연구논문

인공저류층 지열시스템 운영 중 지열수 플러싱 공정의 지화학적 영향

이준범^{1,2} · 정은혜^{3,4*}¹서울대학교 에너지시스템공학부 석박사통합과정, ²서울대학교 에너지자원신기술연구소 연구원, ³서울대학교 에너지시스템공학부 부교수, ⁴서울대학교 에너지자원신기술연구소 겸임연구원

Geochemical Effect of Geothermal Water Flushing during Enhanced Geothermal Systems Operation

Junbeum Lee^{1,2} and Eunhyea Chung^{3,4*}¹Integrated PhD Program, Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea²Researcher, Research Institute of Energy and Resources, Seoul National University, Seoul, Korea³Associate Professor, Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea⁴Adjunct Researcher, Research Institute of Energy and Resources, Seoul National University, Seoul, Korea***Corresponding Author.** Eunhyea Chung, echung@snu.ac.kr, Department of Energy Systems Engineering and Research Institute of Energy and Resources, Seoul National University, Seoul, Korea

Received

27 May 2021

Final version Received

22 June 2021

Accepted

25 June 2021

Abstract

Scale production occurs during enhanced geothermal system (EGS) processes due to various conditions. The production of scales in pipes or fractured reservoir narrows the diameter of the injection and production well, decreasing permeability and reducing EGS efficiency. However, geothermal water flushing during EGS processes can be implemented to recover the permeability. In this study, an experimental instrument to simulate a geothermal system was applied to observe the chemical composition change of core and water samples. To simulate the EGS, an experiment was conducted by injecting the geothermal fluid in several cycles to the fractured core. Results showed that Si ions decreased in the geothermal fluid and permeability decreased due to precipitation. Thereafter, flushing was applied, and dissolution occurred inside the fracture, increasing the permeability.

Key words : Enhanced Geothermal Systems (EGS), Geochemical reaction, Scale, Permeability, Flushing

요약

인공저류층 지열시스템(EGS) 운영 중 생길 수 있는 대표적인 문제점은 스케일의 생성인데 여러 주변 환경 조건으로부터 영향을 받는다. 파이프 또는 저류층 내에서 생기는 스케일 물질로 인하여 주 입정과 생산정의 직경이 좁아지거나 저류층의 투수성이 줄어들어 EGS의 효율성을 낮추게 된다. 낮아진 효율을 회복하기 위한 방법 중의 하나로 EGS 운영 중 지열수 플러싱이 적용될 수 있다. 본 연구에서는 EGS 모사 실험장치를 이용하여 수리자극 중 EGS 저류층 내 암석의 광물 조성 변화와 순환수의 화학조성 변화를 관찰하였다. EGS를 모사하기 위하여 지열수를 여러 번 순환하여 균열된 코어에 투과시키는 실험이 진행되었다. 실험결과에 의하면 지열수 내의 Si 이온이 감소하고 균열 내 형성되는 침전으로 투수율이 감소하였다. 이를 해결하기 위하여 더 높은 압력으로 지표수를 사용하여 플러싱을 실험적으로 적용시킬 때 침전된 광물이 용해되는 결과를 확인하였다.

주요어 : 인공저류층 지열시스템, 지화학반응, 스케일, 투수성, 플러싱

서 론

지열 에너지는 땅 내부에 있는 토양, 지하수, 및 지표수의 열을 여러 가지 형태의 에너지원으로 이용하는 재생 에너지로 기후와 계절에 영향을 받지 않아서 안정적으로 사용이 가능하다(Park *et al.*, 2013). 지열 에너지를 크게 두가지 방법으로 활용할 수 있는데, 고온의 지열수(150°C 이상)의 지열을 간접적으로 이용하는 방법과 상대적으로 낮은 온도의 지열수(150°C 이하)를 지역난방 또는 온천과 같이 직접적으로 이용하는 방법으로 나눌 수 있다(Luo *et al.*, 2017; Park *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2008; Yilmaz, 2017). 고온의 지열을 간접적으로 이용하는 인공저류층 지열시스템(Enhanced Geothermal System, EGS)은 지열에너지를 전기 에너지로 변환시키는 지열발전 시스템 중 하나이다(Olasolo *et al.*, 2016). EGS는 투수성이 낮은 기반암에서 열을 생산해 낼 수 있도록 수압파쇄 또는 수리자극을 이용해 암반 내에 균열을 만들어 생성한 인공저류층을 이용하며(Gallup, 2009), 온도가 낮은 물이 인공저류층 내에서 지열에너지에 의해 가열된 후 양수 되어 전기발전에 이용된다. 지상으로 양수된 가열된 물은 열 교환기를 거쳐서 증기터빈을 이용하여 전기를 생산한다(Jiang *et al.*, 2016; Lee and Chung, 2020). 대표적으로 낮은 투수성을 가진 기반암은 화강암으로(Chandrasekharam *et al.*, 2015), 프랑스 술츠-수-포레(Soultz-sous-Forêts), 영국 로즈마노웨즈(Rosemanowes), 호주 쿠퍼 분지(Cooper Basin) 등이 화강암 지대에서 개발된 EGS의 대표적인 예이다. EGS는 주로 화강암 같이 상대적으로 투수성이 낮은 비화산지대의 Hot Dry Rock(HDR)에서 주로 건설되지만, 화산지대에서 이용되는 사례도 존재한다. 화산지대에서 주로 발견되는 현무암은 높은 공극률을 가지고 있는 특징을 가지고 있지만(Carlson *et al.*, 2018; Nouraliee, 2000), 생산정으로부터 나오는 지열수의 양이 적거나 양수 유량이 이 충분하지 못할 경우에는 수리자극 또는 플러싱을 이용하여 투수성을 증가시킬 필요성이 있다. 그 예로, 아이슬란드 크라플라(Krafla) 또는 미국의 뉴베리(Newberry) EGS는 투수성이 충분히 높지 않은 암반 지역에서 수리자극을 이용해 인공 균열을 만들어서 지열에너지를 이용하고 있으며(Scherff, 2016; Cladouhos *et al.*, 2016). 프랑스 술츠-수-포레 지열발전소 GPK-4 지열공 및 독일 페를레베르크(Groß-Buchholz) 지열발전소 GT1 지열공에 플러싱 기법을 이용하여 침전물을 제거하여 투수성을 높이려고 노력한 바 있다(Portier and Vuataz, 2010; Nitschke, 2017).

상대적으로 낮은 온도의 지열수를 직접 이용하는 방법은 지역 난방, 온천 등이 대표적인 기술이며 지열수를 열펌프와 냉동기와 같은 에너지 변환기기의 열원으로 활용한다.

간접적으로 지열에너지를 이용하는 지열 냉난방은 교환기의 종류에 따라 밀폐형(close loop system)과 개방형(open loop system)으로 구분된다(Bae *et al.*, 2017; Park *et al.*, 2013). 개방형 지열 냉난방은 지하수를 열교환 유체로 직접 사용하는 방법으로 에너지 이용 효율이 높지만 지하수의 순환에 따라 수질 변화 및 오염될 가능성이 존재한다(Bae *et al.*, 2017). 밀폐형 지열 냉난방은 개방형과는 반대로 지하수를 직접 사용하지 않기 때문에 수질이 오염될 가능성이 낮으나 지하에 대규모의 시설을 설치해야 한다(Park *et al.*, 2015). 지열 냉난방 시스템 사용은 미국, 프랑스, 독일, 스위스, 중국 등 많은 나라에서 시행되고 있으며 국내에서는 열펌프를 이용한 냉난방 시스템을 주로 사용하고 있다(Park *et al.*, 2015; Park *et al.*, 2013).

EGS와 같은 저류층 환경에서 플러싱은 투수성을 높이기 위하여 침전물질이나 미립자를 제거하는데 효율적이다(Mahbaz *et al.*, 2021; Candela *et al.*, 2014). 특히 투수성 회복은 빠른 유속의 플러싱에 의해 영향을 많이 받는 것으로 보고된다(Candela *et al.*, 2014). EGS는 여러가지 물리, 화학적 조건하에서 (예: 주입수 이온농도, 저류층 온도, 기반암의 종류, 저류층 체류시간 등) 가동되는데 시스템에 따라 다양한 환경 조건으로 인해 여러가지 지화학 반응이 일어날 수 있다. EGS 운영 중, 지화학 반응에 의하여 파이프, 열교환기 등 지상구조물 또는 지하의 인공저류층에 침전물(스케일)이 생기게 되면 유량이 감소하여 EGS 효율을 낮추는 결과를 가져올 수 있고(Caulk *et al.*, 2016) 이에 따라서 플러싱으로 침전물 생성을 억제 또는 생성된 침전물을 제거하여 투수율을 회복하고자 하는 것이다.

EGS에서의 스케일 생성 및 제어에 관한 연구들은 이전부터 진행되고 있으나 주로 지상 구조물인 파이프나 열교환기에서 생성되는 스케일에 대해서 연구되고 있었던(Yasuhara *et al.*, 2011; Gunnlaugsson *et al.*, 2014) 반면, 지하 인공저류층에서의 스케일 형성 및 그에 따른 투수율 저하, 그리고 스케일 제거에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 EGS 인공저류층의 투수성이 감소하는 요인에 대해서 분석하고 그 해결방법으로 플러싱을 사용하였을 때 일어나는 지화학 반응에 대해 연구하였다.

본 연구에서는 인공저류층 지열시스템이 운영되고 있는 지역 중 하나인 아이슬란드에 위치한 네스야벨리르(Nesjavellir) 지열발전소를 대상으로 연구를 수행하였다. 화산지대인 아이슬란드의 여러 지열발전소들은 발전과 지역난방에 온수 이용을 동시에 하는 열병합발전(Combined Heat and Power Plant, CHP) 방식을 주로 사용하고 있으며 약 90%의 증기가 전기생산 또는 난방시스템으로 사용되고 있다(Sahar *et al.*, 2010). 그 중, 네스야벨리르 지열발전소는 현재 레이카비크(Reykjavik) 지역에 활발하게 전기와 온수를

공급하는 지열발전소로서 수십 년 동안 가동되어 왔다 (Sahar *et al.*, 2010; Mutonga, 2007). 여러 연구자에 의해 지열수의 물리화학적 성분변화 및 스케일 물질 침전에 관해 보고된 프랑스의 술츠-수포레 지열발전소에 비해, 네스야벨리르 지열발전소는 지열수의 조성변화에 대한 연구가 비교적 부족하였다. 그뿐만 아니라, 술츠-수포레 발전소를 포함한 많은 EGS 발전소가 화강암 내 조성된 인공저류층을 이용하는 것과 달리, 네스야벨리르 지열발전소 지역은 기반암이 현무암으로 화강암과는 다른 광물-지열수 간 화학반응이 일어날 것으로 예상됨에 따라 연구대상 지역으로 선정하였다.

연구방법

암석 및 물 시료 준비

본 연구에서 대표적 현무암 지대로 선정한 네스야벨리르 지역의 기반암은 현무암(basalt)과 응회암(tuff)으로 구성되어 있다(Nouraliee, 2000). 직접 시료 채취 및 조달이 어려운 아이슬란드의 암석 시료를 대체하기 위하여 국내연천에 위치한 한탄강 지질공원에서 현무암을 채취하였다. 채취한 암석을 원기둥 모양으로 코어링 한 후, 저류층의 암석 내 한 균열을 모사하기 위해 물이 흐르는 방향을 따라 인위적으로 균열을 내어 실험에 사용하였다(Fig. 1). 채취한 암석 시료를 X-Ray Fluorescence (XRF, S8 Tiger, Bruker, Germany)로 분석하였으며(Table 1), TAS diagram 상에서 실험에 사용한 암석과 네스야벨리르 지역 암석이 비슷한

Fig. 1. Fractured basalt core (left) and core inserted in the sleeve (right).

Table 1. Composition (wt.%) of core by XRF

Component	Weight percent (wt.%)
SiO ₂	51.6
Al ₂ O ₃	15.9
K ₂ O	3.2
Fe ₂ O ₃	10.3
CaO	9.5
Na ₂ O	2.0
MgO	4.7
TiO ₂	1.3

구간에 도시됨을 확인하였다(Fig. 2).

네스야벨리르 발전소의 인공저류층 시스템을 모사하기 위해, 문헌을 참고하여 해당 발전소 지열수의 물리·화학적

Fig. 2. Classification of the samples on the TAS diagram (red circular symbols: rocks from Nesjavellir (Graettinger *et al.*, 2019) / yellow square symbol: rock in this study).

성을 참고하여 지열수를 합성하였다(Mutonga, 2007). 또한, EGS 운영 중 낮아진 투수성을 회복하기 위하여 시행되는 플러싱에 사용할 수 있는 네스야벨리르 지열발전소 부근 마르칼탕기(Markartangi) 호수의 수질 조성을 참고하여 플러싱 용액을 제조하였다(Zarandi and Ivarsson, 2010). Table 2는 아이슬란드 네스야벨리르 발전소의 운영 중 측정된 지열수 및 마르칼탕기 호수의 화학조성과 함께, 실험에서 사용할 합성된 지열수 및 플러싱 용액의 조성을 나타낸다.

실험 및 분석 방법

EGS 인공저류층 내 광물-수용액 간 화학반응을 관찰하기 위하여 Fig. 3와 같이 인공저류층을 모사하는 실험장치

를 제작하였다. Core permeameter(RCHR-1.5, Core Lab L.P., USA)를 이용하였는데, 코어는 최고 300°C 까지 가열될 수 있고 유압식 수동 펌프로 봉압(Confining Pressure; 장치 내 최고 10,000 psi 가능)을 높여줄 수 있다. 균열이 있는 암석시료는 바이톤 슬리브(Viton Sleeve)로 감싸며 Core permeameter 내 코어 홀더(Core Holder)를 이용하여 고정되었고 수용액이 코어 균열 사이로 통과하도록 하였다.

인공저류층 내 지열수 순환 실험에서 지열수는 시린지 펌프(Syringe Pump, Teledyne ISCO 1000D, Lincoln, NE/USA)를 통하여 일정한 유속 또는 압력으로 흐르며 코어를 통과한 후 다시 순환하여 시린지 펌프로 들어갈 수 있게 설계하였다. 실험 전 시린지 펌프에 수용액을 일정량 채운 후, 역압력 조절기(Back Pressure Regulator)를 이용하여 암석

Table 2. Properties of Nesjavellir geothermal water and Markartangi lake water

	Geothermal Fluid (Mutonga, 2007)	Synthesized Geothermal Fluid	Markartangi Lake Water (Zarandi and Ivarsson, 2010)	Synthesized Flushing Fluid
pH	7.1-9.4	7.2	7.6	7.0
Ca ²⁺ (mg/L)	0.09-0.81	0.0	4.9	7.9
Na ⁺ (mg/L)	119-173	116	9.2	9.7
Mg ²⁺ (mg/L)	0.01-0.09	0.14	1.8	6.2
SiO ₂ (mg/L)	695-1069	996	13.3	12.3
K ⁺ (mg/L)	25-35	17	0.8	2.7

Fig. 3. Schematic of experimental setup.

코어 양 끝의 압력차이를 일정하게 설정하여 수용액의 흐름을 유도하였다. 코어를 투과한 물을 다시 시린지 펌프에 채워 수 회 반복적인 암석 투과를 시험할 수 있었다.

지열수가 암석과 접촉하며 일어나는 광물-지열수 간 화학반응에 의하여 광물이 용해되거나, 새로운 광물이 침전되는데, 이를 관찰하기 위해 시간에 따른 수용액의 물리·화학적 특성변화 및 광물의 광물학적 변화를 측정하였다. 또한, 화학반응의 결과로 공극의 크기가 변하고 암석 투수율이 변화하게 되므로 균열의 투수성 및 균열간극을 측정하였다.

반복된 지열수의 순환으로 암석 코어 균열의 투수성이 감소하는 것을 확인한 후, 투수성 회복을 위해 시행하는 지열수 플러싱을 모사하는 실험을 수행하였다. 합성한 플러싱 용액을 높은 유속 및 압력으로 짧은 시간 동안 수 회 주입하였으며, 플러싱 실험 중에 수용액 및 암석 표면에 일어나는 물리적, 화학적, 그리고 광물학적 성질의 변화를 관찰하였다.

현무암을 기반암으로 하는 대표지역으로 선정한 아이슬란드 네스야벨리르 발전소의 인공저류층은 높은 온도 및 압력 조건에서 운영되고 있다(Mutonga, 2007). 이를 바탕으로 Table 3에 보이는 것과 같이 암석 코어에 지열수 순환 실험과 플러싱 모사 실험은 각기 다른 조건에서 수행되었다. 지열수 순환 실험에서는 약 500 ml의 지열수를 고정된 현무암 코어에 5회 순환하여 실험하였다. 네스야벨리르 지열발전소는 1-2.2 km의 깊이에 있는 지열수를 이용하며 온도는 151-200°C이다(Mutonga, 2007). 이 조건을 참고하여 온도를 190°C로, 봉압을 15.86 MPa(2300 psi)로 설정하였으며, 역압력 조절기로 코어의 주입부와 배출부 간 압력 차이를 0.03 MPa(5 psi)로 조절하여 코어에 약 5.16 MPa의 압력을 가하였다. 플러싱 실험에서는 온도와 봉압 조건은 지열수 순환 실험과 동일하였으나, 유량 및 코어 주입부의 압력과 배출부의 압력 차이를 0.07 MPa(10 psi)로 증가시켜 5분씩 4회 반복하였다. 이때 가해지는 코어의 압력은 약 10.31 MPa로 지열수를 주입할 때에 비해 약 2배 더 크게 설정하였다.

각 실험 전·후, 그리고 중간에 물 시료를 취하여 0.45 µm Polytetrafluoroethylene (PTFE) 필터(Millipore, Germany)

로 여과하여 Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry(ICP-OES, Optima 8300, PerkinElmer, USA)를 사용하여 이온농도를 분석하였다. 암석의 표면은 Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray analysis (SEM-EDX, EM-30AX, Coxem, Korea)을 이용하여 화학광물 조성의 변화를 관찰하였다. 또한, 암석 코어 시료를 실험 전·후로 완전히 건조된 상태에서 질량을 측정하여 비교하였으며, 질량 변화율은 식 (1)과 같이 계산되었다.

$$S = \frac{M_1 - M_0}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

여기서 S는 암석의 질량 변화율을 나타내며, M_0 과 M_1 는 각각 실험 전, 후 측정된 암석의 질량이다.

투수율 변화를 분석하기 위하여 실험의 각 단계에서 균열의 투수성(Fracture Permeability, K)과 균열간극(Fracture Aperture, b)이 아래의 식 (2) 및 (3)에 의해 계산되었다(Luo *et al.*, 2017; Caulk *et al.*, 2016; Luo *et al.*, 2018).

$$K = \frac{QL\mu}{A\Delta P} \quad (2)$$

$$b = \left(\frac{12QL\mu}{d\Delta P} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

K는 균열의 투수성(mD), Q는 주입수 유량(m^3/s), L은 암석 샘플 길이(m), μ 는 주입수의 점도(Pa·s), A는 암석의 단면적(m^2), ΔP 는 코어 주입부(Core Inlet)과 코어 배출부(Core Outlet)의 압력 차이(Pa), b는 암석 균열간극(m), d는 암석 단면적 직경(m)이다.

실제 플러싱 효과로 인하여 기반암과 반응하고 나온 물의 이온을 분석하여 변화 경향성을 분석하는 연구 사례들이 존재하지만, 기반암을 직접 관측하는데는 한계가 있었다(Portier and Vuataz, 2010). 따라서, 본 연구에서는 SEM-EDX 분석을 통해 코어 표면의 모양 변화를 관찰하고, 표면 광물에 대해 원소 분석을 수행하여 수용액 내 이온 농도 변화와 함께 설명하고자 하였다.

Table 3. Experimental conditions for geothermal fluid injection to basalt core

	Geothermal fluid circulation	Flushing
Temperature	190°C	190°C
Confining Pressure	15.86 MPa	15.86 MPa
Core Inlet Pressure	5.17 MPa	10.34 MPa
Core Outlet Pressure	5.14 MPa	10.27 MPa
Operation	72 mins (in average) × 5 cycles	5 mins × 4 cycles

실험 결과 및 토론

현무암 코어 - 지열수 순환 실험

Fig. 4은 코어홀더 내에서 지열수를 현무암 코어의 균열을 통해 5회 순환하였을 때의 투수성, 균열간극의 변화를 나타낸다. 투수성과 균열간극은 지열수의 주입 순환단계를 거칠수록 점차 감소하는 경향을 나타낸다. 지열수의 5회 순환 이후에는 첫 번째 투수성 대비 20.6% 만큼 감소하였으며 균열간극은 7.4% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

투수성의 감소는 지열수의 순환 중 암석광물-지열수 간 지화학반응이 일어나고, 그 결과 지열수 내 이온이 암석 표면에 침전되어 균열의 간극이 줄어들었기 때문이라고 생각할 수 있다. 순환 실험으로 인한 암석코어 질량의 변화, 지열수 내 주요 이온 농도의 변화, 코어 표면 화학조성의 변화를 분석하여 이를 뒷받침하고자 하였다.

우선, 현무암 코어의 질량은 실험 전에 286.89 g으로 측정되었으며, 지열수 주입 후에는 286.98 g으로 90 mg 정도 증가하였으며 질량변화율은 0.031% 이었다. 암석 균열 표면과 접촉하며 통과한 지열수의 총량이 1.8 L 정도임을 고려하면 90 mg의 질량 변화를 무시할 수 없는 수치로, 지열수 내 여러 이온들이 순환 도중 침전되었을 가능성을 고려

해 볼 수 있다.

또한, 지열수가 매 회 순환할 때마다 주요 이온의 농도를 관찰하였다. Fig. 5에 나타나듯이 지열수 내 Na^+ 와 SiO_2 농도가 다른 이온들에 비해 매우 높았으며, SiO_2 를 제외한 다른 주요 이온들의 농도는 순환을 거듭할수록 증가하였다. 그 중, Na^+ 와 K^+ 는 각각 5회 코어를 통과한 후 103.7%, 145.5%의 이온농도 증가율을 보였다. SiO_2 는 5회 순환 후 18.5% 가량 감소하는 경향을 보였다. 이 외에도 초기 농도가 매우 높지는 않으나, Ca^{2+} , Mg^{2+} 와 $\text{Fe}(\text{total})$ 이온은 초기 주입수 대비 증가하는 것으로 나타났다.

여러 이온들 중 지열수가 순환함에 따라 이온농도의 변화량이 가장 크게 나타난 것은 SiO_2 였으며, SiO_2 는 지열수가 코어균열 표면의 광물과 반응할수록 점차 지열수 내에서 농도가 낮아짐을 알 수 있었다. 낮아진 농도는 광물-지열수 간 지화학반응에 의한 SiO_2 의 침전으로 설명할 수 있을 것이다.

지열수에 높은 농도로 존재하고 있는 SiO_2 와 기반암을 구성하는 규산염 광물은 압력 및 온도 변화에 의하여 다양한 형태로 변형될 수 있는데, 규산염 광물이 약 150°C 에서는 제올라이트(zeolite)와 점토(clay) 형태로 존재하고, $200\text{--}400^\circ\text{C}$ 에서는 제올라이트(zeolite), 점토(clay), 프리나이트(prehnite), 녹염석(epidote), 장석류(feldspars), 조암 광물(amphiboles), 규산염 광물(garnets) 그리고 산화광물(oxides) 형태로 존재할 수 있다(Camacho, 2017). 실리카 콜로이드가 과포화된 용액내 암석-물 반응에 의하여 식 (4)와 같이 결정핵 생성(nucleation) 단계가 일어나 물과 함께 이합체 형태가 생성되는 것으로 보고된다(Brown, 2013). 단량체의 실리카 형태로 커질 때까지 반응이 일어나며 작은 실리카 콜로이드가 단량체의 실리카 형태와 반응하여 응집(aggregation)하여 폴리머 형태의 실리카를 생성한다(Heuvel et al., 2018).

아이슬란드 지역 저류층내에서 SiO_2 농도는 석영의 용해 정도에 따라 결정되며 온도가 높을수록 용해 정도가 증가한다(Fournier and Rowe, 1966). 따라서, 고온 조건에서 지열수에 존재하는 높은 함량의 SiO_2 가 규산염 광물로 코어 표면에 침전된 것으로 해석할 수 있다.

현무암 코어 - 플러싱 모사 실험

현무암 코어에 플러싱을 모사하여 실험하였다. 지열수 순환 (4 회)으로 인한 투수율 저하를 확인한 후, 합성된 플러싱 용액을 높은 압력 및 유량으로 5분 단위로 총 4번 투과 시키며 투수성과 균열간극의 변화를 관찰하였다(Fig. 6).

Fig. 4. Permeability and fracture aperture change during geothermal fluid circulation (●Geothermal fluid circulation).

Fig. 5. Ionic concentrations in geothermal fluid.

Fig. 6. Permeability and fracture aperture changes during flushing test (● Geothermal fluid circulation / ■ Flushing).

Fig. 7. Ionic concentrations in flushing fluid.

앞선 실험에서와 마찬가지로, 지열수가 4회 순환하면서 투수성, 균열간극이 각각 27.05%, 9.98% 씩 감소하는 경향성을 나타내었다. 이후 플러싱 용액을 코어에 통과시켰을 때에는, 매 회 투수성 및 균열간극이 증가하였으며, 4회 시행 후에는 초기 지열수 순환 시의 투수율과 비슷한 수준을 보였다.

Fig. 7은 플러싱 모사 실험 중 플러싱 용액 내 이온농도의 변화를 나타낸다. 플러싱 용액은 지열수에 비하여 상대적으로 주요 이온들의 이온농도가 낮으며, 4회 반복하면서 SiO_2 와 Na^+ 의 농도는 50% 이상 증가하였고 K^+ 의 농도는 7% 증가하였다. 3, 4 회차 단계에서 SiO_2 는 1, 2 회차에서 보다 감소하는 경향성을 나타내었지만, 주입 전에 비하여 플러싱을 가한 모든 단계들이 비슷한 농도로 관측이 되었다. Ca^{2+} 및 Mg^{2+} 의 농도는 감소하는 경향을 나타냈다. 플러싱 용액의 이온 변화율을 통하여 SiO_2 와 Na^+ 이온이 현무암에서 용해될 가능성이 있음을 확인하였다.

플러싱에 의해 암반 내에 침전된 물질들 및 균열이 영향 받을 수 있음이 이미 보고 되어 있으며(Portier and Vuataz, 2010; Yuan and Wood, 2018), 앞선 지열수 순환 실험에서 SiO_2 의 침전이 이루어졌다고 해석한다면, 플러싱 실험에서는 침전된 물질의 용해가 이루어졌다고 말할 수 있다. 그러나, 플러싱 실험에서는 앞의 실험에서 SiO_2 농도가 감소

Fig. 8. SEM images of basalt core surface (a) fresh, (b) after 5 cycles circulation of geothermal fluid, and (c) after 4 cycles of geothermal fluid circulation + 4 times of flushing, and (d) element contents measurements by EDX.

한 정도에 비해 상대적으로 적은 양의 SiO_2 농도의 증가를 보였으므로, 투수성의 성공적인 회복을 설명하기는 어려울 것이다. 이는, 높은 압력으로 주입된 플러싱 용액이 침전 물질 또는 광물을 용해시킴과 동시에 침전입자를 물리적으로 밀어낼 수 있었음을 의미한다.

코어 표면 분석

Fig. 8에 나타난 SEM 이미지를 통하여 지열수의 순환으로 인하여 현무암 코어 균열의 표면 형태의 변화가 일어났음을 알 수 있었다. 현무암 암석 표면 위에 새로운 물질들이 침전되거나 부착이 된 것으로 보이는 이러한 변화는 플러싱 후에 유지되는 것처럼 보이며, 지열수 순환 이전의 상태로 회복되지 않았다. Fig. 8(d)에는 (a), (b), 그리고 (c)에 나타난 암석 표면들을 대상으로 원소의 함량을 분석한 결과이다. 신선한 현무암 시료와 비교해 지열수의 순환 후에 Si의 함량이 증가했으며, Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , $\text{Fe}(\text{total})$ 등의 원소 함량이 감소하였다. 이 결과를 Fig. 5의 결과와 비교하면, 지열수가 현무암 코어 균열을 통과하면서 지열수 내 SiO_2 가 암석에 침전하고, 반면 Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , $\text{Fe}(\text{total})$ 등의 원소는 암석에서 지열수로 용해되었음을 유추할 수 있다.

Fig. 8(d)에서 물과 암석이 반응 시 플러싱이 암석 표면에 침전물을 유발하는 원소는 Si를 제외하고 크게 나타나지 않았다. Fig. 7의 결과에서는 플러싱 실험으로 인해 수용액 내 SiO_2 와 Na^+ 이온 농도가 증가하고, Ca^{2+} , Mg^{2+} 이온 농도가 감소하는 것으로 나타났으나, Ca^{2+} , Mg^{2+} , 그리고 Na^+ 이온 농도의 변화량이 상대적으로 작아서 암석 표면 분석에서 유의한 변화가 관찰되지 않은 것으로 판단된다. 반면, 코어 균열 표면에서 가장 많은 양을 차지하는 Si 함량의 평균값이 감소하고 수용액 내 SiO_2 농도가 증가하였으므로, 플러싱에 의해 암석에 있던 Si가 수용액으로 용해되었음을 알 수 있었고, 이 과정에서 투수율이 회복되었다고 예상할 수 있다.

결론

본 연구에서는 대표적인 EGS 사이트의 기반암 중 하나인 현무암을 이용하여 인공저류층 모사 실험을 수행하였다. 플러싱의 효과를 수용액 내 이온농도의 변화 및 광물 표면의 변화로 관찰하였다. 지열수가 현무암 코어 균열을 통하여 순환하면서, 시간이 지날수록 지열수 내 SiO_2 농도가 감소하고, 균열 내 침전물이 생성되었으며, 그 결과로 투수율이 감소되었다. 지열 저류층 내 투수율 감소를 해결하는 방법으로 주변 지표수를 이용한 플러싱을 적용하면, 지열수 내 SiO_2 농도가 증가하였으며 암석 표면 내 Si 이온의 평균값이 미세하게 감소하였다. 균열 표면에서 일어난 지화

학적 반응 또는 플러싱의 물리적 효과로 인해 투수율이 회복될 수 있음을 확인하였다.

사 사

본 연구는 한국전력공사의 2018년 선정 기초연구개발 과제 연구비에 의해 지원되었음(과제번호: R18XA06-37).

References

- Bae, S.M., Kim., H.K., Kim., H.W., and Nam, Y.J., 2017. Study on the Underground Thermal Environment around Wells for a Design Method of Open-Loop Geothermal System, *Korea Society of Geothermal Energy Engineers*, 13(1), p.14-20.
- Brown, K., 2013. *Mineral scaling in geothermal power production*, United Nations University Geothermal training program, Reports 2013-39, Reykjavik, Iceland, p.1-25.
- Camacho, D., 2017. *The Geochemistry of Silica in Icelandic Geothermal Systems*, MS Thesis, United Nations University, Reykjavik, Iceland, p.1-25.
- Candela, C., Brodsky, E.E., Maronea, C., and Elsworth, D., 2014. Laboratory evidence for particle mobilization as a mechanism for permeability enhancement via dynamic stressing, *Earth and Planetary Science Letters*, 392, p.279-291.
- Carlson, R.W., Grove, T.L., and Donnelly-Nolan, J.M., 2018. Origin of Primitive Tholeiitic and Calc-Alkaline Basalts at Newberry Volcano, Oregon, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(4), p.1360-1377.
- Caulk, R.A., Ghazanfari, E., Perdrial, J.N., and Perdrial, N., 2016. Experimental investigation of fracture aperture and permeability change within Enhanced Geothermal Systems, *Geothermics*, 62, P.12-21.
- Chandrasekharam, D., Lashin, A., Arifi, N.A., Bassam, A.A., Alfay, M.E., Ranjith, P.G., Varun, C., and Singh, H.K., 2015. The potential of high heat generating granites as EGS source to generate power and reduce CO_2 emissions, western Arabian shield, Saudi Arabia, *Journal of African Earth Sciences*, 112, p.213-233.
- Cladouhos, T., Petty, S., Swyer, M., Uddenberg, M., Grasso, K., and Nordin, Y., 2016. Results from Newberry volcano EGS Demonstration, 2010-2014, *Geothermics*, 3, p.44-61.
- Fournier, R. and Rowe, J., 1966. Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot springs and wet-steam wells, *American Journal of Science*, 264(9), p.685-697.
- Gallup, D.L., 2009. Production engineering in geothermal technology: A review, *Geothermics*, 38(3), p.326-334.

- Graettinger, A.H., McGarvie, D.W., Skilling, I.P., Höskuldsson, A.H., and Strand, K., 2019. Ice-confined construction of a large basaltic volcano—Austurfjöllmassif, Askja, Iceland, *Bulletin of Volcanology*, 81(9), p.1-23.
- Gunnlaugsson, E., Armannsson, H., Thorhallsson, S., and Steingrímsson, B., 2014. Problems in geothermal operation scaling and corrosion, *Short Course VI on utilization of low- and medium enthalpy geothermal resources and financial aspects of utilization*, UNU-GTP and LaGeo, Santa Tecla, El Salvador, p.1-18.
- Heuvel, D.B.v.d., Gunnlaugsson, E., Gunnarsson, I., Stawski, T.M., Peacock, C.L., and Benning, L.G., 2018. Understanding amorphous silica scaling under well-constrained conditions inside geothermal pipelines, *Geothermics*, 76, p.231-241.
- Jiang, P., Li, X., Xu, R., and Zhang, F., 2016. Heat extraction of novel underground well pattern systems for geothermal energy exploitation, *Renewable Energy*, 90, p.83-94.
- Lee, J.B. and Chung, E.H., 2020. Application of geochemical modelling for hydraulic stimulation in enhanced geothermal systems, *Geosystem Engineering*, 23(6), p.342-350.
- Lee, T.J., Lee, S.K., Lee, C.K., Park, I.H., Song, Y.H., and Uchida, T., 2008. Two-dimensional Magnetotelluric Surveys for Investigating Possible Deep Geothermal Regime in the Mid-mountain Area of Jeju Island, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 45(4), p.315-325.
- Luo, J., Zhu, Y., Guo, G., Tan, L., Zhuang, Y., Liu, M., Zhang, C., Xiang, W., and Rohn, J., 2017. Experimental investigation of the hydraulic and heat-transfer properties of artificially fractured granite, *Scientific Reports*, 7, p.1-10.
- Luo, J., Zhu, Y., Guo, Q., Tan, L., Zhuang, Y., Liu, M., Zhang, C., Zhu, M., and Xiang, W., 2018. Chemical stimulation on the hydraulic properties of artificially fractured granite for enhanced geothermal system, *Energy*, 142, p.754-764.
- Mahbaz, S., Yaghoubi, A., Dehghani-Sanij, A., Sarvaramini, E., Leonenko, Y., and Dusseault, M.B., 2021. Well-Doublets: A First-Order Assessment of Geothermal SedHeat Systems, *Applied Sciences*, 11(2), p.1-18.
- Mutonga, M.W., 2007. The isotopic and chemical characteristics of geothermal fluids in Hengill area, SW-Iceland: Hellisheidi, Hyeragerdi and Nesjavellir fields, *World Geothermal Congress 2007*. Bali, Indonesia, p.333-369.
- Nitschke, F., 2017. *Numerical and Experimental Characterization of Dissolution and Precipitation Processes in Deep Geothermal Reservoirs*, Phd Thesis 2017, Des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).
- Nouraliee, J., 2000. *Borehole Geology and Hydrothermal Alteration of Well NJ-20, Nesjavellir High-Temperature Area, SW-Iceland*, United Nations University, Geothermal Training Program. 2000(15), p.303-330.
- Olasolo, P., Juárez, M.C., Morales, M.P., Amico, S.D., and Liarte, I.A., 2016. Enhanced geothermal systems (EGS): A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, p.133-144.
- Park, Y.G., Kwon, K.S., Kim, N.J., Lee, J.Y., and Yoon, J.G., 2013. Change of geochemical properties of groundwater by use of open loop geothermal cooling and heating system, *Journal of the Geological Society of Korea*, 49(2), p.289-296.
- Park, Y.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), p.243-251.
- Portier, S. and Vuataz, F.D., 2010. Developing the ability to model acid-rock interactions and mineral dissolution during the RMA stimulation test performed at the Soultz-sous-Forêts EGS site, France, *Comptes Rendus Geoscience*, 342(7-8), p.668-675.
- Sahar, S., Zarandi, M., and Ivarsson, G., 2010. A review on waste water disposal at the Nesjavellir geothermal power plant, *Proceedings World Geothermal Congress 2010*. Bali, Indonesia, p.25-29.
- Scherff, A., 2016. *Iceland Deep Drilling Project: A case study of a magma-enhanced geothermal system*, Advanced Drilling Technology Topics.
- Yasuhara, H., Kinoshita, N., Ohfuji, H., Lee, D.S., Nakashima, S., and Kishida, K., 2011. Temporal alteration of fracture permeability in granite under hydrothermal conditions and its interpretation by coupled chemo-mechanical model, *Applied geochemistry*, 26(12), p.2074-2088.
- Yilmaz, C., 2017. Thermodynamic and economic investigation of geothermal powered absorption cooling system for buildings, *Geothermics*, 70, p.239-248.
- Yuan, B. and Wood, D.A., 2018. A holistic review of geosystem damage during unconventional oil, gas and geothermal energy recovery, *Fuel*, 227, p.99-110.
- Zarandi, S. and Ivarsson, G., 2010. A review on waste water disposal at the Nesjavellir geothermal power plant, *Proceedings World Geothermal Congress*.

이 준 범

2017년 연세대학교 화학 및 의화학 이학사
2020년 서울대학교 대학원 에너지시스템
공학부 박사수료

현재 서울대학교 에너지시스템공학부 박사수료 및
서울대학교 에너지자원신기술 연구소 연구원
(E-mail; orgclear@snu.ac.kr)

정 은 혜

2002년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 공학사
2004년 서울대학교 대학원 지구환경시스템
공학부 공학석사
2011년 Georgia Institute of Technology
대학원
Civil & Environmental Engineering
공학박사

현재 서울대학교 에너지시스템공학부 부교수
(E-mail; echung@snu.ac.kr)