가 감소하는 양상이 나타난다.

난방 운영 시 A유형은 유입수가 지온 경사에 의해 더 높은 온도를 가지는 하부에서 획득되는 형태이고 반대로 B유형은 유입수가 지온 경사에 의해 더 낮은 온도를 가지는 상부에서 유입이 일어나는 형태이다. 따라서 난방 운영 시 냉방 운영과는 반대로 A유형이 B유형보다 더 좋은 성능을 보일 가능성이 있으며, Fig. 6과 같이 A유형이 더 좋은 성능을 보여준다. 특히 A유형 및 B유형 간의 차이가 거의 근소한 냉방 운영에 비해서 난방 운영에서는 이러한 차이가 더 두드러지게 나타난다. 난방 운영에서는 냉방 운영과는 다르게 B유형의 유입수의 수직 분포에서 하부에서의 열 획득(열교환 및 하부의 상대적으로 더 높은 온도의 지하수 혼입)과 상부에서의 열 손실(PE파이프내의 유출수와의 열교환과 상대적으로 더 낮은 온도의 지하수 혼입)이 특징적으로 나타난다(Fig. 5(b) 및 Fig. 8(b)의 실선). 이러한 차이는 PVC파이프로 구성되는 A유형에서는 잘 나타나지 않은 것으로 PE 파이프가 PVC 파이프에 비하여 열전도도가 높기 때문에 열교환 및 온도 하락이 더 활발하게 일어난 것으로 해석된다. 또한 난방과 냉방 모두에서 PVC 또는 PE 파이프 내부와 수주지열정 내부에서 서로 반대방향으로 유동하는 유입수와 유출수 간의 열교환의 정도가 수주지열정의 전체적인 성능에 큰 영향을 줄 수 있음을 보여준다.

결 론

수주지열정의 복잡한 내부 구조 및 유체 유동과 열 이동 현상을 효율적이고 합리적으로 모사할 수 있는 수치 모델링 기법을 제시하기 위하여 기존에 지하수, 환경, 석유공학 분야에서 널리 사용되고 있는 열-수리학적 모델인 TOUGH2를 기반으로 한 모듈을 개발하였고 사례 연구로서 서로 다른 구조를 가지는 두 유형의 수주지열정에서 냉방 및 난방 운영을 수치 모의하였다. 먼저 TOUGH2는 각 격자 요소들의 경계를 통과하는 질량 이동(유체 유동) 및 열 이동(열이송 및 전도)을 동시에 산정하는데 수주지열정의 내부 구조 및 열 이동을 엄밀하게 모사하기 위하여 유체 유동은 일어나지 않고 열 이동(열전도)만이 고려되는 경계를 정의하는 기능을 개발하여 수치 모델에 모듈화하였다. 그리고 수주지열정의 실제 냉난방은 히트펌프에서의 유입수와 유출수의 온도 차이를 통해 운영이 되는데 이를 합리적으로 모사하기 위하여 사용자가 입력한 만큼의 온도를 가감하여 시계열의 형태로 부여하는 기능을 개발하여 수치 모델에 모듈화하였다. 이렇게 개발된 수치 모델을 이용하여 서로 다른 구조와 유입수 및 유출수 유동 방식을 가지는 두 유형의 수주지열에 대한 수치 모델링을 수행하였다. 수주지열정은 내부에 PVC 또는 PE파이프와 스테인리스 파이프 및 수중 펌프 등의 복잡한 구조를 가지면서 지층과 접하고 있는데 이를 간략화 하여 1차원의 수직 격자들의 조합으로 이산화하고 연결 관계를 설정하였다. 수치 모델링 결과들은 수주지열정의 전반적인 냉난방 운영이 주변 지층 및 지하수와의 열교환 및 유체 혼합에 영향을 받으며, 특히 PVC 또는 PE 파이프 내부와 수주지열정 내부에서 서로 반대방향으로 유동하는 유입수와 유출수 간의 열교환의 정도가 수주지열정의 전체적인 성능에 큰 영향을 줄 수 있음을 보여준다. 또한 새로운 모듈을 추가하여 수정된 열-수리학적 수치 모델이 수주지열정의 내부 구조 및 열 이동 현상을 합리적으로 모사할 수 있음을 보여준다. 본 연구에서 제시된 수치 모델링 기법 또는 모듈이 추가된 열-수리학적 수치 모델 TOUGH2는 수주지열정의 설계, 시공 및 운영 단계에서 열교환 성능을 정량적으로 분석할 때 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 본 연구에서는 아직 실제 현장에서 운영 중인 수주지열정의 관측 자료를 바탕으로 한 수치 모델링 결과의 검증이 이루어지지 못하였다. 따라서 이러한 수치 모델링 기법 또는 수정된 수치 모델의 정확성과 신뢰도를 높이고 활용성과 현장 적용성을 높이기 위하여 향후 현장 관측 자료에 근거한 연구가 필수적으로 수행되어야 한다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호:PJ01083302)의 지원에 의해 수행되었습니다. 본 연구는 또한 중원대학교 산학협력단 에너지환경연구소의 지원에 의해 수행되었습니다. 아울러 본 논문의 심사 과정에서 발전적인 조언과 비판을 해주신 익명의 심사자들께 깊은 감사를 드립니다.

References

Chen, N., 1979, An explicit equation for friction factor in pipe, Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals, 18(3), 296-297.

Deng, Z., 2004, Modeling of standing column wells in ground source heat pump systems, Ph.D. Thesis, Oklahoma State University, 303pp.

Hahn, J. S., Han, H. S., Hahn, C., Kim, H. S., and Jeon, J. S., 2006, Design guidelines of geothermal heat pump system using standing column well, Economic and Environmental Geology, 39(5), 607-613.

Hahn, J. S., Han, H. S., Hahn, C., Kim, H. S., 2007, Estimation of optimal spacing between standing column wells for geothermal heat pump system (1): A hydrogeological point of

view, Korea Journal of Geothermal Energy, 3(2), 60-68.
Hahn, J. S., Han, H. S., Hahn, C., Kim, H. S., 2008, Estimation of optimal spacing between standing column wells for geothermal heat pump system (2): Focused on the design of SCW, Korea Journal of Geothermal Energy, 4(1), 62-70.
Hahn, J. S., Han, H. S., and Hahn, C., 2010, Geothermal Energy, Hanrimwon Publishing Co., Seoul, Korea, 1093pp.
Hwang, G., 2013, Open loop underground heat exchanger development with stability, functionality and efficient maintenance, Final Report 11TRPI-C057631-01, GGK Inc., 161pp.
IPCC (International Panel on Climate Change), 2014, Climate Change 2014: Synthesis Report, the fifth assessment report, IPCC, Geneva, Switzerland, 151pp.
KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2005, Mid- and long-term planning of research and development on geothermal resources utilization technologies, Final Report 2004-R-NC02-P-01-0-000, KIGAM, Daejeon, Korea, 104pp.
Kwon, K. S., Lee, J. Y., and Mok, J. K., 2012, Update of current status on ground sources heat pumps in Korea (2008-2011), Journal of the Geological Society of Korea, 48(2), 193-199.
Lindeburg, M. R., 2013, Mechanical Engineering Reference Manual for the PE Exam, 13th edition, Professional Publications Inc., Belmont, CA, USA, 1488pp.
Munson, B. R., Young, D. F., and Okiishi, T. H., 1998, Fundamentals of Fluid Mechanics, third edition, Wiley, New York, USA, 877pp.
Narasimhan, T. N. and Witherspoon, P. A., 1976, An integrated finite difference method for analyzing fluid flow in porous media, Water Resources Research, 12(1), 57-64.
Olson, R. M. and Wright, S. J., 1990, Essentials of Engineering Fluid Mechanics, fifth edition, Harper and Row Publishers, New York, USA, 638pp.
Park, D. H., Kim, K. K., Kwak, D. Y., Chang, J. H., and Park, S. S., 2010a, Numerical simulaton of standing column well ground heat pump system, Part I: Validation of the numerical model, Journal of the Korean Geotechnical Society, 26(2), 33-43.
Park, D. H., Kim, K. K., Kwak, D. Y., Chang, J. H., and Na, S. M., 2010b, Numerical simulaton of standing column well ground heat pump system, Part II: Parametric study for evaluation of the performance of standing column well, Journal of the Korean Geotechnical Society, 26(2), 45-54.
Park, Y., Mok, J. K., Jang, B. J., Park, Y. C., and Lee, J. Y., 2013, Influence of open and closed loop geothermal cooling and heating systems on hydrogeological properties, Journal of the Geological Society of Korea, 49(6), 649-659.
Park, Y., Mok, J. K., Jang, B. J., Lee, J. Y., and Park, Y. C., 2015, Influence of closed loop ground source heat pumps on groundwater: a case study, Journal of the Geological Society of Korea, 51(2) 243-251.
Pruess, K., Oldenburg, C., and Moridis, G., 1999, TOUGH2 user's guide, version 2.0, Technical Report, No. LBNL-43134, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA, 198pp.
Sutera, S. P. and Skalak, R., 1993, The history of Poiseuille's law, Annual Review of Fluid Mechanics, 25(1), 1-19.
Titow, W. V., 1984, PVC Technology, Springer, New York, USA, 1260pp.

박성민
㈜모움과나눔
대전광역시 유성구 테크노3로 65, 한신S메카 420호
Tel: 070-4946-4770
Fax: 050-5115-8497
E-mail: komandu@naver.com

황기섭
㈜모움과나눔
대전광역시 유성구 테크노3로 65, 한신S메카 420호
Tel: 070-4946-4770
Fax: 050-5115-8497
E-mail: extermist@hanmail.net

문종필
국립농업과학원
전북 완주군 이서면 농생명로 166
Tel: 063-238-4084
Fax: 063-238-4078
E-mail: jpmoon2002@korea.kr

김중휘
중원대학교 신재생에너지자원학과
충북 괴산군 괴산읍 문무로 85 중원대학교
Tel: 043-830-8781
Fax: 043-830-8781
E-mail: jung0209@jwu.ac.kr