



[2021-9-GT-005]

암반 대수층에서 개방형 지열 시스템의 개발 및 적용

심병완¹⁾ · 김성균^{2)*} · 최한나²⁾ · 이수형¹⁾ · 하규철³⁾ · 김용철⁴⁾

Development of a Groundwater Source Heat Pump in a Fractured Rock Aquifer

Byoung Ohan Shim¹⁾ · Seong-Kyun Kim^{2)*} · Hanna Choi²⁾ · Soo-Hyoung Lee¹⁾ · Kyoochul Ha³⁾ · Yongchul Kim⁴⁾

Received 10 June 2021 Revised 5 July 2021 Accepted 6 July 2021 Published online 9 August 2021

ABSTRACT A groundwater source heat pump (GWHP) was developed in this study by adapting a borehole heat exchanger with closed-loop and open-loop systems in a new building. In the pilot test building, the air-conditioning on the second floor was designed to employ a closed-loop system and that on the third floor had an open-loop system. The GWHP design is based on the feasibility of groundwater resources at the installation site. For the hydrogeological survey of the study site, pumping and injection tests were conducted, and the feasibility of GWHP installation was evaluated based on the air-conditioning load demand of the building. The site was found to be satisfactory for the design capacity of the thermal load and water quality. In addition, the effect of groundwater movement on the performance of the closed-loop system was tested under three different operational scenarios of groundwater pumping. The performance of the system was sustainable with groundwater flow but declined without appropriate groundwater flow. From long-term observations of the operation, the aquifer temperature change was less than 2°C at the observation well and 5°C at the injection well with respect to the initial groundwater temperature. This pilot study is expected to be of guidance for developing GWHPs at fractured rock aquifers.

Key words Groundwater source heat pump(지하수열히트펌프), Open-loop(개방형루프), Closed-loop(밀폐형루프), Hydrogeology(수리지질), Fractured rock aquifer(암반 대수층)

Nomenclature

 s_w : total drawdown, m B : formation loss constant, day/m² Q : rate of discharge, m³/day C : well loss constant, day²/m⁵ n : order of nonlinear well losses T : transmissivity, cm²/sec K : hydraulic conductivity, cm/sec S : storativity

1) Principal Researcher, Groundwater Research Center, Korea
Institute of Geoscience and Mineral Resources

2) Senior Researcher, Groundwater Research Center, Korea Institute
of Geoscience and Mineral Resources

3) Head of Division, Geologic Environment Division, Korea
Institute of Geoscience and Mineral Resources

4) Head of Center, Groundwater Research Center, Korea Institute of
Geoscience and Mineral Resources

*Corresponding author: kskinc@kigam.re.kr
Tel: +82-42-868-3082

1. 서론

우리나라는 1998년 제정된 대체에너지개발 및 이용·보급
촉진법에 의하여 건물의 냉난방을 위해 지열히트펌프(Geo-

thermal Heat Pump: GHP) 시스템이 2000년대 초반부터 본격적으로 보급되기 시작하였다. 천부지열을 이용하는 방법은 다양한 형태가 있는데 지반의 수리지열학적 조건, 부지 활용성, 기후, 규제 등에 따라 보다 효율적인 타입의 선택이 가능하고 크게 밀폐형(Closed-loop)과 개방형(Open-loop)으로 나눌 수 있다. 국내에서는 대부분 수직형 지중열교환기(Borehole Heat Exchanger: BHE)를 이용한 밀폐형 시스템 위주로 설치되어 왔다.^[1,2] 일반적으로 지중열교환기의 뒤편채움재로 벤토나이트 혼합물 등을 이용하여 주변 수 m의 지반과 열전도에 의한 열교환 방식을 이용하고 있다. 단일 혹은 복수의 지하수 관정을 통해 지하수열을 직접 이용하는 개방형은 충적대수층이 잘 발달한 미국에서 1940년대 최초 이용된 것으로 알려져 있다.^[3] ATES(Aquifer Thermal Energy Storage) 시스템과 같이 계간축열을 이용하여 효율을 높일 수도 있고 지표수 및 강변여과수와 같은 다양한 수열원과 연계 개발도 가능하다. 국내에서는 지하수열을 일부만 직접적으로 이용하고 대부분의 열전달을 공벽과의 열전도에 의존하는 스탠딩컬럼웰(Standing Column Well) 형태의 반개방형(Semi-open) 시스템이 주로 보급되어왔다.^[4] 기존의 국내 천부 지열 에너지 보급 형태는 지반 내 지하수열 개발 및 활용 가능량에 따른 유형의 선정과는 별개로 신재생에너지로서 지열시스템의 지원제도가 관리 조건에 따라 결정되어 양수정과 주입정을 이용한 열교환 방식의 보급이 매우 미미하다.

우리나라는 연간 약 29억 m³의 지하수를 농업용, 생활용, 공업용, 음용 등으로 이용하고 있으며, 전국적으로 160만개 이상의 지하수공이 개발되어 있다.^[5] 이 가운데 암반 대수층의 지하수 이용량이 약 17억 톤으로 전체이용량의 60%이며, 개발관정수에서는 43%를 나타내고 있어 충적층 관정보다 암반대수층에 설치된 지하수공에서 보다 큰 용량의 지하수를 이용하는 것을 알 수 있다.

풍부한 지하수를 공급할 수 있는 지반에서는 효율이 높은 에너지를 제공할 수 있으나 지역적으로 편차가 심하여 설계에서 미리 대수층에서 활용할 수 있는 지하수의 수량을 양수 실험 등을 통하여 측정하여야 한다. 따라서 그 지역 대수층의 전반적인 자료를 검토하고 영향이 미치는 범위를 추정하기 위한 수리지질학적 조사가 필요하다. 해외 사례로서 개방형 대수층의 타당성 평가에 대한 기준이 충적층 모델을 중심

으로 제시된 연구들이 있으나 대부분 두꺼운 자갈 및 모래층에 해당하는 기준으로 만들어져 있다.^[6] 그러나 국내에서는 얇은 충적층과 하부에 발달한 균열암반으로 이루어진 대수층 형태로 이루어진 곳이 많아 충적층 열적 거동 모델을 적용하기에는 무리가 있으며, 국내 지하수 부존 및 지반조건에 적합한 개방형 지열 시스템의 개발이 요구된다. 국내에는 복수정(Multi-well) 형태의 개방형 지열시스템을 설치하는데 양호한 대수층은 암반파쇄대가 많은 지역과 지질학적으로 석회암 및 현무암 지반 등 여러 조건들이 있으나 변수들이 많아 위치선정 이전에 정밀한 사전조사가 요구된다.^[1,7,8]

밀폐형 지열시스템 설계는 전체 지중열교환기 길이를 산정하는 것이 핵심인데 이는 성능뿐만 아니라 초기 비용에서도 지중열교환기 설치가 큰 부분을 차지하기 때문이다. 지중열교환기 적정 길이를 구하기 위한 매개변수로서 유효지중열전도도(Effective ground thermal conductivity)와 공내 열저항(Borehole thermal resistance) 측정이 요구되며, 우리나라 지반의 지중열전도도는 대부분 2~6 W/mK 범위에 있다.^[9] 비록 지반 열물성 특성에 따라 밀폐형은 성능변화가 다소 있을 수 있으나 대부분의 지역에서 설치가 가능하고 비교적 안정적인 성능을 기대할 수 있다. 밀폐형은 보통 지속적인 지중열교환에 의한 지반 내 온도 변화로 시온 초반에서 후반으로 갈수록 그 성능이 점차 감소하게 된다. 그러나 주변 지하수가 빠르게 유동하여 지반에 축적되는 열을 감소시켜 초기 지반온도와 비슷하게 유지할 경우, 그 열교환 성능이 일정하게 유지될 수도 있다.^[8]

개방형 지열 시스템 설계는 설치예정 위치의 지하수 개발 가능량을 측정하는 것이 가장 중요하다. 한 관정당 지하수 개발가능량은 적게는 10 m³/day에서 많게는 1,000 m³/day 이상이 가능한 곳도 있으므로 지역적 편차가 존재하고 그에 따른 적절한 설계가 요구된다. 관정당 지하수 개발가능량이 많다면 적은 초기비용으로 우수한 냉난방 성능을 기대할 수 있고 적다면 초기비용은 증가하고 성능은 감소하며 설치가 불가능 할 수도 있다. 개방형의 경우 설계를 잘못하여 양수정이 주입정의 주입수 온도 영향을 직접적으로 받는 경우를 제외하면 성능이 일정하게 유지된다. 수질도 성능에 영향을 주는 요인 중 하나로 관정 내부나 열교환기에 침전이나 부식을 일으키는 물질이 있으면 시간이 지남에 따라 성능 감소의 요인이 될 수 있다. 따라서 Fig. 1과

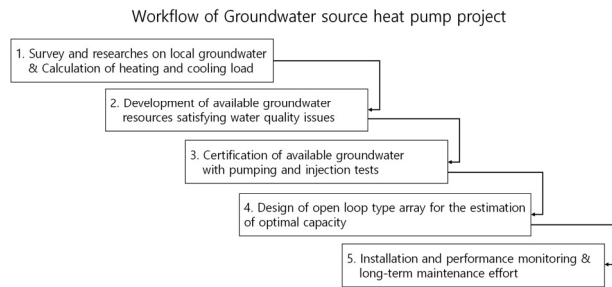


Fig. 1. The flow chart of groundwater source heat pump project and the summarized steps

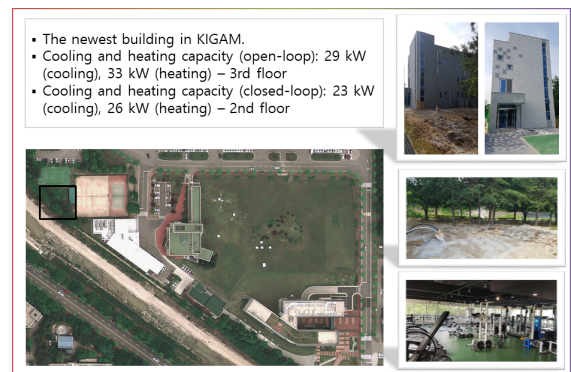
같은 체계적인 프로젝트 진행 시스템이 요구된다.

본 연구에서는 개방형 지열시스템을 기반으로 양수정과 밀폐형 지중열교환기를 결합한 융합형 지중열교환기(Hybrid BHE)를 고안하여 한국지질자원연구원 스포렉스(SPOREX) 건물에 설치하였다. 양수를 위한 개방형 관정 내부에 밀폐형 loop를 설치하여 개방형과 밀폐형이 융합되어 설치 지역에 따라 개방형의 높은 효율과 적은 초기 비용, 밀폐형의 안정적 성능을 기대할 수 있고 밀폐형의 시간에 따른 성능 하락 현상도 양수에 의한 지하수 유동을 통해 감소시킬 수 있다. 먼저 개방형에서 활용가능한 지하수 유량 계산을 위한 양수 및 주입실험을 실시하고 그 결과로 활용가능성을 평가했다. 또한 지하수 유동이 밀폐형 지중열교환기의 성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 냉방과 난방기간의 열교환율을 비교하였으며, 장기적인 모니터링을 통하여 본 시스템의 장단점을 파악하였다.

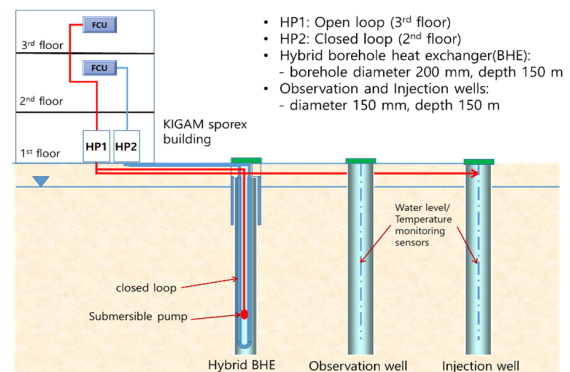
2. 연구방법

Fig. 2a는 대전 유성구 한국지질자원연구원 스포렉스 건물의 위치와 현장 모습이다. 이 지역의 기반암은 복운모 화강암이며 많은 균열이 발달된 암반대수층이 형성되어 있으며, 측정된 대수층의 열류량(Heat flow)은 59.7 mW/m^2 이다.^[10] 국내에 많이 발달되어 있는 균열 암반대수층은 충적층보다 지반 내 공극의 불균질성이 크므로, 굴착 위치에 따른 양수 및 주입 가능량의 편차가 클 확률이 높다.

수리실험은 안정 양수량(Safe yield)을 파악하기 위한 단계 및 장기양수실험을 실시하고, 주입공에서 주입량에 따른 지하수위 변동을 측정하였다. Fig. 2b는 시스템 설치



(a)



(b)

Fig. 2. (a) Floor plan and photos of the study site and (b) the profile of installed GWHP with hybrid BHE, observation well, and injection well

단면도로서 실증건물에 설치된 융합형 지열시스템은 개방형에 밀폐형 지중열교환기가 복합된 것으로서 수중펌프는 50 m 심도에 있으며, 주입정의 주입관은 10 m 하부까지 연결되어 있다. 2층과 3층의 냉난방 면적은 115 m^2 와 89 m^2 이며, 각각의 히트펌프와 연결되어 개방형은 3층, 밀폐형은 2층 공간의 냉난방을 위해 설치되었다. 융합형 지중열교환기(Φ 200 mm) 및 관측정(Observation well: Φ 150 mm), 주입정(Injection well: Φ 150 mm)의 관정심도는 각각 150 m이며, 융합형 지중열교환기와 주입정간 간격은 10 m이다. 화강암 지반에서 열교환율이 대략적으로 $55 \sim 85 \text{ W/m}$ 로 설계가 이루어진다고 고려하였으며,^[11] 융합형 지중열교환기 심도는 밀폐형 지중열교환기의 냉난방 부하에 따른 소요길이를 추정하여 설정하였다. 관측정에서 심도별 지하수 샘플 분석 등을 통하여 개방형 지열시스템 운영에 의한 수온변화에 따른 광물포화도 특성을 고려한 분석 및 시뮬레이션을 실시하였다. 분석결과 대수층 내 수질

은 장기간 운영에서도 시스템 내 광물 흡착 및 침전 등의 문제가 미미할 것으로 판단되었다.^[12]

2.1 적정취수량 산정

2.1.1 단계대수성 시험

양수실험의 첫 번째 목적은 그 지하수공의 최대 안정 양수량(Maximum safe yield)을 파악하는 것이고, 다음은 그 주변에서 다른 지하수공들이나 수자원에 어느 정도 영향을 미치는지 추정하는 것이다.^[13] 단계양수시험은 조사공에서 양수율을 단계적으로 증가시켜 획득한 시간-수위강하 자료의 분석을 통해 해석학적 분석과 전산분석을 병행하여 조사공의 우물수두손실 및 대수층수두손실, 우물효율 등을 계산하고, 장기양수시험시 적용할 적정취수량을 결정하기 위해 수행한다. 우물 산출성 평가는 단계양수시험(Step-drawdown test)이라 불리는 변동물 양수 시험을 이용한다.^[14] 단계양수시험은 펌프 토출구와 우물 유공관을 통하여 지하수 흐름이 발생할 때마다 그 수위강하량을 측정하여 산정한다. Jacob (1947)은 지하수가 우물의 유공관이나 대수층을 통해 빠른 속도로 유입되고 동수구배가 커지면 일종의 난류가 발생하여 실수위강하량은 층류에서의 수위강하량보다 크게 나타난다고 하였다.^[15] 이것은 대수층의 지하수가 우물 스크린을 통해 유동할 때 생기는 손실과 우물 안에서 펌프 흡입에 따른 손실 등 여러 가지 요인이 첨가되었기 때문이다. 이러한 우물손실(Well loss)은 우물 내에서 발생한 난류에 의해 생성되므로 우물 수위 강하량(s_w)은 식 (1)과 같이 대수층 손실(BQ)과 우물 손실(CQⁿ)의 합으로 표현할 수 있다.^[16]

$$s_w = BQ + CQ^n \quad (1)$$

단계양수시험시 양수량이 증가함에 따라 우물수두손실은 Qⁿ에 비례하여 증가하므로 일정한 양수량 이상에서는 우물의 수두강하가 크게 발생한다. 따라서 단계양수시험 자료는 우물의 적정취수량을 결정하는데 이용될 수 있다. 단계양수시험 분석에서는 직선법을 이용하여 대수층의 수두손실계수 B, 우물 수두손실계수 C 및 적정취수량을 산출한다.

2.1.2 장기대수성 시험

대수층 내 활용가능한 지하수를 정량적으로 평가하기 위

해 수행되는 양수시험을 통해 양수정에서 지하수를 직접 채수하여 발생하는 시간경과별 수위변화량과 양수 중지 후 수위가 회복될 때까지의 수위변화량을 관측한 자료를 이용하여 투수량계수(Transmissivity), 수리전도도(Hydraulic conductivity), 저류계수(Storage coefficient) 및 비산출율(Specific yield)과 같은 대수성 수리상수를 산정할 수 있다.^[17] 양수시험은 조사공에서 채수상과 회복상으로 구분하여 실시하였다. 양수시험시 각 조사공 및 관측정에서 지하수 채수로 인한 수위강하나 양수 중지 후 수위회복 양상 등을 관측하고, 이들 자료를 AQTESOLV for Windows Ver.4.5^[18]를 이용하여 대수층의 수리상수들을 계산하였다.

2.1.3 주입 시험

개방형 시스템은 양수정에서 취수한 지하수를 히트펌프에서 열교환후 대수층으로 재주입 하는 방식이 이상적이며, 이러한 방식을 활용하여 대수층내 지하수가 일정하게 보존된다.^[19] 그러나 지하수공의 수리적 특성에 따라 취수한 지하수의 주입량이 달라지므로 주입 가능량에 대한 측정이 요구된다. ATEs와 같은 축열식뿐만 아니라 일반적인 복수정 형태의 개방형도 대수층 내 지하수열만 활용하고 재주입하여 지하수 부존량을 일정하게 유지하는 방식을 활용하므로 장기적으로 지속가능한 공급수량을 유지할 수 있다.

본 연구에서는 주입정(Injection well)의 주입능력을 평가하기 위하여 두 가지 주입시험을 실시하였다. 시험방법은 주변에서 비양수시 일정량의 물을 주입정에 주입하는 자연주입 시험과 개방형 시스템 냉난방 가동과 같은 경우로서 주입정으로 최대 주입 가능량을 산정하기 위하여 양수정에서 양수를 진행하면서 주입량을 증가시키는 단계주입 시험으로 진행하였다.

2.2 냉난방 실험 모니터링 해석

2.2.1 지하수 유동 효과

Fig. 2의 융합형 지중열교환기에서 지하수의 유동이 밀폐형 지중열교환기 성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 난방기간(2019. 1. 21~2. 21) 동안 3가지 시나리오 모드로 설정하여 실험을 실시하였다(Fig. 3). Mode 1은 밀폐형만 가동하였을 경우, Mode 2는 밀폐형 열교환 가동과 개방형은 열교환 없이 융합지중열교환기에서 지하수만 양수하여

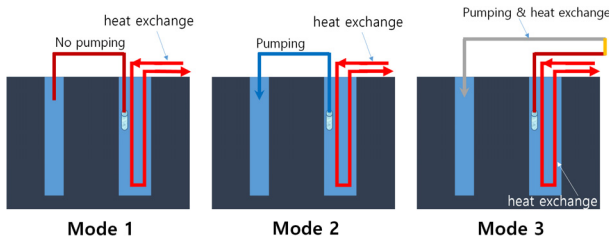


Fig. 3. The considered three different operation modes to identify the groundwater flow effect to the heat exchange rates of the closed loop heat exchanger (Mode 1: Closed loop heat exchange only; Mode 2: Closed loop heat exchange with groundwater pumping; Mode 3: Closed loop and open loop heat exchange operation simultaneously)

주입정에 주입한 경우, 그리고 Mode 3은 밀폐형과 개방형 시스템 2개를 모두 열교환하게 가동한 경우로 설정하였다 (Fig. 3). 이를 통하여 난방기간과 냉방기간에서의 지중열 교환율(Heat exchange rate)과 온도변화 등을 측정하였다. 여기서 Mode 2는 양수에 의한 지하수의 유동이 밀폐형 성능에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 평가하기 위하여 고려되었으며, Mode 3은 개방형 시스템이 가동되어 대수층 내 지하수 온도가 변화됨에 따라 성능이 변화되는 것을 파악하고자 하였다.

2.2.2 대수층 장기온도 변화 모니터링

대수층 내 온도 및 수위는 시스템 효율을 결정하는 중요한 자료이며, 지하수 유동에 따라 대수층 내 온도변화가 발생할 수 있다. 본 시스템에는 융합정에서는 상부에 10 m 간격으로, 관측정과 주입정에는 30 m 심도마다 PT100 온도센서를 설치하였다. 이를 통하여 난방과 냉방기간의 열교환율과 열교환된 지하수가 재주입되면서 발생하는 대수층 내 온도변화를 측정하여 시스템의 효율변화 예측과 지속가능성을 평가할 수 있다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 개방형 시스템 취수량

3.1.1 적정 취수량 해석

단계양수시험은 양수정에서 정호 및 대수층 특성에 따른 지하수의 수두손실을 평가하기 위하여 실시하는 대수성 시

Table 1. Step drawdown test results with drawdown versus elapsed time at stepped pumping rates

Step	Start time (min)	Elapsed time (min)	Pumping rate (m ³ /day)	Drawdown (m)	Specific Drawdown (m)
1st	0	60	40	2.79	0.0698
2nd	60	120	80	7.93	0.0991
3rd	120	180	120	20.02	0.1668
4th	180	208	160	43.48	0.2718

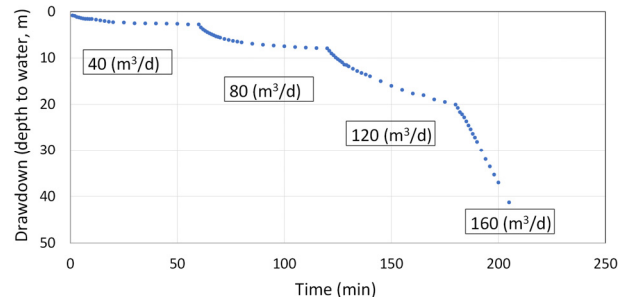


Fig. 4. Drawdown of groundwater level according to the stepped pumping rates of 40, 80, 120 and 160 m³/day

험의 한 종류로써 초기에는 작은 양수율로 양수하다가 점차 단계적으로 양수량을 증가시켜 일련의 시간-수위강하 자료를 얻어 대수층 특성을 분석하는 시험방법이다. 단계별 양수시 양수량을 일정하게 유지시키는 정률시험으로 수행했으며, 각 단계의 수위강하량은 동일한 시간 간격으로 측정하였다(Fig. 4).

단계양수시험의 결과를 Table 1에 나타내었다. 단계양수시험은 4단계로 실시하였으며, 각 단계별 양수시간을 1시간으로 하였고, 4단계 시험 중 급격한 수위강하로 인해 28분 경과 후 시험을 종료하였다. 1단계는 40 m³/day, 2단계는 80 m³/day, 3단계는 120 m³/day, 4단계는 160 m³/day의 양수율로 단계양수시험을 실시하였다. 분석결과, 우물수두손실계수(C)는 $4.21 \times 10^{-2} \text{ day}^2/\text{m}^5$, 대수층수두손실계수(B)는 $2.94 \times 10^{-2} \text{ day}/\text{m}^2$ 로 분석되었고, 양수량 대 비수위강하량 그래프로 도시하여 변곡점이 발생하는 100 m³/day를 대수층의 적정취수량으로 산정하였다.

3.1.2 대수층 수리인자 해석

장기양수시험은 단계양수시험 시 산정한 적정취수량 및 우물효율을 고려하여, 양수량을 100 m³/day로 토출량을 일정하게 유지하는 정율 시험법으로 24시간동안 수행하

였다. 수위안정상태가 유지되는 것을 확인한 후 펌프의 동력을 차단시켜 연속적으로 수위회복을 관측후 이를 해석하였다(Fig. 5). 피압대수층(Confined aquifer)의 Theis와 Cooper-Jacob 해석법을 사용하여 투수량계수(T)와 저류계수(S)를 산정하였다.^[20] 회복시험은 Theis recovery 해석법을 사용하여 산정하였고, $T=K \times b$ 이므로, 산정된 투수량계수(T)에 대수층의 두께(b)를 나누어 최종적으로 수리전도도(Hydraulic conductivity)를 계산하였다(Table 2).

장기양수시험으로 획득한 융합정, 관측정 및 주입정의 시간에 따른 수위강하량 자료를 통해 AQTESOLV for Windows Ver.4.5^[18]를 이용하여 해석한 수리인자는 Table 2에 정리

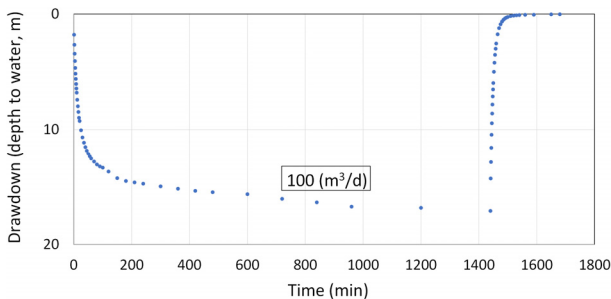


Fig. 5. Water table drawdown from the pumping test for 24 hours at Hybrid BHE

Table 2. Calculated hydraulic parameters (Transmissivity, Hydraulic conductivity, and Storativity) from the pumping and recovery tests

Name	Hydraulic parameters			Analysis method
	T (cm ² /sec)	K (cm/sec)	S	
Hybrid BHE	0.9027	6.26×10^{-5}	2.94×10^{-4}	Theis
	0.5669	3.93×10^{-5}	2.93×10^{-2}	Cooper-Jacob
	0.5705	3.96×10^{-5}	—	Theis recovery
Observation well	2.073	1.43×10^{-4}	1.33×10^{-7}	Theis
	2.566	1.78×10^{-4}	2.78×10^{-9}	Cooper-Jacob
	1.794	1.24×10^{-4}	—	Theis recovery
Injection well	23.92	1.65×10^{-3}	4.60×10^{-6}	Theis
	22.75	1.57×10^{-3}	7.96×10^{-6}	Cooper-Jacob
	21.82	1.51×10^{-3}	—	Theis recovery

하였다. Theis법에 의해 해석된 개방형에서 양수정으로 이용되는 융합형 지중열교환기공 내 수리전도도는 6.26×10^{-5} cm/sec이며, 주입정의 수리전도도는 1.65×10^{-3} cm/sec로서 큰 차이를 보이고 있다. 그리고 암반대수층 내 지하수 유동은 불균질하게 발달된 균열들을 따라 유동하므로 심도별로 유동되는 유량의 차이는 매우 크며, 수리성이 높은 균열대가 대부분의 지하수 유동 통로로 이용된다. 주입정의 수리전도도가 1.51 cm/sec로서 수리전도도 크기가 국가지하수 관측망의 충적대수층의 수리전도도 1.46 cm/sec보다도 크게 나타나므로 주입정에서의 지하수 확산이 주변 균열들을 따라 빠르게 이동하는 것으로 판단된다.^[21]

3.1.3 주입 시험 해석

첫 번째 주입시험에서는 50 m³/day의 일정량의 물을 120분 동안 지속적으로 주입정에 주입하여 수위변화를 관측하였다. 주입시험 결과, 50 m³/day의 물은 안정적으로 주입되었으며, 최대 수위변화는 0.37 m 상승하는 것으로 관측되었다(Table 3). 그리고 두 번째 주입시험에서는 개방형 시스템 운영 시와 동일하게 양수와 주입을 동시에 실시하는 방식으로 수행하였으며, 주입량에 따른 지하수위 변화를 측정하기 위하여 단계 주입 시험을 실시하였다.

대수층에 주입되는 수량을 추정하기 위하여 양수정의 양수량을 120 m³/day로 일정하게 하고 단계적으로 주입량을 늘려서 주입하였다. 1단계 주입량은 50 m³/day로 설정하였으며 이후 20 m³/day씩 증가시켜 총 4단계로 나눠 주입 시험을 실시하였다. 각 단계의 주입시간은 60분씩 진행하였으며 주입 종료 후 60분간 회복양상을 관측하였다. 단계 주입 시 주입정 및 양수정에서의 시간에 따른 수위변화량을

Table 3. Groundwater level changes in the injection well according to the injection/pumping rate with four steps

Injection rate (m ³ /day)	Pumping rate (m ³ /day)	Injection rate/Pumping rate	Groundwater level (m)	Drawdown (m)	Specific drawdown (m)
50	120	0.42	5.29	2.79	0.0698
70	120	0.58	5.18	7.93	0.0991
90	120	0.75	5.05	20.02	0.1668
120	120	1.00	4.79	43.48	0.2718

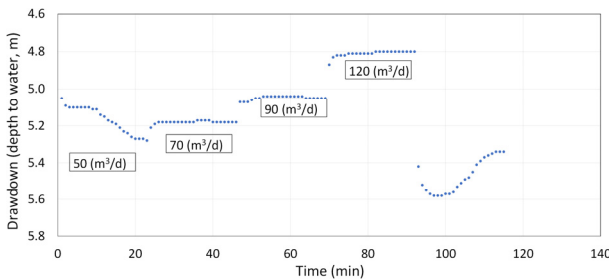


Fig. 6. Groundwater level changes at the stepped injection rates of 50, 70, 90 and 120 m³/day under the pumping condition of 120 m³/day

Fig. 6에 도시하였다.

1단계 50 m³/day 주입 후 0.2 m 수위 상승 후 점차 하강하여 초기수위인 5.29 m에 도달하였으며, 2단계 70 m³/day 주입 후 0.11 m 수위가 상승하여 60분간 안정수위 5.18 m를 유지하였다. 3단계 90 m³/day 주입 후 0.12 m 수위가 상승하여 60분간 안정수위 5.05 m를 유지하였으며, 4단계 120 m³/day 주입 후 0.23 m 수위가 상승하여 60분간 안정수위 4.79 m를 유지하였다. 4단계시 양수량과 동일한 120 m³/day의 물이 안정적으로 주입되었으며, 주입정에서의 최대 주입 가능량은 120 m³/day로 산정하였다. 양수정에서 120 m³/day 양수 시 최대수위강하량은 22.08 m이며, 2~4단계 주입 시 양수정의 수위강하가 다소 지연되는 양상을 보였다.

3.2 열교환을 실험

3.2.1 지하수 유동에 의한 영향

난방시즌 밀폐형 지열시스템에서 지하수의 유동에 의한 열교환 영향을 확인하기 위하여 Mode 1(Closed loop operation only) 77시간, Mode 2(Closed loop operation + ground-water pumping) 95시간, 그리고 Mode 3(Closed loop + Open loop operation) 98시간의 열교환율을 비교하였다 (Fig. 7). 각 모드별 실험이 동시에 같은 환경에서 실시될 수 없기 때문에 기간별로 기후에 따른 운영조건 및 요일별 사용량 차이 등의 변수가 많아 정량적으로 동일한 환경을 반영하기는 어렵다. 따라서 본 시험에서는 밀폐형의 열교환율을 각 모드별로 측정된 것으로서, 다소 시간별로 불규칙한 열교환율을 나타낸다.

Fig. 7에서 지하수의 유동 없이 밀폐형만 가동하여 열교

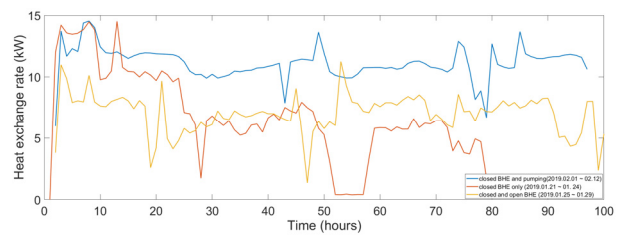


Fig. 7. Heat exchange rate time series from the operation tests with three scenarios at heating season

환된 경우 초기에는 열교환율이 14 kW 정도를 나타내었으나, 시간이 지속됨에 따라 열교환율이 5 kW 정도까지 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 밀폐형 가동과 융합지중열교환기에서 지하수 양수를 하여 주입정에 주입한 경우는 열교환율이 지속적으로 14~10 kW 정도로 높은 값들을 나타내는 것을 나타내었다. 그리고 Mode 3의 밀폐형과 개방형 시스템을 동시에 가동한 모드에서 열교환율은 다소 낮으나 일정한 값을 유지하는 특징을 보였다.

여기서 일간 외부 기온이나 가동조건이 다른 환경에서 각 모드들이 실험되었으므로 절대적인 비교는 어려우나, 이 실험 결과에서는 지하수 유동이 있는 경우 열교환율의 지속성이 유지되는 것으로 보이며, 밀폐형만 가동하는 조건에서 가동시간이 지속됨에 따라 지중 내 축열로 인한 효율이 감소되는 경향을 나타내었다. 그러므로 지하수의 유동이 지반 내 축열을 방지하고 초기 대수층 온도로 회복시키는 영향을 주는 것으로 판단된다.

3.2.2 대수층 장기 온도 모니터링

개방형 지열시스템에서 열교환 된 지하수는 주입정을 통하여 지속적으로 대수층으로 주입되며, Fig. 8은 난방시즌과 냉방시즌을 포함한 2019년 1월 21일부터 2019년 11월 1일까지 주입정과 관측정에서 30 m 심도별 온도변화를 나타낸 것이다. 개방형을 이용한 난방실험 기간은 1월 21~3월 11일, 냉방실험 기간은 7월 31~9월 4일이며, 융합정에서의 양수량은 약 86.4 m³/day이고, 2차 순환수 유량은 129.6 m³/day이다. 연구지역의 초기 지하수 온도는 약 15°C 정도이며, 주입수에 의한 주입정내 심도별 온도분포는 난방기간에 약 14~16°C이며 냉방기간에는 온도변화가 대부분 15~20°C 정도 범위로 나타났다(Fig. 8a). 여기서 주입정내에서 온도변화는 30, 60, 90 m 심도 순으로 변동폭이

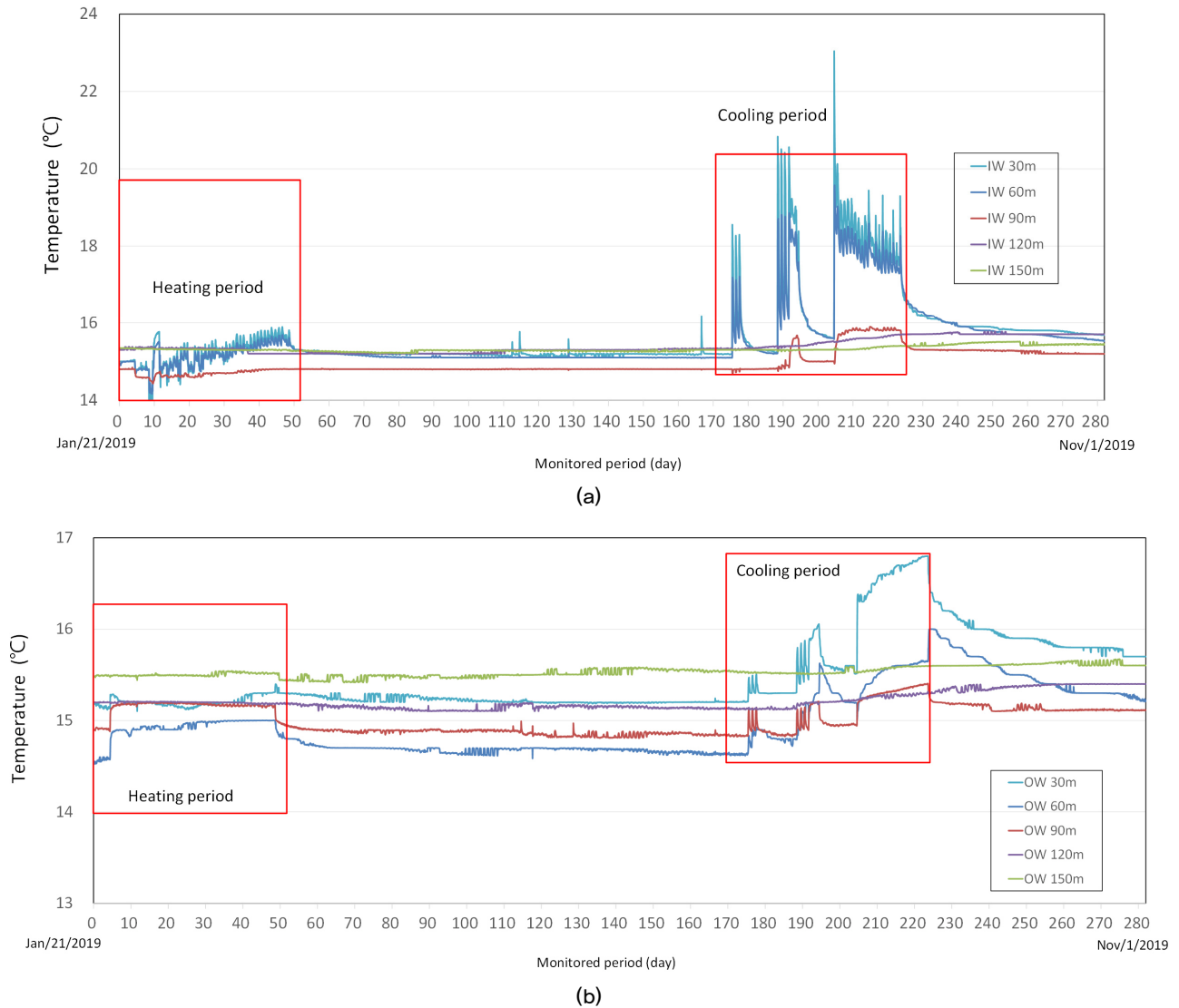


Fig. 8. Temperature time series of heating and cooling period at the depths of 30, 60, 90, 120 m and 150 m in the injection well (a) and observation well (b) from January 21st to November 1st in 2019

크게 나타나며, 초기온도보다 높게 난방기간에서 상승된 부분은 난방부하량이 크지 않고 지속적으로 가동된 수중펌프 열에 의한 영향으로 판단된다. 주입정과 관측정에서의 온도변화는 상부에서 약 90 m 까지는 변화가 뚜렷하게 나타나지만 120, 150 m 심도에서는 미미한 영향만 나타난다. 이것은 열교환된 주입수가 120 m 이하까지 거의 이동하지 못하며, 지반내 균열 대수층을 통한 지하수 유동도 미미하게 나타날 것으로 판단된다.

그리고 주입정에서의 냉방 시 열교환된 지하수가 관측정내 지하수에서는 온도변화가 급격히 감소하여 대부분

17°C 이내로 수렴하여 확산되는 것으로 나타나 비록 관정간 거리가 5 m 정도이지만 공벽과 균열대를 통과하면서 주변으로 많이 확산되어 이동하는 것으로 볼 수 있다. 양수 실험에 의한 투수량계수와 수리전도도 산출 결과 주입정내 발달된 균열의 수리성이 일반적인 암반 대수층보다 매우 크므로 주입수의 확산속도가 빠르다. 그리고 지하수 주유동 경로로서 균열대의 주향방향인 북북동 방향과 달리 동서로 배치된 공들의 방향과 달라 교차된 균열을 따라 관측정으로 혼합되는 지하수 속도가 상대적으로 느린 것으로 판단된다.

4. 결 론

국내에서는 연간 지하수 사용량이 29억톤 이상으로 지속되고 있으며, 이러한 지하수량에서 지하수열을 에너지로 전환하면 방대한 양의 에너지를 이용할 수 있을 뿐만 아니라 기후변화 대비 신재생에너지로서의 가치도 매우 크다. 국내에서는 이러한 효율이 큰 지하수열을 이용하는 복수정과 같은 개방형 지열시스템 보급이 거의 이루어지지 않고 있다. 지금까지 여러 제도적인 문제가 보급에 많은 영향을 미치고 있으며, 이로 인하여 실증 연구사례들도 매우 적다. 국내 지반은 충적층뿐만 아니라 지하수량이 풍부한 암반대수층이 분포하는 곳이 많으며 이러한 특성을 활용하여 적절한 개방형 지열 설계 및 활용 시스템 보급이 필요하다.

본 연구에서는 암반대수층을 활용한 개방형을 기반으로 융합형 지중열교환기를 개발하였으며, 수리성 실험을 위하여 단계 및 장기 양수실험을 실시하여 대수층의 적정 양수량을 $100 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 계산하였다. 그리고 주입실험을 $120 \text{ m}^3/\text{day}$ 유량으로 양수와 주입을 동시에 실시한 경우에도 융합형 지중열교환기의 지하수위 강하가 22 m, 주입정의 지하수 상승이 50 cm 이내로 수렴되었다. 따라서 히트펌프의 지하수열 활용을 위한 취수량이 적절한 대수층으로 판단되었으며, 주입정의 수리성도 양호한 것으로 확인되었다. 융합형 지중열교환기에서 밀폐형의 성능이 지하수의 유동에 영향을 받는지에 대한 평가를 위하여 세 가지 방법을 이용하여 실험을 실시하였다. 지하수 유동이 있는 조건에서는 열교환율이 지속적으로 유지되는 것으로 나타났으나 지하수의 유동이 없는 경우 지속적인 성능감소가 관찰되었다.

그리고 난방과 냉방기간 동안 주입정과 관측정에서 측정된 난방시의 온도변화도 초기온도에서 약 5°C 범위 이내로서 냉난방에 의해 대수층에 미치는 영향이 매우 제한적인 것으로 나타났다. 그리고 주입정과 관측정간의 거리가 가까운데 비하여 온도 변화가 뚜렷한 양상을 보이고 있는데, 이것은 지반 내 불균질한 균열을 따라 주입수가 이동하여 주변지하수와 혼합되어 급속히 온도가 변화하는 것으로 판단된다. 그러므로 연구지역의 대수층에서 보다 규모가 큰 냉난방 부하에서도 효율이 높은 경제적인 개방형 시스템의 활용이 가능할 것으로 사료된다. 암반대수층에서 개방형

설계는 지반 내 발달된 대수층 환경을 적절히 파악하여 양수정과 주입정간 거리 및 심도, 양수량 등의 설계 조건을 설정할 수 있다. 본 연구는 지역마다 유동적인 대수층 특성을 적용할 수 있는 개방형 지열 프로젝트를 구성하는데 도움을 줄 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 한국지질자원연구원 주요사업(21-3411)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] Ministry of Trade, Industry and Energy, 2020, "Act on promotion of development, use, and distribution of new energy and renewable energy", <http://www.law.go.kr/DRF/lawService.do?OC=bogus024&ID=000299&target=law&type=HTML>.
- [2] Lee, J.Y., 2009, "Current status of ground source heat pumps in Korea", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **13**(6-7), 1560-1568.
- [3] Chiasson, A.D., 2016, "Geothermal heat pump and heat engine systems: Theory and practice", John Wiley & Sons.
- [4] Lee, C.H., Kim, D.G., Yu, B.S., and Kim, B.I., 2020, "Study on the performance evaluation of smart heating and cooling heat pump system in a balancing well cross-conditioned ground heat exchanger", *New. Renew. Energy*, **16**(4), 41-48.
- [5] Ministry of environment, 2020, "Groundwater annual report", 11-1480000-001551-10.
- [6] Rees, S. (Ed.), 2016, "Advances in ground-source heat pump systems", Woodhead Publishing.
- [7] Bae, S., Kim, H., Kim, H., and Nam, Y., 2017, "Hydraulic feasibility study on the open-loop geothermal system using a pairing technology", *J. Korea Inst. Ecol. Archit. And Environ.*, **17**(5), 119-124.
- [8] 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”, J. Geol. Soc., **49**(6), 649-659.
- [9] Shim, B.O., and Park, C.H., 2013, “Ground thermal conductivity for (ground source heat pumps) GSHPs in Korea”, Energy, **56**, 167-174.
- [10] Shim, B.O., Lee, Y., Kim, H.C., and Song, Y., 2006, “Investigation of thermal and hydraulic characteristics for the performance analysis of a borehole heat exchanger”, J. Korean Soc. Miner. Energy Resour., **43**(2), 97-105.
- [11] VDI, V., 2010, “VDI 4640 thermal use of the Under-ground. part 1: Fundamentals, approvals, environmental aspect”, Berlin: VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (GEU).
- [12] Choi, H., Kim, J., Shim, B.O., and Kim, D.H., 2020, “Characterization of aquifer hydrochemistry from the operation of a shallow geothermal system”, Water, **12**(5), 1377.
- [13] Sophocleous, M., 2000, “From safe yield to sustainable development of water resources—the Kansas experience”, J. Hydrol., **235**(1-2), 27-43.
- [14] Kawecki, M., 1995, “Meaningful interpretation of step-drawdown tests”, Groundwater, **33**(1), 23-32.
- [15] Jacob, C.E., 1947, “Drawdown test to determine effective radius of artesian well”, Trans. Am. Soc. Civil Eng., **112**(1), 1047-1064.
- [16] Singh, S.K., 2002, “Well loss estimation: Variable pumping replacing step drawdown test”, J. Hydraul. Eng., **128**(3), 343-348.
- [17] Freeze, R.A. and Cherry, J.A., 1979, “Groundwater”, Prentice-hall, Inc., Englewood Cliffs, Vol. 7632, 604.
- [18] Duffield, G.M., 2007, “AQTESOLV for Windows Version 4.5 User’s Guide”, HydroSOLVE. Inc., Reston, VA.
- [19] Bouwer, H., 2002, “Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering”, Hydrogeol. J., **10**(1), 121-142.
- [20] Halford, K.J., Weight, W.D., and Schreiber, R.P., 2006, “Interpretation of transmissivity estimates from single-well pumping aquifer tests”, Groundwater, **44**(3), 467-471.
- [21] Jeon, S.K., Koo, M.H., Kim, Y., and Kang, I.O., 2005, “Statistical analysis of aquifer characteristics using pumping test data of national groundwater monitoring wells for Korea”, J. of KoSSGE, **10**(6), 32-44.