

# 인공저류층 지열 시스템의 생산정 내 지하수 유동 지열 이동 예측 평가 수치 모델링

김중휘<sup>1,\*</sup> · 윤가영<sup>2</sup> · 박민희<sup>1</sup>

<sup>1</sup>중원대학교 소방방재학과

<sup>2</sup>중원대학교 신재생에너지학과

## 요 약

인공저류층 지열 시스템에서 지열수 생산 시에 지열 생산정 내부 및 지층에서 발생하는 복잡한 지하수 유동 및 열 이동의 상호 작용을 예측 및 분석 위한 수치 모델링 기법을 개발하였다. 개발된 수치 모델링 기법은 지열 생산정의 복잡한 사양 및 설정과 지층의 연계를 모두 고려할 수 있으며, 지열수 생산의 현실적인 조건하에서 지열정 내부의 압력과 온도를 정확하게 예측할 수 있다. 이러한 기법을 적용한 수치 모델링 결과는 지열수 생산에 의해서 지열 저류층을 중심으로 압력이 감소하고 이 영역이 수평적으로 확장하며, 온도는 이와는 다르게 생산정 주변에서 전체적으로 상승함을 보여준다. 지열수의 생산이 지속됨에 따라서 생산정과 주변 지층 간의 열교환에 의한 지열수의 열손실은 점차적으로 줄어든다. 열손실이 매우 작은 값이지만 지속적으로 일어나는 상황에서도 생산정 내에서의 온도는 상부로 갈수록 소폭 상승하는데 이것은 물의 열역학적 특성에 의한 것으로 해석된다. 본 연구에서 제시된 수치 모델링 기법을 활용하게 되면 지열수의 생산 조건을 만족할 수 있는 고유투수계수의 값을 정밀하게 산정할 수 있으며, 따라서 인공저류층 지열 시스템의 설계/운영안을 수립하는데 효율적인 도구로 활용될 수 있다.

**주요어:** 인공저류층 지열 시스템, 생산정, 지하수 유동, 열 이동, 수치 모델링

**Jung-Hwi Kihm, Ga-Young Yun and Minhee Kwak, 2021, Numerical modeling of prediction and evaluation of groundwater flow and heat transport in production well for enhanced geothermal system. Journal of the Geological Society of Korea. v. 57, no. 2, p. 243-256**

**ABSTRACT:** A numerical modeling technique was developed to predict and analyze the interaction of complex groundwater flow and heat transfer occurring in the geothermal production well and geologic formation during geothermal water production for the enhanced geothermal system. The developed numerical modeling technique can consider the complex specification and setting of the geothermal well and its linkage to the geologic formation. It can accurately predict the pressure and temperature in the geothermal well under realistic conditions of geothermal water production. The numerical modeling results show that the pressure decreases in the geothermal reservoir, the depression expands horizontally, and the temperature increases around the production well due to the geothermal water production. As geothermal water production continues, the heat loss of geothermal water due to heat exchange between the production well and the surrounding geologic formations gradually decreases. Despite the continuous slight heat loss, the temperature in the production well slightly rises from the bottom to the top. This temperature rise is due to the thermodynamic properties of water. Using the numerical modeling technique presented in this study, the intrinsic permeability, which meets sufficient criteria for producing geothermal water, is accurately calculated. Therefore, this technique can be used as an effective tool for establishing the design and operation scheme of the enhanced geothermal system.

**Key words:** enhanced geothermal system, production well, groundwater flow, heat transport, numerical modeling

*(Jung-Hwi Kihm and Minhee Kwak, Department of Fire and Disaster Prevention, Jungwon University, Goesan-Gun 28024, Republic of Korea; Ga-Young Yun, Department of Renewable Energy, Jungwon University, Goesan-Gun 28024, Republic of Korea)*

\* Corresponding author: +82-43-830-8781, E-mail: [jung0209@jwu.ac.kr](mailto:jung0209@jwu.ac.kr)

## 1. 서 론

최근 기후변화의 심각성에 대한 전 세계적인 인식이 확산됨에 따라 각 국가별 탄소 중립 선언의 가속화와 기후목표 상향동맹 가입 등의 국가 간 협력 체계가 강화되고 있는 추세이다(Ministry of Economy and Finance of Korea, 2020a). 이에 따라 우리 정부도 2020년 탄소 중립 선언에 이어서 그린뉴딜 정책의 발표 그리고 2050 탄소중립 추진전략의 발표를 통하여 온실가스 문제에 대한 능동적인 대응을 준비하고 있다(Ministry of Economy and Finance of Korea, 2020a, 2020b). 이들 계획에서는 친환경 저탄소 구조를 정착시키기 위하여 에너지 전환을 가속화하고 신재생에너지의 공급을 확대하는 전략을 제시하고 있다. 우리나라의 신재생에너지 자원 잠재량 중 기술적 잠재량은 설비용량 기준으로 약 8,756 GW인데 이 중에서 천부와 심부를 합한 지열에너지의 경우 약 1,259 GW로 약 14%를 차지한다(Korea Energy Agency, 2018). 그러나 2017년 포항 지역에서 발생한 지진 이후 심부 지열 에너지뿐만 아니라 모든 지열 에너지의 안전성에 대한 대중적인 우려가 증폭되었고 현재 국가적 정책 차원에서 신재생에너지 공급 확대 전략에 지열 에너지 전체가 포함되지 못한 실정이다. 열에너지 공급 측면에서 천부 지열의 활용은 고온의 열수를 필요로 하지 않아 지역적인 제약이 없는 에너지 기술로 특히 우리나라와 같이 난방과 냉방을 순차적으로 해야 하는 조건에서 적합하다. 심부의 지열은 태양광이나 풍력과는 다르게 24시간 지속적으로 일정 수준 이상의 전력을 생산할 수 있어 전력 에너지 공급의 기저 부하를 담당할 수 있다. 이러한 장점들을 가지고 있으므로 지열의 활용은 지진 및 환경 안전성에 대한 우려를 불식시킬 수 있을 만큼의 연구와 기술 개발이 이루어진다면 향후 탄소중립을 위한 신재생에너지의 큰 축을 담당할 수 있을 것으로 기대된다.

심부 지열은 주로 지열 발전의 형태로 활용될 수 있는데 이때 지열의 부존을 위해서는 열원(heat source), 저류층 또는 저류 구조(geothermal reservoir), 지열수(geofluid)가 필수적인 요소이며, 주로 화산 지역에서 이러한 요소들을 충족할 수 있다(Huenges, 2010). 이러한 지역적 제약을 극복하기 위하여 비화산지대를 대상으로 지열수의 생산량과 원활한 열교환의 확

보 목적으로 인공적인 저류층을 생성하는 기술을 인공저류층 지열 시스템(Enhanced Geothermal System, EGS)이라고 한다(Tester *et al.*, 2006; Huenges, 2010). 인공적으로 저류층을 생산하는 과정에서 고압의 유체를 심부의 지층에 주입하고 암석 내에 균열을 생성하는 수리 자극(hydraulic stimulation)을 수행하게 된다. 이때 새로운 작은 균열들이 필연적으로 발생하게 되며, 이들이 바로 미소지진(micro-seismicity)으로 나타나서 해당 진동에 대한 관측과 관리가 필수적이다(Tester *et al.*, 2006). 인공저류층 지열 시스템의 설계와 운영 계획 수립에서 중요한 것은 해당 지열 발전 시스템을 원활하게 운영하기 위한 지열수의 유량 및 온도 조건이며, 이를 달성하기 위한 지열 저류층의 심도(온도의 목표 달성)와 수리 자극을 통한 목표 생산성지수(Productivity Index, PI)의 설정(유량 목표 달성)이 필요하다(Glassley, 2015). 또한 심부의 지열수를 끌어올리기 위한 펌프 또는 터빈의 설치 위치 및 운영 압력 조건이 부가적으로 설계되어야 하며, 이때 지열 생산정을 통해 이동하는 지열수의 압력-온도 변화 및 열역학적인 물성 변화 역시 중요한 요소이다(Glassley, 2015).

국내에서는 2010년 이후 지열 발전과 관련한 원천 기술 및 실용화 기술에 대한 여러 연구 과제가 진행된 바 있으며, 특히 본격적인 인공저류층 지열 시스템 실증을 위한 “MW급 지열발전 상용화 기술 개발”이 경상북도 포항 지역에서 추진된 바 있다(Korea Energy Agency, 2018). 그러나 이 현장 실증 과제인 경우 2017년 인근 지역에서 발생한 지진과의 연관성에 대한 문제가 제기된 이후로 중단된 상태이며, 포항 지진 정부조사연구단(Korean Government Commission, 2019)에 의하여 해당 지진이 지열 발전 프로젝트의 행위로 인하여 촉발된 촉발지진(triggered earthquakes)으로 발표된 이래로 많은 학문적인 연구와 논의가 진행 중에 있다. 수리지질학적 관점에서는 주로 수리 자극을 위한 유체 주입과 이에 따른 미소지진 및 본 지진의 수리-역학적 또는 수리-화학적 분석 연구가 주로 이루어졌다(Park *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2020; Lim *et al.*, 2020; Palgunadi *et al.*, 2020; Farkas *et al.*, 2021; Wassing *et al.*, 2021; Yoo *et al.*, 2021). 현재 심부 지열과 관련하여서 국내에서는 특히 지진 유발 가능성과 이에 의한 안정성 평가, 포항 지역의 지진에 대한 해석을 중심으로 연구가 진행 중에 있

으며, 인공저류층 지열 시스템 자체의 개발 및 설계와 운영에 대한 연구는 위의 지열발전 프로젝트 중단 이후로 거의 이루어지지 않고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 향후 국가적 차원의 탄소중립 정책의 추진 시에 지열 활용이 역할을 담당하기 위해서는 지진 유발 가능성에 대한 연구뿐만 아니라 인공저류층 지열 시스템의 열-수리학적 특성을 이해하고 설계 및 운영에 대한 안을 제시할 수 있는 연구들이 균형 있게 이루어져야 한다.

인공저류층 지열 시스템과 관련된 최근의 열-수리학적 수치 모델링 연구들은 크게 보면 생산정과 주입정 사이에 발달한 단열 시스템에 초점을 맞추어 지열수 생산 및 열교환 능력에 대한 해석 중심으로 한 연구들(Jiang *et al.*, 2014; Huang *et al.*, 2017; Sun *et al.*, 2017; Yao *et al.*, 2018; Asai *et al.*, 2019; Cheng *et al.*, 2019)과 생산정 및 발전 시설물의 공정 설계를 중심으로 물의 상변화 및 관로에서의 유체 유동을 중심으로 한 연구들(Noorollahi *et al.*, 2015; Alimonti *et al.*, 2019; Renaud *et al.*, 2019)로 나뉜다. 전자의 경우 주로 자원공학이나 지질학 전공 연구자들이, 후자의 경우 화학공학이나 에너지공학 전공 연구자들이 연구를 수행해왔다. 따라서 전자의 연구들은 생산정 내에서의 유체 유동이나 주변 지층 및 내부 구조로의 열 교환에 대한 기술이나 해석이 부족하며, 물의 열역학적 특성 변화나 실제 발전 시설의 운영 조건 등을 잘 고려하지 못하였다. 반대로 후자의 연구들은 실제 지열수가 공급되는 지층의 조건이나 열 교환이 발생하는 주변 지층들에 대한 분석이 부족하다. 근본적으로 지층 내에서의 열-수리학적 현상과 생산정 내에서의 유체 유동 및 열이동 현상은 각각 개별적으로도 수치 모델을 통한 해석이 복잡하고 어려운 측면이 있어 이들 전체를 통합한 해석을 위한 많은 노력과 연구가 필요하다.

본 연구의 목적은 이러한 노력의 첫 단계로 지층 내 현상을 해석하는 기존의 수치 모델을 기반으로 지열수 생산 시설의 조건을 합리적으로 고려하며, 생산정 내에서 발생하는 복잡한 지하수 유동 및 열 이동의 상호 작용을 모의하는 수치 모델링 기법을 개발하는 것이다. 그리고 이를 독일의 그로스 쉐네베크(Groß Schönebeck)에서 수행된 실증 현장 조건에 적용하여 지열수 생산 시 지열정 내부 및 외부 지층에서 발생하는 열-수리학적 현상을 예측 및 분석하

며, 해당 시스템의 운영 조건 설계에 필요한 기초 자료를 제시하는 것이다.

## 2. 수치 모델링 개요

### 2.1 열-수리학적 수치 모델과 지열 생산정 적용을 위한 기법

정확하고 효율적인 수치 모델링을 수행하기 위하여 기존의 열-수리학적 모델인 TOUGH2 (Pruess *et al.*, 1999)를 기반으로 지열 생산정 내부 및 지층에서 발생하는 복잡한 지하수 유동 및 열 이동의 상호 작용을 적용하기 위한 기법을 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. 또한 이 모델에서는 다양한 유체의 특성을 모듈(module)을 통하여 고려할 수 있다. 즉 온도와 압력의 변화에 따른 지층 유체의 밀도 및 동적점성계수 변화를 고려할 수 있다. 본 연구에서는 지하수의 액체상과 기체상의 유체 특성을 고려할 수 있는 EOS1 모듈을 사용하였다.

지열 생산정은 실제로 가장 외부의 그라우트와 케이싱, 유체 유동 통로, 전기수증펌프(electrical submersible pump, ESP) 및 내부 관로 그리고 내부 유체 통로등으로 구성되고 지층에 비해서 매우 좁고 길며, 심도에 따라서 그 설치 사양이 상이하다. 이러한 복잡한 생산정과 지층의 연결을 위하여 이들 구조를 단순화하고 등가(equivalent)의 격자 요소로 이산화하는 것이 필요하다. 본 연구에서 사용된 TOUGH2는 불규칙하고 불균일한 격자 요소를 실체가 아닌 가상의 연결을 통하여 구성할 수 있기 때문에 이러한 복잡한 격자 요소를 고려할 수 있다.

지열 생산정과 이를 통한 지하수 유동, 열 이동 현상을 수치 모델링 하는데 있어서 다음의 난관이 존재한다: ① 그라우트, 케이싱, 파이프는 내부적으로 유체 유동은 발생하지 않고 열 이동 중에서도 전도만 일어나야 하고 내/외부의 지층 또는 유체 통로(지하수로 채워진)와도 마찬가지로 열전도만이 일어나야 함, ② 지상부의 발전기 작동을 위한 최소한

의 압력을 충족하기 위하여 지하 깊은 곳에 설치된 전기수증펌프에서 적절하게 압력의 상승(boost-up)이 일어나야 하는데 중간에 압력이 단속적으로 증가하는 조건을 고려할 수 있는 수치 모델 및 기법이 매우 제한적임. 첫 번째 문제와 관련하여 TOUGH2는 각 격자 요소들의 경계를 통하여 질량 이동(유체 유동) 및 열 이동(열 이송 및 전도)이 반드시 동시에 일어난다. 선행 연구를 통하여 각 격자 요소들의 경계 사이에서 열전도만이 고려되는 모듈을 개발한 바 있으며(Park *et al.*, 2016), 이를 활용하여 해결하였다. 두 번째 문제의 경우 지열 생산정의 내부 유체 유동 통로를 전기수증펌프를 기준으로 두 구간으로 나누고 두 구간의 연계가 수치학적으로 동시에 되도록 TOUGH2의 source code를 수정/개발하여 해결하였다. 먼저 지층과 지열 생산정이 만나는 가장 하부로부터 전기수증펌프까지의 구간(아래 구간)에서는 전기수증펌프로 유입되는 단위 시간당 물의 질량을 고정하고 하부의 스크린구간으로부터 유입된 지열수가 지열 생산정을 따라서 올라오면서 주변 지층과 열교환(열전도)을 하는 조건을 수치 모델링 하였다. 전기수증펌프에서 지상의 지열수 유입구까지의 구간(위 구간)에서는 지상의 지열수 유입구에서 압력(발전기 운영을 위한 최소 압력)을 고정하고 전기수증펌프 위치에서 하부 구간을 통하여 펌프에 유입된 지열수 온도를 유지한 채로 같은 양을 다시 주입하는 경계 조건을 설정하여 수치 모델링 하였다. 이 경우에도 지열수는 상부로 이동하면서 주변의 구조물 및 지층과 열교환(열전도)을 하게 된다. 여기에서 아래 구간에서 계산된 펌프로 유입된 온도가 동시에 위의 구간의 전기수증펌프 위치에 주입되도록 적용되어야 하므로 이를 수치학적으로 선행연립방정식을 구성하는 단계에서 자동으로 반영되도록 source code를 수정/개발하였다. 따라서 이러한 기법을 적용 하면 지상의 지열수 유입구에서 압력과 생산 유량 두 가지가 주요 조건 변수가 되고 이들 변수에 따른 생산정 내에서의 압력과 온도가 연속적으로 계산되게 된다.

## 2.2 수치 모델링 설정

수치 모델링 대상 지층 및 지열정의 설정은 독일의 그로스 쉐네베크(Groß Schönebeck)의 인공저류층 지열 시스템 실증 현장의 조건을 참조하여 결정하였

다(Zimmermann *et al.*, 2010). 해당 실증 현장은 비화산지대에서 수리 자극을 통하여 지열 시스템을 시도한 곳으로 관련 연구 자료들이 많이 공개되어 있어 본 연구에 활용하였다. 현재 지진 안전성 문제로 중단된 국내의 포항 지열 발전 프로젝트와 조건들이 유사한 측면이 있으며, 실제로 연구 개발과 사업 수행에 큰 영향을 준 현장이다. 현재 주입정과 생산정 두 개의 심부 지열정이 완공되어 있으며, 지속적인 수리 자극과 실험 및 연구를 수행 중에 있다(Blöcher *et al.*, 2010, 2015, 2018; Zimmermann and Reinicke, 2010; Jacquy *et al.*, 2016, 2018). 해당 지열정이 시공되어 있는 깊이까지의 지질학적 조건은 하부로부터 석탄기의 화산암, 하부 페름기의 화산암 및 퇴적암, 역암 등을 포함하는 퇴적암, 상부 페름기의 증발암류, 하부 트라이아스기의 퇴적암, 중부 트라이아스기의 증발암을 포함하는 퇴적암, 상부 트라이아스기의 석회암을 포함하는 퇴적암, 쥐라기의 미고결 퇴적암, 백악기의 미고결 퇴적암, 제3기의 미고결 퇴적암 및 현생의 퇴적물로 구성된다. 전반적인 지층들은 층상으로 분포하며, 암염돔 구조 및 구조 운동에 의한 완만한 습곡 등이 분포한다(Moeck *et al.*, 2005; Blöcher *et al.*, 2010). 그 중에서 하부 페름기의 화산암 및 퇴적암이 분포하는 -4,354 m ~ -3,878 m가 주요 지열 저류층이다(Reinicke *et al.*, 2005; Zimmermann *et al.*, 2010).

수치 모델링 영역은 대상 지층에 대하여 반경 500 m ( $x = 0 \sim 500$  m), 높이 5,000 m ( $z = 0 \sim -5,000$  m)의 이차원 방사상 축대칭 격자로 설정하였다(그림 1) 격자 요소는 수평 방향으로 20개, 수직 방향으로 451개가 고려되었다. 수평 방향으로는 지열정에 가까울수록 격자 간격이 줄어드는 방식으로 구성하였다. 수직 방향으로는 지열정이 설치된 영역에서 10 m 간격으로 세밀하게, 하위의 지층에서는 조밀하게 구성하였다. 대상 지층의 물성은 기존의 문헌(Freeze and Cherry, 1979; Domenico and Schwartz, 1990; Fetter, 1994) 및 해당 지역의 연구 결과(Reinicke *et al.*, 2005; Blöcher *et al.*, 2010)를 참조하여 결정하였으며, 특히 열전도도의 경우에는 측정된 지온경사로부터 구간별로 계산된 결과(Ollinger *et al.*, 2010)를 이용하였고 표 1에 정리되어 있다. 한편 지열 생산정은 하부에서 경사를 가지고 기울어져 설치되어 있으나 본 연구에서는 수치 모델링의 안정성과 효율성을

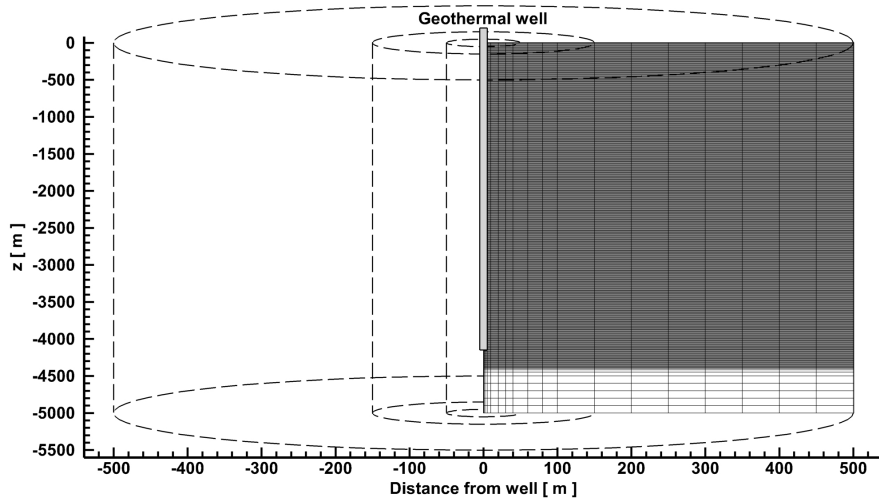
확보하기 위하여 지층의 경우 축 대칭 격자로 구성하고 수직인 지열정이 각 심도에서 만나는 방식으로 구성하였다. 수치 모델링 영역의 최상부와 최하부는 각각 지하수와 열 모두 통과하지 않는 경계조건을 부여하였고 측면 방향의 끝에는 ( $x = 500$  m) 지하수

압력과 지온이 모두 초기 조건에 고정된 경계를 부여하였다. 수치 모델링은 총 10일의 기간에 대하여 수행하였다.

앞에서 언급한 바와 같이 수치 모델인 TOUGH2의 특성을 활용하여 지열정의 복잡한 형태 및 구조

**Table 1.** Stratified distribution and thermo-hydrological properties of the geologic formation.

Property	Carboniferous volcanic rocks	Permian volcanic and sedimentary rocks	Permian sedimentary rocks	Permian evaporates	Triassic sedimentary rocks	Triassic sedimentary rocks with evaporates	Triassic sedimentary rocks with limestone	Jurassic unconsolidated sedimentary rocks	Unconsolidated sedimentary rocks (K, T, Q)
Top [m]	-4,354	-3,878	-3,165	-2,381	-1,579	-1,328	-732	-366	0
Bottom [m]	-5,000	-4,354	-3,878	-3,165	-2,381	-1,579	-1,328	-732	-366
Porosity [%]	10	10	10	2	10	10	20	20	20
Horizontal intrinsic permeability [ $m^2$ ]	$1.00 \times 10^{-16}$	$1.00 \times 10^{-14}$	$1.00 \times 10^{-15}$	$1.00 \times 10^{-16}$	$1.00 \times 10^{-14}$	$1.00 \times 10^{-15}$	$1.00 \times 10^{-15}$	$1.00 \times 10^{-13}$	$1.00 \times 10^{-12}$
Vertical intrinsic permeability [ $m^2$ ]	$1.00 \times 10^{-17}$	$1.00 \times 10^{-15}$	$1.00 \times 10^{-16}$	$1.00 \times 10^{-17}$	$1.00 \times 10^{-15}$	$1.00 \times 10^{-16}$	$1.00 \times 10^{-16}$	$1.00 \times 10^{-14}$	$1.00 \times 10^{-13}$
Solid density [ $kg/m^3$ ]	2,750	2,750	2,700	2,900	2,700	2,800	2,650	2,700	2,650
Specific heat [ $J/kg/^\circ C$ ]	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Thermal conductivity [ $W/m/^\circ C$ ]	2.51	2.51	3.65	3.49	2.02	1.80	1.66	3.06	1.86



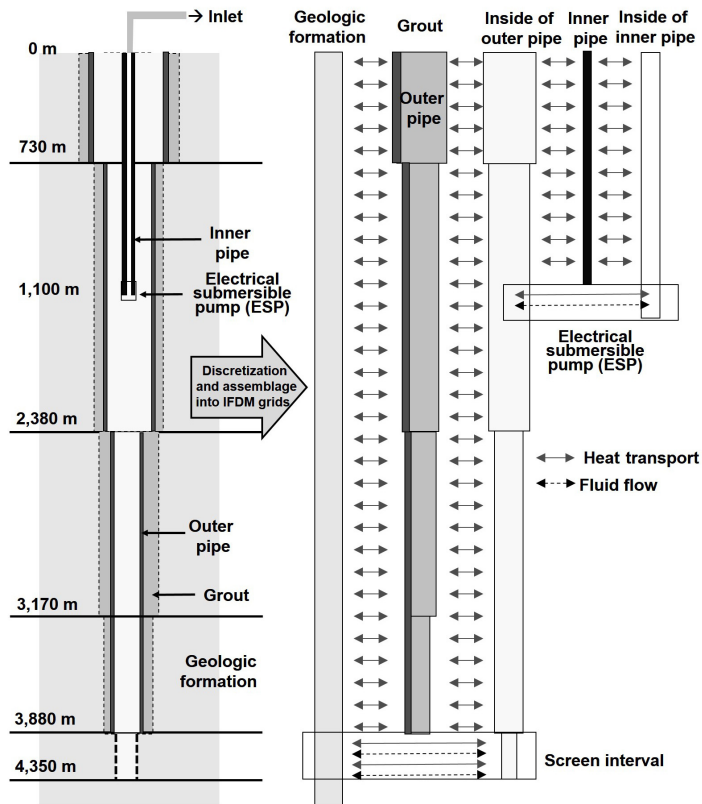
**Fig. 1.** Schematic diagram of the geologic formation (modeling domain), geothermal production well, and grid elements used in the numerical simulations. The horizontal coordinate axis  $x$  is exaggerated 10 times.

를 등가의 격자 조합으로 구성하였다(그림 2). 외부의 그라우트(grout)와 케이싱(outer pipe), 케이싱 내의 유체 유동 통로(inside of outer pipe), 내부 관로(inner pipe), 내부 유체 유동 통로(inside of inner pipe)를 구성 요소로 구분하고 각각의 심도에서 외경과 내경을 이용하여 등가 부피 및 접촉 면적과 연결 관계를 구성하였다(표 2). 이들은 수직적으로는 일차원의 수직 격자들의 연결로 구성되며, 수평적으로는 각 요소들끼리 연결된다(그림 2). 각 요소들과 지층의 연결 관계에서 모두 수직, 수평적으로는

열전도가 고려되었고 유체가 실제로 유동하는 케이싱 내의 유체 유동 통로, 내부 유체 유동 통로는 수직적으로 지하수 유동과 열 이동의 전도 및 대류가 모두 고려되었다. 최하부의 스크린 구간에서는 지층과 케이싱 내의 유체 유동 통로에서는 지하수 유동과 열 이동이 모두 일어나며, 전기수증펌프 구간에서는 앞에서 기술한 바와 같이 펌프를 중심으로 상하부를 분리하고 펌프 하부까지 도달한 지하수가 온도를 유지한 채로 펌프 상부에 다시 공급되는 형태의 수치 모델링 조건을 적용하였다. 이때 지상의 지열수 유

**Table 2.** Specification and thermal properties of the compartments of the geothermal production well.

Property	Grouting cement	Outer pipe	Inner pipe
Diameter (outer) [mm]	508.0 ~ 152.0	400.0 ~ 109.0	114.3
Diameter (inner) [mm]	400.0 ~ 109.0	392.0 ~ 103.0	107.0
Solid density [ $\text{kg/m}^3$ ]	2,400	8,000	8,000
Specific heat [ $\text{J/kg}^\circ\text{C}$ ]	750	510	510
Thermal conductivity [ $\text{W/m}^\circ\text{C}$ ]	0.60	16.00	16.00



**Fig. 2.** Schematic diagram of the geothermal production well and its discretization and assemblage for IFDM (Integral Finite Difference Method) grids.

입구에서 압력(운영 압력)은 1.52 MPa (15 atm)으로 고정하고 펌프 주변에서의 유출 유입량, 즉 발전 생산 유량은 20 kg/sec로 설정하였다.

지열 생산정의 구성 요소인 그라우트, 케이싱, 내부 관로는 심도에 따라서 다른 직경을 가지며 이들의 열적 물성은 표 2에 정리되어 있다(Lindeburg, 2013). 또한 케이싱 내의 유체 유동 통로와 내부 유체 유동 통로의 경우 수치학적인 불안정성을 최소화하기 위하여 유체의 유동이 층류로 발생하여 Darcy의 법칙을 따른다는 가정을 하여 Darcy-Weisbach 방정식에 의하여 산정된 유효고유투수계수(effective intrinsic permeability)를 적용하였다(Olson and Wright,

1990; Sutera and Skalak, 1993; Munson *et al.*, 1998).

### 3. 수치 모델링 결과

#### 3.1 지열수 생산에 의한 지층과 지열정에서의 압력 온도 변화

발전을 위한 지열수의 생산이 시작됨에 따라서 스크린 구간과 인접한 지층 내에서는 압력의 하락이 발생하고 압력이 감소하는 영역이 시간이 지남에 따라서 점차적으로 지열정에서 멀어지는 방향으로 확산된다(그림 3). 생산 시작 후 1분 이내에는 지열정 중심의 20 m 내외의 영역에서 압력의 감소가 발생

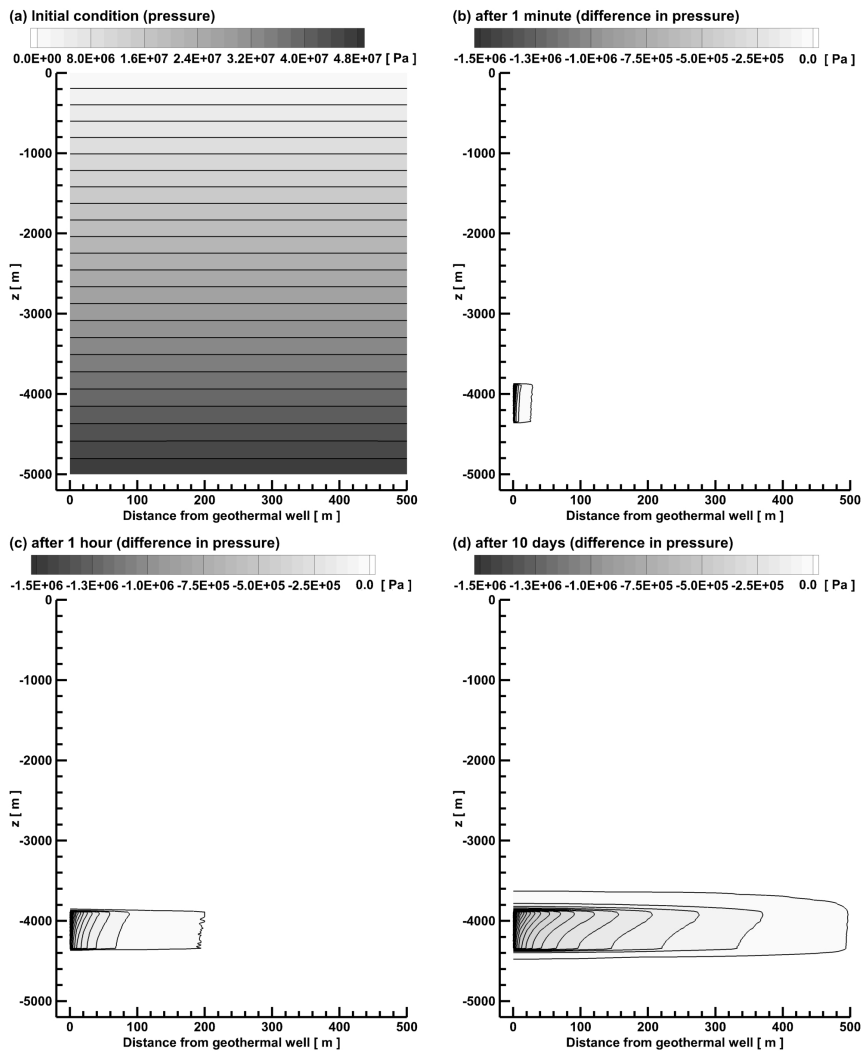


Fig. 3. Spatial distribution of (a) pressure at the initial state, and difference in pressure from the initial value after (b) 1 minute, (c) 1 hour, and (d) 10 days in the geologic formation.

하고(그림 3b) 1시간 후에는 해당 영역이 약 200 m 까지 확장되며(그림 3c), 10일 이후에는 영역의 경계에 해당하는 500 m 부근까지 도달한다(그림 3d). 지층 내 온도 분포의 초기 상태에서 등온도선의 수직 방향 간격이 심도에 따라서 구간마다 차이를 보여준다(그림 4a). 이는 앞에서 설명한 바와 같이 그로스 쉐네백의 현장에서 측정된 지온 경사로부터 계산된 각 지층의 열전도도를 물성값으로 설정하였기 때문이다. 지층 내의 압력이 주로 스크린 구간을 중심으로 지열 저류층에서 변화가 발생한 것과는 달리 지층 내 온도의 분포는 주입정을 따라서 전체적으로 변화한다(그림 3과 그림 4 참조). 생산 시작 후 6시간

이 경과하면 생산정 주변의 지층의 온도가 소폭 증가하기 시작하며(그림 4b), 1일 이후에는 온도의 상승이 더 커지고 그 영역이 지열정에서 멀어지는 방향으로 확장된다(그림 4c). 10일 이후에는 지열정 바로 주변에서 온도가 현저하게 상승한 영역이 나타나고 이 영역이 지열정으로부터 수평으로 약 5 m 정도 떨어진 영역까지 도달한다(그림 4d). 또한 지열정 주변의 온도 상승이 점차적으로 둔화되고 10일 이후에는 변화가 매우 느리게 나타나게 된다. 이것은 스크린구간을 통하여 지열정으로 유입된 지하수가 상부로 상승하면서 주변의 지층과 열전도에 의한 열교환이 발생하기 때문이다. 또한 시간이 지남에 따라서

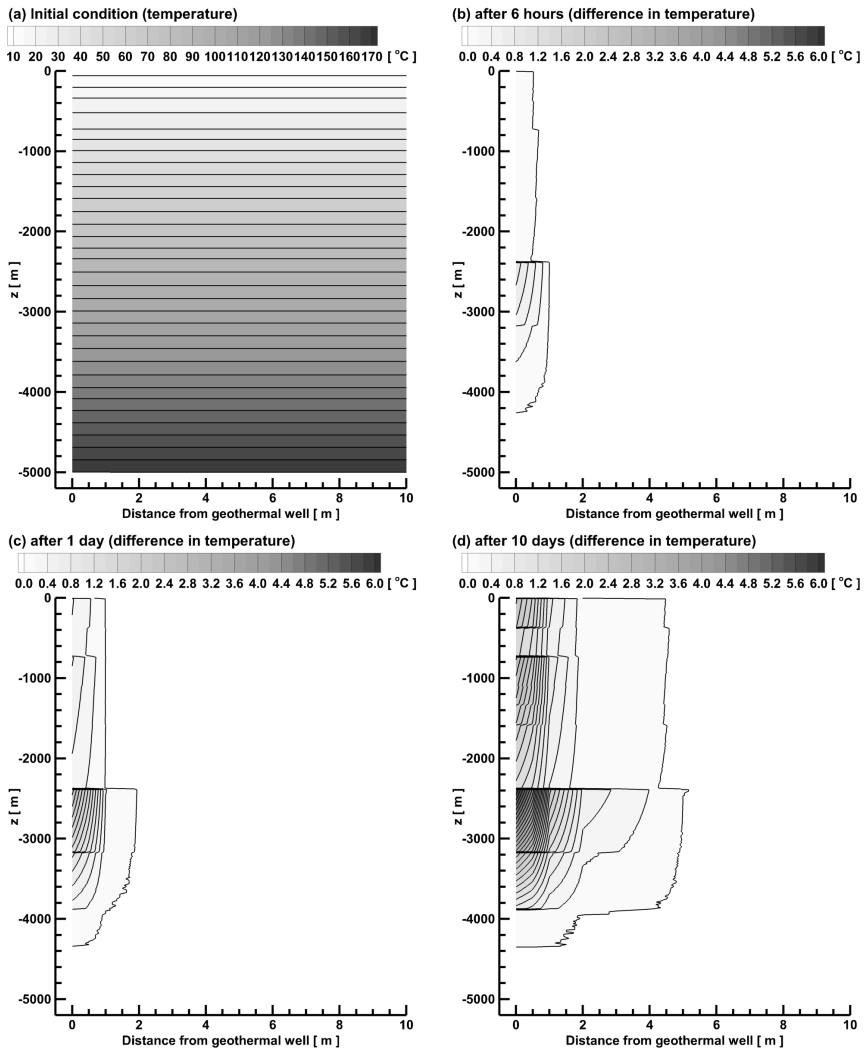


Fig. 4. Spatial distribution of (a) temperature at the initial state, and difference in temperature from the initial value after (b) 6 hours, (c) 1 day, and (d) after 10 days in the geologic formation.



주변 지층의 온도가 증가하고 해당 영역이 수평으로 확장하면서 수평 방향의 온도 경사가 점차적으로 완화되어 전도에 의한 열교환 속도가 급격하게 감소하기 때문이다. 전반적으로 지층 내의 온도는 전도에 의한 열교환으로 수직적으로는 지열정과 만나는 모든 영역에서 변화한다. 반면 그 변화가 압력에 비해 상대적으로 더 느리고 수평 방향으로 훨씬 더 좁은 지역까지만 확장된다.

지열 생산정 내부에서 압력과 온도의 수직적 분포 변화는 그림 5에 도시되어 있다. 압력의 경우 지열수 생산 시작 후 비교적 빠른 시간 내에 전 영역에서 급격한 변화를 보이며, 약 1분 후까지 최대로 감소하였다가 점차적으로 소폭 회복되어 10일 이후에는 거의 정상 상태에 도달하게 된다(그림 5a). 압력의 회복은 지열수의 생산이 진행되면서 주변 지층과의 열교환이 지속적으로 이루어지고 생산정 내부가 비교적 높은 온도의 지하수로 채워지게 되면서 감소된 밀도에 의해 발생하는 것으로 판단된다. 압력의 수직적 분포에서 구간에 따라서 그 기울기가 달라지는 현상이 나타나는데 이것은 지열수가 통과하는 영역의 직경 변화로 단면적과 유효고유투수계수가 동시에 변화하기 때문이다. 지상의 발전 시설에 필요한 압력을 제공하기 위하여 1,100 m 부근에서 전기수중펌프의 작동에 의한 압력의 급격한 증가가 발생하며, 해당 압력의 증가가 앞에서 설명한 수치 모델링 기법의 적용으로 정상적으로 계산됨을 확인 할 수 있다.

온도의 경우 스크린 구간의 상대적으로 뜨거운 지하수(스크린 구간 내에서 약 141°C ~ 149°C)가 시간이 지남에 따라서 상부로 이동하면서 전체적으로 증가한다(그림 5b). 초기에는 주변 지층과의 온도차가 커서 전도에 의한 열손실로 상부에서 빠르게 온도가 상승하지 못하나 주변의 지층과의 열교환이 진행되면서 전도에 의한 열손실은 점차적으로 감소함에 따라서 지열정 내의 온도가 점차적으로 상승한다. 10분 후의 수직적 온도 분포가 직선이 되지 않고 중간에 변곡점이 나타나게 되는데 이것은 주변 지층의 열적 특성(열전도도)의 차이에 따른 열손실량의 차이 때문이다(그림 5b). 생산정 내 온도의 상승은 점차적으로 느려지며, 1일 이후에는 10일 이후와 거의 다르지 않은 수직적 분포를 보여준다. 10일 이후에는 지층 내에서 수평 방향의 온도 경사가 거의 완화되어 주변 지층으로의 열손실 속도가 매우 작아지게 되며, 특징적으로 스크린구간 최상부의 온도가 140.9°C인 반면 생산정 내에서의 온도는 상부로 갈수록 소폭 상승하여 지상부에서 최종적으로 145.7°C에 도달한다. 주변 지층과의 열교환에 의한 열손실이 비록 작은 값이지만 지속적으로 이루어지고 있음에도 온도가 상부로 갈수록 소폭 증가하는 현상은 물의 열역학적 특성으로 설명될 수 있다.

물의 압력-온도 조건에 따른 등엔탈피(iso-enthalpy) 곡선(International Formulation Committee, 1967) 과 생산정 내에서의 압력-온도의 변화 양상이 그림 6

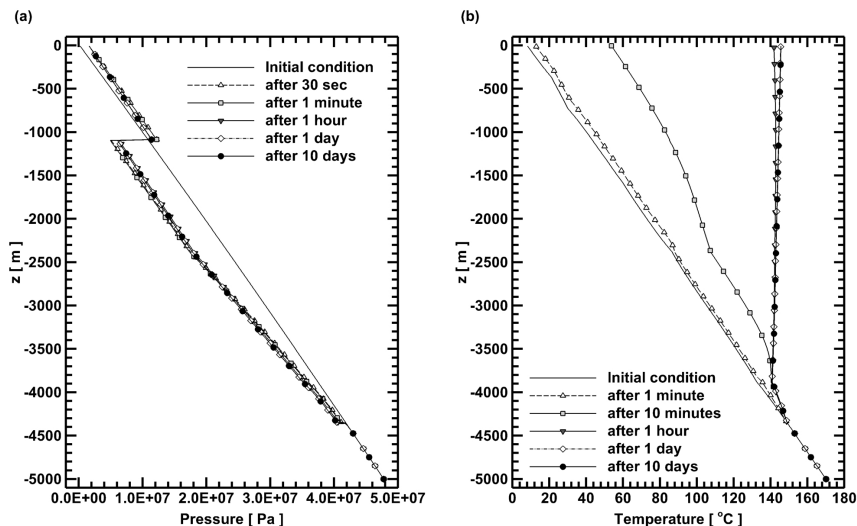


Fig. 5. Vertical profiles of (a) pressure and (b) temperature of the geothermal fluid in the production well.

에 도시되어 있다. 생산정 내에서 압력-온도의 변화가 등엔탈피 곡선에 평행하게 진행된다면 열교환에 의한 열손실/이득이 없는 상태의 의미한다. 압력-온도 변화가 등엔탈피값이 더 낮은 곡선으로 이동하면 열손실, 더 높은 곡선으로 이동하면 열이득 현상이 일어난다. 지열수 생산 시작 후 10분 경과한 경우나 30분 경과한 경우 압력-온도의 변화 곡선이 등엔탈피 곡선을 가로질러서 급격하게 낮은 쪽으로 향하게 되는데 이 상태는 주변 지층으로의 열교환에 의한 열손실이 크게 발생함을 의미한다. 반면에 최종적으로 10일이 지나면 압력-온도의 변화 양상은 등엔탈피 곡선과 비교하여 거의 평행하지만 소폭 더 낮은 방향으로 이동하게 되는데 이것은 주변 지층으로의 열교환에 의한 열손실이 있으나 그 양이 매우 작음을 의미한다. 이 상태에서는 압력이 감소함에 따라서 온도는 소폭 상승하는 양상을 보여주고 있으며, 앞에서 언급한 온도 상승의 원인이 이에 기인한다.

**3.2 지열수 생산 유량 유지를 위한 지열 저류층의 고유투수계수 산정**

인공저류층 지열 시스템에서는 지열 저류층의 생산성을 확보하기 위하여 수리 자극 등의 방법으로 지층의 고유투수계수의 증가를 시도하게 된다. 이때 효율적인 계획 수립 및 설계를 위해서는 충분한 지열수 생산이 가능한 고유투수계수를 사전에 설계하는 과정이 필요하다. 기존의 방법에서는 이러한 설

계 과정에서 일반적으로 석유 생산 등의 분야에서 활용되는 생산성지수와 주입정 내에서의 압력 강하 (well loss)를 모두 활용하여 생산 지하수량에 대한 압력의 강하량을 산정하게 된다(Zimmermann *et al.*, 2010). 이 과정에서 물의 밀도 등의 물성이 하나의 상수로 가정하게 되는데 앞 절에서 설명된 바와 같이 실제 지열 생산정 내에서의 압력과 온도는 큰 범위 내에서 변화하게 되고 따라서 기존의 방법을 사용 시에 부정확한 결과를 초래할 수 있다.

본 연구에서 제시된 수치 모델링 기법을 활용하게 되면 지상의 지열수 유입구에서 압력과 생산 유량에 대응하는 생산정 내에서의 지하수 압력과 온도의 분포를 예측할 수 있다. 따라서 주어진 조건하에서 지열 저류층의 고유투수계수를 변화시키면서 반복적인 수치 모델링을 수행하면 해당 지열수 생산 조건을 만족할 수 있는 최소한의 고유투수계수를 정밀하게 산정할 수 있다. 또한 일반적인 지하수 부존량 등을 계산할 때와는 다르게 전기수증점프에서 압력의 경계값을 대기압이 아니라 해당 온도에서의 포화수증기압(saturated vapor pressure)으로 설정하여야 한다. 이는 지하수의 압력이 해당 온도에서의 포화수증기압 이하가 되면 지하수가 기체상으로 변화하여 전기수증점프가 정상적으로 작동할 수 없기 때문이다. 스크린 구간과 접하는 지열 저류층의 평균 고유투수계수를 변화시키면서 시행착오(trial-and-error) 수치 모델링을 수행하였고 그 결과가 그림 7에

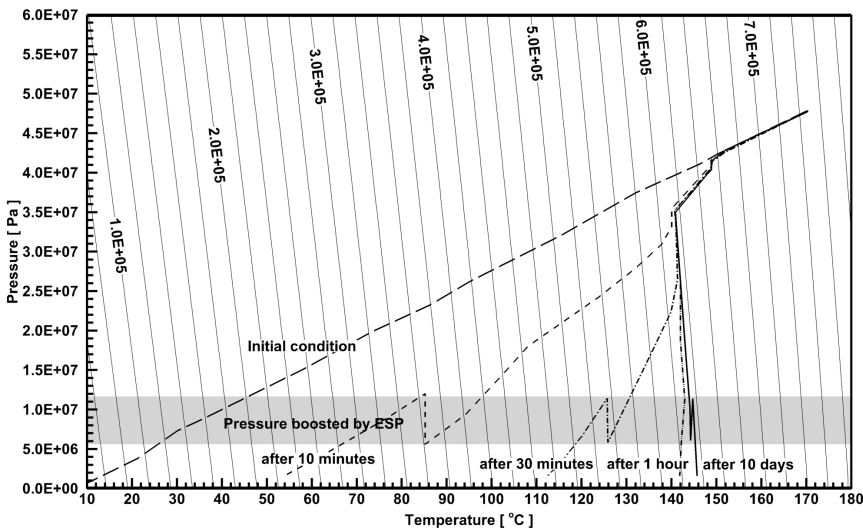


Fig. 6. Pressure and temperature transitions in the production well with the iso-enthalpy curves of water.

도시되어 있다. 현재 주어진 지열수 생산 조건에서 전기수증펌프에 유입되는 지하수 온도는 평균 145.4 °C이며, 이때의 포화수증기압은  $4.172 \times 10^5$  Pa이다 (International Formulation Committee, 1967). 해당 압력보다 높은 압력을 유지하는 최소한의 조건은 지열 저류층의 평균 고유투수계수가  $2.26 \times 10^{-15}$  m<sup>2</sup> 일 때로 분석되었다. 다만 본 연구에서 시도된 수치 모델링 기법과 방법을 적용하여 인공저류층 지열 시스템의 목표 고유투수계수를 산정할 때에는 그림 7에 나타난 바와 같이 해당 구간에서 평균 고유투수계수 변화에 압력의 변화가 매우 민감하게 반응하므로 주의를 기울여야 한다.

#### 4. 토 의

심부 지층 내의 지하수 유동을 수치 모델을 통하여 해석할 때에 초기조건으로 정수압 가정을 많이 활용하게 된다. 또한 초기 상태의 지하수 압력은 현장 응력의 측정할 때에 공극-탄성 이론에 의한 안전성을 평가할 때 모두 중요한 요소로 작용한다(예, Blöcher *et al.*, 2018; Jacquy *et al.*, 2018; Korean Government Commission, 2019; Lim *et al.*, 2020; Farkas *et al.*, 2021; Wassing *et al.*, 2021; Yoo *et al.*, 2021). 정수압 가정 시에 지하수 밀도의 압력-온도에 의한 변화를 고려하지 않는 경우 심도가 깊어짐에 따라서 오차가 발생할 수 있다. 본 연구의 수치 모델링 결과 중 압력의 초기조건에서 -4,000 m의 압력은 38.58 MPa이고 -5,000 m의 압력은 47.77 MPa이다 (그림 3a). 이 경우에 지하수 밀도가 상수인 정수압

가정을 사용하면 -4,000 m의 압력은 39.24 MPa이고 -5,000 m의 압력은 49.05 MPa로 계산되어 수치 모델링 결과와 차이가 발생한다. 이것은 해당 지열 조건에서 지하수의 밀도가 1,000 kg/m<sup>3</sup> 보다 더 낮아지기 때문이며, 정수압 상태의 압력의 차이는 현장 응력 측정과 역학적 안정성 평가에 모두 영향을 줄 수 있다. 따라서 심부 지열과 관련된 해석을 수행할 때에는 물의 압력-온도 조건에 따른 물성 변화를 엄밀하게 고려해야 하고 특히 정수압 조건을 가정할 때에 압력-온도 변화에 따른 밀도의 변화를 반드시 고려해야 한다.

본 연구를 통하여 제시된 수치 모델링 기법은 지층 내 지하수 유동-열 이동 해석을 위한 수치 모델 설정을 그대로 활용하여 복잡한 지열 생산정의 구조와 생산을 위한 조건을 추가적으로 반영할 수 있다는 장점이 있다. 또한 주변 지층과 지열 생산정 사이의 열교환을 일차원의 열전도 방정식 등으로 가정하여 고려하는 것이 아니라 실제 삼차원의 지층에 연결하는 형태로 해석하는 것이 가능하며, 생산정 내부의 복잡한 구조를 합리적으로 고려할 수 있다. 그리고 전기수증펌프와 같이 특정한 구간에서 급격한 압력 변화를 유발하는 기기가 설치되어 있는 상황을 보다 현실적으로 구현할 수 있어서 지상의 발전 시설 등의 공정 설계와도 연계가 가능한 장점이 있다. 본 연구에서는 발전을 위한 운영 압력 등 좀 더 현실적인 요소들이 고려되었고 이를 충족하기 위한 심부 지열 저류층의 평균 고유투수계수, 즉 수리 자극의 목표값을 산출하였다. 또한 생산정 내에서 물의 열역학적인 특성이 반영되어 최종적인 지열수의 생산

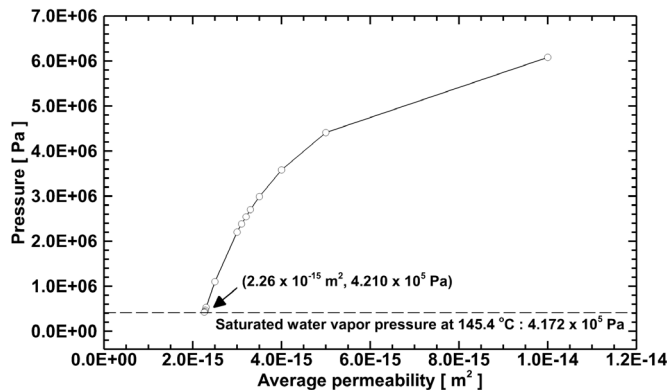


Fig. 7. Average intrinsic permeability of the target depth of the geologic formation with respect to the pressure at the inlet of the electrical submersible pump.

온도를 합리적으로 산정하였다. 이러한 내용들은 실제 인공저류층 지열 시스템의 설계와 운영 시에 매우 중요한 요소이나 서론에서 언급한 바와 같이 지층의 조건과 생산정 내부의 변화를 모두 고려한 연구가 전공 분야 간의 특성으로 많지 않은 상황이다. 따라서 본 연구에서 제시한 수치 모델링 기법과 분석 내용들이 유용하게 활용될 수 있다.

그러나 본 연구에서 제시된 수치 모델링 기법과 결과들은 다음과 같은 한계를 가지고 있다. 먼저 수치학적인 불안정성을 해소하기 위하여 생산정을 일차원으로 수직 연결된 격자로 구성하고 유체 유동이 Darcy의 법칙을 따른다고 가정하여 계산된 유효고유투수계수를 이용하였는데 이는 실제 CFD를 통한 연구들(Noorollahi *et al.*, 2015; Alimonti *et al.*, 2019; Renaud *et al.*, 2019)에 비하여 정확성이 떨어질 가능성이 있다. 특히 기반이 된 수치 모델(TOUGH2) 자체가 지층 내에서의 유체 유동을 목적으로 개발되어 상대적으로 빠른 유체 유동 및 이에 따른 열의 이송(advection)이 발생하면 수치학적인 불안정성이 크게 증가하는 경향이 있다. 또한 수치 모델링의 설정에 있어서 본 연구에서는 일차원 수직으로 구성된 생산정과 방사상 축대칭으로 격자 구성한 지층이 고려되었고 외부 경계의 압력이 고정되는 조건을 이용하였다. 이러한 설정은 실제 인공저류층 지열 시스템과 다른 부분이 존재한다. 예를 들어 실제 인공저류층 지열 시스템에서 생산정을 통해 제공된 지열수가 발전을 위해 활용된 후 주입정을 통해 다시 주입이 되며, 이들은 최하부에서 경사를 가지고 설치되어 있다.

서론에서 언급한 바와 같이 본 연구는 지층 내에서의 열-수리학적 현상과 생산정 내에서의 유체 유동 및 열이동 현상을 통합적으로 해석하기 위한 첫 단계로 앞으로 지속적인 연구와 노력이 필요하다. 특히 다음 연구에서는 생산정과 주입정이 같이 모사되어야 하며, 수리학적으로 생산과 주입에 영향을 줄 수 있는 측면 방향의 경계 범위가 보다 현실적으로 고려되어야 한다.

## 5. 결론

본 연구에서는 인공저류층 지열 시스템에서 지열수 생산 시에 지열 생산정 내부 및 지층에서 발생하는 복잡한 지하수 유동 및 열 이동의 상호 작용을 해

석하기 위한 수치 모델링 기법을 개발하였다. 지열 생산정과 이를 통한 지하수 유동 및 열 이동 현상을 수치 모델링 하는데 있어서 크게 두 가지 기술적인 난제가 존재하는데 이를 해결하기 위하여 기존에 널리 활용되던 열-수리학적 모델인 TOUGH2를 기반으로 source code 수준에서 수정/보완을 수행하였다. 그 결과 복잡한 지열 생산정의 사양 및 설정과 지층의 연계를 모두 고려하면서 지상의 지열수 유입구에서 압력과 생산 유량 조건이 주어진 경우 지열정 내부의 압력과 온도를 정확하게 예측할 수 있는 수치 모델링 기법을 제시하였다.

발전을 위한 지열수의 생산이 시작되면 지층에서는 스크린 구간을 중심으로 압력의 감소가 발생하고 지열정 주변에서 열교환에 의한 온도의 증가가 나타난다. 지층에서 압력의 변화는 온도의 변화에 비해서 더 빠르게 발생하며, 수평적으로 더 먼 지역까지 변화가 발생하였다. 반면에 온도의 경우 수평적으로 상대적으로 좁은 영역에서 변화가 발생하고 수직적으로 지열정과 연결된 모든 영역에서 온도의 증가가 나타나며, 변화가 압력에 비해서 상대적으로 느리게 나타났다. 생산정 내에서의 변화도 지층에서와 마찬가지로 압력의 경우 비교적 빠른 시간 내에 변화가 생기고 최종적인 상태에 도달하였으며, 온도의 경우 그보다는 상대적으로 더 느리게 정상상태에 도달한다. 압력의 수직적 분포는 생산정 내의 직경과 이와 연계된 유효고유투수계수의 영향을 받는 반면에 온도의 수직적 분포는 초기에는 주변 지층의 열전도도에 영향을 받으며, 시간이 지난수록 이러한 주변 지층에 의한 열교환의 효과는 감소한다.

지열수의 생산이 지속됨에 따라서 생산정과 주변 지층의 수평적인 지온 경사가 점차적으로 완화되고 열교환에 의한 생산정의 열손실이 점차적으로 줄어든다. 그러나 열손실이 매우 작은 값이지만 지속적으로 일어나는 상황에서도 생산정 내에서의 온도는 스크린 구간 최하부의 온도인 140.9°C에서 지상부의 온도인 145.7°C로 상부로 갈수록 소폭 상승한다. 이것은 물의 열역학적 특성에 기인하는 것으로 압력-온도 조건에 따른 등엔탈피 곡선을 통해 설명할 수 있다. 즉 해당 압력 및 온도 범위 내에서는 주변 지층으로의 열손실이 매우 작은 경우에 엔탈피의 지속적인 감소가 나타나더라도 압력 감소에 의한 온도의 증가가 더 크기 때문에 상부로 지열수가 이동하면서

온도가 소폭 상승하게 된다.

본 연구에서 제시된 수치 모델링 기법을 활용하게 되면 지상의 지열수 유입구에서 압력과 생산 유량에 대응하는 생산정 내에서의 지하수 압력과 온도의 분포를 예측할 수 있다. 또한 지열수 생산에서 전기수증펌프가 정상적으로 작동하는 경계 압력은 대기압이 아니라 해당 지열수의 온도를 고려한 포화수 증기압이 되어야 한다. 따라서 주어진 조건하에서 지열 저류층의 고유투수계수를 변화시키면서 반복적인 수치 모델링을 수행하면 해당 지열수 생산 조건을 만족할 수 있는 최소한의 고유투수계수를 정밀하게 산정할 수 있다.

이러한 연구 결과들은 향후 인공저류층 지열 시스템 프로젝트 수행 시 지열 생산정 및 지층 내에서 발생하는 복합한 열-수리학적 현상을 정량적으로 이해하며, 비용 효율적이고 안정적인 설계/운영안을 수립하는데 직접적으로 적용될 수 있다. 또한 최근 이슈가 되고 있는 지중 유체 주입 및 생산에 의한 지진 유발 가능성을 정밀하게 예측 및 해석하는 데에도 유용한 기법으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 교육부가 지원하고 충북대학교가 수행하는 지역선도대학육성사업의 지원을 받아서 수행되었습니다. 아울러 본 논문의 심사 과정에서 발전적인 조언과 비판을 해주신 편집위원과 두 심사위원 들께 깊은 감사를 드립니다.

## REFERENCES

- Alimonti, C., Conti, P. and Soldo, E., 2019, A comprehensive exergy evaluation of a deep borehole heat exchanger coupled with a ORC plant: the case study of Campi Flegrei. *Energy*, 189, 116110.
- Asai, P., Panja, P., McLennan, J. and Moore, J., 2019, Efficient workflow for simulation of multifractured enhanced geothermal systems (EGS). *Renewable Energy*, 131, 763-777.
- Blöcher, G., Cacase, M., Jacquey, A.B., Zang, A., Heldbach, O., Hofmann, H., Kluge, C. and Zimmermann, G., 2018, Evaluating micro-Seismic events triggered by reservoir operations at the geothermal site of Groß Schönebeck (Germany). *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 3265-3279.
- Blöcher, G., Reinsch, T., Hennings, J., Milsch, H., Regenspurg, S., Kummerow, J., Francke, H., Kranz, S., Saadat, A., Zimmermann, G. and Huenges, E., 2015, Hydraulic history and current state of the deep geothermal reservoir Groß Schönebeck. *Geothermics*, 63, 27-43.
- Blöcher, G., Zimmermann, G., Moeck, I., Brandt, W., Hassanzadegan, A. and Magri, F., 2010, 3D numerical modeling of hydrothermal processes during the lifetime of a deep geothermal reservoir. *Geofluids*, 10, 406-421.
- Cheng, Q., Wang, X. and Ghassemi, A., 2019, Numerical simulation of reservoir stimulation with reference to the Newberry EGS. *Geothermics*, 77, 327-343.
- Domenico, P.A. and Schwartz, F.W., 1990, *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley and Sons, New York, 824 p.
- Farkas, M.P., Hofmann, H., Zimmermann, G., Zang, A., Bethmann, F., Meier, P., Cottrell, M. and Josephson, N., 2021, Hydromechanical analysis of the second hydraulic stimulation in well PX-1 at the Pohang fractured geothermal reservoir, South Korea. *Geothermics*, 89, 101990.
- Fetter, C.W., 1994, *Applied Hydrogeology*, Third edition. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 691 p.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A., 1979, *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 604 p.
- Glassley, W.E., 2015, *Geothermal Energy*, Second edition. CRC Press, NW, USA, 380 p.
- Huang, W., Cao, W. and Jiang, F., 2017, Heat extraction performance of EGS with heterogeneous reservoir: A numerical evaluation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 645-657.
- Huenges, E. (ed.), 2010, *Geothermal Energy Systems: Exploration, Development, and Utilization*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 463 p.
- International Formulation Committee, 1967, *A Formulation of the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance*. IFC Secretariat, Düsseldorf, Germany.
- Jacquey, A.B., Cacase, M., Blöcher, G., Watanabe, N., Huenges, E. and Scheck-Wenderoth, M., 2016, Thermo-poroelastic numerical modelling for enhanced geothermal system performance: Case study of the Groß Schönebeck reservoir. *Tectonophysics*, 684, 119-130.
- Jacquey, A.B., Urpi, L., Cacase, M., Blöcher, G., Zimmermann, G. and Scheck-Wenderoth, M., 2018, Far field poroelastic response of geothermal reservoirs to hydraulic stimulation treatment: Theory and application at the Groß Schönebeck geothermal research facility. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 110, 316-327.
- Jiang, F., Chen, J., Huang, W. and Luo, L., 2014, A three-dimensional transient model for EGS subsurface thermo-hydraulic process. *Energy*, 72, 300-310.
- Kim, J., Joun, W.T., Lee, S., Kaown, D. and Lee, K.K., 2020, Hydrogeochemical evidence of earthquake-induced anomalies in response to the 2017  $M_w$  5.5 Pohang Earthquake in Korea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21, e2020GC009532.
- Korea Energy Agency, 2018, *New and Renewable Energy White Paper*. Report no 11-141000-001321-11, Korea

- Energy Agency, Ulsan, Korea, 824 p (in Korean).
- Korean Government Commission, 2019, Final report of the Korean Government Commission on relations between the 2017 Pohang Earthquake and EGS Project. The Geological Society of Korea, Seoul, Korea, 346 p (in Korean with English abstract and summary).
- Lim, H., Deng, K., Kim, Y.H., Ree, J.H., Song, T.R.A. and Kim, K.H., 2020, The 2017 Mw 5.5 Pohang Earthquake, South Korea, and poroelastic stress changes associated with fluid injection. *Journal of Geophysical Research-Soild Earth*, 125, e2019JB019134.
- Lindeburg, M.R., 2013, Mechanical Engineering Reference Manual for the PE Exam, 13th edition. Professional Publications Inc., Belmont, USA, 1488 p.
- Ministry of Economy and Finance of Korea, 2020a, Strategy for carbon neutral in 2050. Policy report, Ministry of Economy and Finance of Korea, Sejong, Korea, 24 p (in Korean).
- Ministry of Economy and Finance of Korea, 2020b, Korean new deal: national strategy for a great transformation. Ministry of Economy and Finance of Korea, Sejong, Korea, 61 p.
- Moeck, I., Holl, H.G. and Schandelmeier, H., 2005, 3D lithofacies model building of the Rotliegend Sediments of the NE German Basin. In: AAPG International Conference and Exhibition, Paris, France, September 11-14.
- Munson, B.R., Young, D.F. and Okiishi, T.H., 1998, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, Third edition. Wiley, New York, USA, 877 p.
- Narasimhan, T.N. and Witherspoon, P.A., 1976, An integrated finite difference method for analyzing fluid flow in porous media. *Water Resources Research*, 12, 57-64.
- Noorollahi, Y., Pourarshad, M., Jalilinasabady, S. and Yousefi, H., 2015, Numerical simulation of power production from abandoned oil wells in Ahwaz oil field in southern Iran. *Geothermics*, 55, 16-23.
- Ollinger, D., Baujard, C., Kohl, T. and Moeck, I., 2010, Distribution of thermal conductivities in the Groß Schönebeck (Germany) test site based on 3D inversion of deep borehole data. *Geothermics*, 39, 46-58.
- Olson, R.M. and Wright, S.J., 1990, *Essentials of Engineering Fluid Mechanics*, Fifth edition. Harper and Row Publishers, New York, USA, 638 p.
- Palgunadi, K.H., Gabriel, A.A., Ulrich, T., López-Comino, J.Á. and Mai, P.M., 2020, Dynamic fault interaction during a fluid-injection-induced earthquake: the 2017 Mw 5.5 Pohang event. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110, 2328-2349.
- Park, S., Hwang, G., Moon, J. and Kihm, J.H., 2016, Development of numerical modeling technique for predicting groundwater flow and heat transport in standing column well. *The Journal of Engineering Geology*, 26, 461-471 (in Korean with English abstract).
- Park, S., Xie, L., Kim, K.I., Kwon, S., Min, K.B., Choi, J., Yoon, W.S. and Song, Y., 2017, First hydraulic stimulation in fractured geothermal reservoir in Pohang PX-2 well. *Procedia Engineering*, 191, 829-837.
- 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, 198 p.
- Reinicke, A., Zimmermann, G., Huenges, E. and Burkhardt, H., 2005, Estimation of hydraulic parameters after stimulation experiments in the geothermal reservoir Groß Schönebeck 3/90 (North German Basin). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42, 1082-1087.
- Renaud, T., Verdin, P. and Falcone, G., 2019, Numerical simulation of a Deep Borehole Heat Exchanger in the Krafla geothermal system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 143, 118496.
- Sun, Z., Zhang, X., Xu, Y., Yao, J., Wang, H., Lv, S., Sun, Z., Huang, Y., Cai, M. and Huang, X., 2017, Numerical simulation of the heat extraction in EGS with thermal-hydraulic-mechanical coupling method based on discrete fractures model. *Energy*, 120, 20-33.
- Sutera, S.P. and Skalak, R., 1993, The history of Poiseuille's law. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 25, 1-19.
- Tester, J.W., Anderson, B.J., Batchelor, A.S., Blackwell, D.D., Pippo, R.D., Drake, E.M., Garnish, J., Livesay, B., Moore, M.C., Nichols, K., Petty, S., Toksöz, M.N. and Veatch, R.W.Jr., 2006, The future of geothermal energy: Impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century. Report no. INL/EXT-06-11746, Idaho National Laboratory, Idaho Falls, USA, 372 p.
- Wassing, B.B.T., Gan, Q., Candela, T. and Fokker, P.A., 2021, Effects of fault transmissivity on the potential of fault reactivation and induced seismicity: Implications for understanding induced seismicity at Pohang EGS. *Geothermics*, 91, 101976.
- Yao, J., Zhang, X., Sun, Z., Huang, Z., Liu, J., Li, Y., Xin, Y., Yan, X. and Liu, W., 2018, Numerical simulation of the heat extraction in 3D-EGS with thermal-hydraulic-mechanical coupling method based on discrete fractures model. *Geothermics*, 74, 19-34.
- Yoo, H., Park, S., Xie, L., Kim, K.I., Min, K.B., Rutqvist, J. and Rinaldi, A.P., 2021, Hydro-mechanical modeling of the first and second hydraulic stimulations in a fractured geothermal reservoir in Pohang, South Korea. *Geothermics*, 89, 101982.
- Zimmermann, G., Moeck, I. and Blöcher, G., 2010, Cyclic waterfrac stimulation to develop an Enhanced Geothermal System (EGS)-Conceptual design and experimental results. *Geothermics*, 39, 59-69.
- Zimmermann, G. and Reinicke, A., 2010, Hydraulic stimulation of a deep sandstone reservoir to develop an Enhanced Geothermal System: Laboratory and field experiments. *Geothermics*, 39, 70-77.

---

Received : April 4, 2021

Revised : April 23, 2021

Accepted : April 26, 2021