◎ 논 문

DOI: http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2012.15.2.020
ISSN (Print): 1226-9883

지속가능 온실 냉난방을 위한 강변여과수 취수 및 회수시스템 개발

조용* · 김대근* · 김형수** · 문종필***†

Development of Riverbank Filtration Water Supply and Return System for Sustainable Green House Heating and Cooling

Yong Cho*, Dae Geun Kim*, Hyoung-Soo Kim**, Jong-Pil Moon***†

Key Words : Temperature Difference Energy(온도차에너지), Water-Source Heat Pump(수열원 열펌프), Riverbank Filtration(강변여과), Green House(온실), Heat Source(열원), Alluvium Aquifer(충적대수층), Waterfront(친수지역)

ABSTRACT

The green house on the waterfront is air-conditioned by a water-source heat pump system with riverbank filtration water. In order to supply riverbank filtration water in alluvium aquifer, the riverbank filtration facility for water intake and recharge, two pumping wells and one recharge well, has been constructed. The research site in Jinju, Korea was chosen as a good site for riverbank filtration water supply by the surface geological survey, electrical resistivity soundings, and borehole surveys. In the results of two boreholes drilling at the site, it was revealed that the groundwater table is about 3 m under the ground, and that the sandy gravel aquifer layer in the thickness of 6.5 m and 3.5 m occurs at 5 m and 7 m in depth below the ground level respectively. To prevent the recharge water from affecting the pumped water which might be used as heat source or sink, the distance between pumping and recharge wells is designed at least 70 m with a quarter of recharged flow rate. It is predicted that the transfer term, the recharge water affects the pumping well, is over 6 months of heating season. Hydrogeological simulation and underground water temperature measurement have been carried out for the pumping and recharge well positions in order to confirm the capability of sustainable green house heating and cooling.

1. 서 론

2008년 국내의 시설원예 면적은 53,408 ha이고, 이 중 약 25 %에 해당하는 13,329 ha는 동절기 난방시스템이 필요하다. 2008년 말 기준 농가에 공급된 면세유의 약 60 %는 시설원예의 난방에 사용된 것으로 추정된다. 최근 유가급등으로 인해 시설원예 농가들의 난방비용 부담이 크게 증가하였으며, 재배한 농산물의 가격경쟁력은 더욱 어려워지게 되었다. 이에 농작물 재배에 있어 에너지 절감기술의 적용은 필수가 되었으며, 최근 에너지 효율이 높은 지열 열펌프를 적용하는 사례가 증가하고 있다.[1~3] 하지만, 지중열교환기를 필요로 하는 지열 열펌프는 농작물 재배지 외에 지중열교환기를 설치할 부지가 추가로 필요하게 되어 여유부지가 없는 경우에는 설치를 할 수 없게 된다.

한편, 하천수, 지하수, 해수 등의 수열원을 열펌프 열원으로 활용하는 냉난방시스템의 경우에는 추가 부지에 대한 요구가 없어 시설원예 냉난방시스템으로 관심을 받고 있다. 국내 시설원예단지는 대부분 바다와는 멀리 떨어져 있어 해수 이용이 곤란하고, 주로 강가에 위치하고 있어 지하수 또는 강변여과수 이용이 용이한 편이다. 강변여과수는 하천수 또는 댐호소수가 지층을 필터로 활용하여 걸러지는 물로서, 지열의 영향을 받아 지하수와 같이 연중 수온변화가 적어 수열원 열펌프의 열원으로 활용가치가 크다.

수열원 열펌프는 일반적으로 지하수, 원수, 강변여과수 등을 열원으로 건물의 냉난방에 사용되고 있다. Hwang et al.[4]은 강변여과수를 열원으로 하는 냉난방시스템을 개발한 바 있으며, 수돗물 생산을 위해 취수된 강변여과수 중 일부를 냉난방 열원으로 이용함으로써 냉난방시스템의 가능성을

* 한국수자원공사 K-water연구원
** 중원대학교 에너지자원공학부
*** 농촌진흥청 국립농업과학원
† 교신저자, E-mail : jpmoon2002@korea.kr

보여주었다. Hahn et al.[5]은 강변여과수와 천부 지하수를 이용하는 열펌프 시스템은 대체적으로 지중열교환기를 설치한 지열펌프 시스템보다 성능이 우수하고, 훨씬 적은 유량으로 충분한 성능을 발휘할 수 있음을 보인 바 있다.

Nam and Ooka[6]는 지하수열원 열펌프의 냉난방 성능을 분석하였다. 이 시스템은 지하수의 취수 깊이와 물의 온도에 성능이 좌우되는 것을 확인하였고, 공기열원 열펌프의 성능보다 보다 효율이 높음을 확인하였다. 또한, Nam 등[7]은 지하수와 대기를 열원으로 활용할 수 있는 하이브리드 시스템을 개발하고 관련 연구를 수행하였다. 봄과 가을에는 지하수의 온도가 대기의 온도와 역전되는 기간이 있어 냉난방시 보다 효율적인 열원을 사용하도록 시스템을 구성하였으며, 이를 통해 수열원 대비 2~7 %, 공기열원 대비 4~18 %의 성능이 향상됨을 실증하였다.

수돗물 생산을 위해 댐 또는 하천으로부터 취수하는 원수 또한 수열원 열펌프의 좋은 열원이 될 수 있다. Cho and Yun[8]은 대청댐에서 취수한 원수를 이용한 물-공기 형식의 멀티 히트펌프 시스템의 성능을 분석하였고, 시스템의 냉난방 성능은 원수 수온뿐만 아니라 냉난방 부하율 또한 상당한 영향을 받는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 지속적인 온실 냉난방을 위해 수열원 히트펌프의 열원을 직접 개발하였다. 수열원 히트펌프의 열원으로 공급할 취수 관정과 열원 이용 후 지중으로 재주입할 회수 관정을 개발하고, 온실 냉난방을 위한 수열원 히트펌프 시스템을 구성하였다. 냉난방시스템의 성능을 조사하고, 지속가능한 온실 냉난방을 위해 강변여과 지하수 열원의 변화를 분석하고자 한다.

2. 대상지역 탐사 결과

시설원예란 대형 플라스틱 터널 필름 하우스 및 유리온실 등과 같은 시설 안에서 채소, 화훼, 과수를 집약적으로 재배 생산하는 것을 말한다. 이러한 대규모 시설원예 재배지 중에서 강변여과수의 활용이 가능한 입지를 조사하고 충적층 발달여부를 사전에 조사하고자 현장조사, 전기비저항 탐사 및 시추조사를 실시하였다.

2.1 육안 및 현장조건 조사

경남 진주시 대곡면에 위치한 실증 사이트는 시설원예 단지가 밀집한 지역으로서 파프리카, 고추, 토마토, 피망, 딸기, 호박, 멜론 등을 주로 재배하는 지역이다. 동 지역은 남강댐 하류 약 22 km 지점에 위치하고 있으며 남강댐 하류방향으로 제방 좌측면에 위치하고 있다. 제방으로부터 약 200 m 정도 떨어져 있어 강변여과수를 이용할 수 있는 입지조건은 양호한 것으로 판단된다.

과거 이 지역은 하천부지였으나 현재는 폐천부지로서 재배농가는 폐천부지 점용허가를 득하여 파프리카를 재배하고 있다. 작물의 생육에 필요한 낮 최고온도는 약 30 ℃, 심야 최저온도는 약 18 ℃, 일 평균 온도 22 ℃를 유지해야 한다. 파프리카는 고소득 작물로 동절기 난방이 필요하고, 하절기 냉방을 실시할 경우 생육기간을 늘릴 수 있어 수열원을 이용한 히트펌프 냉난방시스템을 적용할 경우 재배농가의 경제적 이익이 많을 것으로 판단된다.

2.2 전기비저항 탐사 결과

실증 사이트 주변의 대수층 확인을 위해서 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 온실 주변 3개의 지점(1st, 2nd, 3rd 측선)을 지정하여 전기비저항 수직탐사를 실시하였다. 3개의 지점은 중심에서 좌우측으로 각각 50 m 연장하여 탐사를 실시하였고, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

첫 번째 측선의 결과를 보면, 지하 약 1~6 m 지점은 전기저항도가 높은 층이 나타나는 것으로 판단되어 지하수 부존가능성이 낮고, 지하 약 6~17 m 지점에 대수층이 존재하는 것으로 판단된다. 두 번째와 세 번째 측선에서의 결과는 첫 번째 측선 결과와 유사하며, 지하 약 1~7 m 지점은 대수층이라 보기엔 어렵다고 판단되고 지하 약 7 m부터 대수층이 존재할 가능성이 있는 것으로 판단된다.

2.3 시추조사 결과

전기비저항 탐사결과를 참고하여 시추 가능한 두 지점(BH-1, BH-2)을 선정하여 Fig. 1에 나타내었고, 시추결과 두 지점의 지층을 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 두 지점에서 지하 20 m 깊이로 시추하였으며, BH-1 공의 지하 수위는 약 3.0 m, BH-2공의 지하수위는 약 2.6 m로 나타났다. 지표로부터 실트질모래층, 모래자갈층, 풍화토, 풍화암, 연암 순으로 지층이 구성되어 있으며, 모래자갈층으로 구성된주대수층은 BH-1공의 경우 7.0 m~10.5 m로 3.5 m의 두께를 갖고, BH-2공의 경우 5.0 m~11.5 m로 6.5 m의 두께를 갖는 것으로 나타났다. 시추조사 과정 중 수행된 정수위 투수시험결과 주

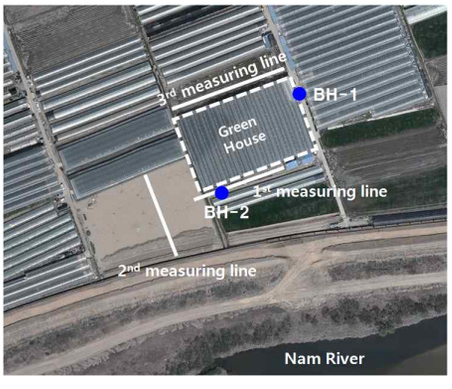
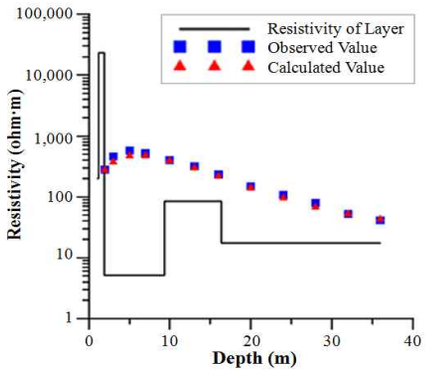
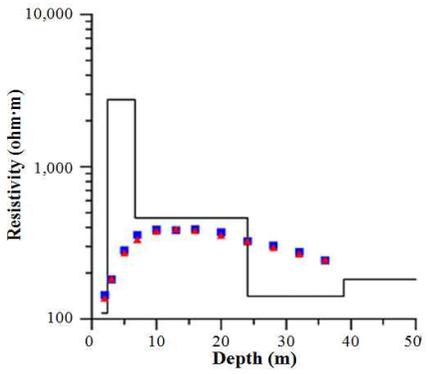


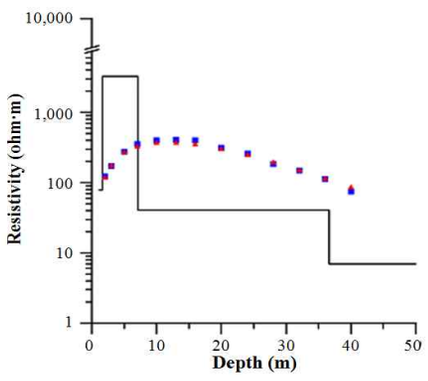
Fig. 1 Three measuring lines for electrical resistivity soundings and two borehole locations for borehole surveys at the site



(a) 1st measuring line



(b) 2nd measuring line



(c) 3rd measuring line

Fig. 2 Electrical resistivity for three measuring lines

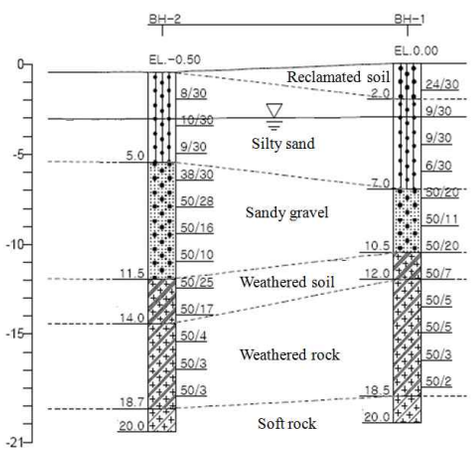


Fig. 3 Geological strata for two boreholes

대수층인 모래자갈층의 수리전도도는 약 1×10^{-3} cm/sec로 나타나 1,000 m³/day의 취수량 개발이 가능할 것으로 판단된다.

2.4 수질조사 결과

물 속의 Fe, Mn 등의 이온성분은 배관 내 스케일을 생성하므로 이에 대한 검토가 필요하다. 또한, 열원으로 사용한 물을 100 % 회수하지 못하고 방류하는 경우 주위 농사를 짓는데 사용될 수 있는지 농업용수로서의 적격여부를 판단할 필요가 있어 수질조사를 진행하였다.

현장에서 측정한 수온의 경우 한겨울인 1월에 BH-1공과 BH-2공의 경우 각각 15.3 ℃와 13.1 ℃로 측정되어 히트펌프 열원으로 상당히 좋은 수온을 갖는 것으로 나타났으며, pH농도는 6.6~6.7로 적합하게 나타났다.

이온성분에 대한 수질분석 결과에서는 Fe 이온의 경우 BH-1공에서 1.13 mg/L, BH-2공에서 3.81 mg/L로 높게 나타났으며, Mn 이온 또한 0.058 mg/L와 0.067 mg/L으로 나타났다. 따라서 Fe, Mn 이온을 저감할 수 있는 여과장치를 구축하여 관내 스케일을 예방할 필요가 있는 것으로 판단된다.

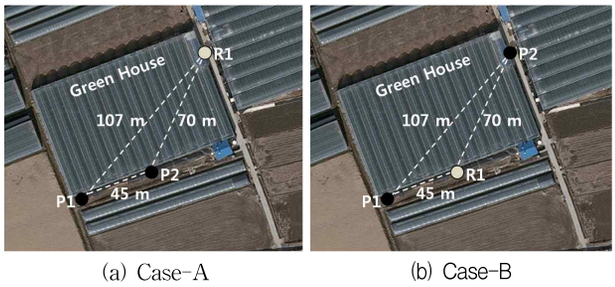
한편, 농업용수로의 적합성 여부 판단을 위해 농업용수 수질기준 14개 항목에 대한 수질검사를 실시한 결과, 건강상 유해영향 유기물질인 Cd, As, CN, 유기인 등의 기준항목에서 불검출 판정을 받거나 농업용수의 적정기준범위 내로 존재하여 농업용수로의 적합성을 확인하였다.

3. 취수 및 회수시스템 개발

3.1 관정 개발위치 검토

시설원예 주변에는 관정을 개발할 여유부지가 많지 않아 관정 및 회수공 개발 지점이 매우 제한적이므로, 제한적인 공간범위 내에서 60RT급 히트펌프 열원을 충분히 개발할 수 있는 관정 개발 위치선정이 중요하게 된다.

열원으로 사용할 물의 안정적 취수를 위해 취수정은 2곳을 개발하고, 회수정에 주입된 물이 취수정까지 영향을 주게 되는 양수 온도변화 영향을 고려하여 제한된 부지 조건에서는 회수정을 1곳만 개발하기로 하였다. 이러한 조건으로 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 두 가지 안을 도출하였다.



(a) Case-A (b) Case-B

Fig. 4 Pumping and recharge wells locations

Table 1 Transfer term that the recharge water affects the pumping well

(unit: day)

Recharge (m^3/day)	Case-A		Case-B	
	P1	P2	P1	P2
1,000	108	46	19	46
500	216	92	38	92
250	432	185	76	185
200	540	231	95	231

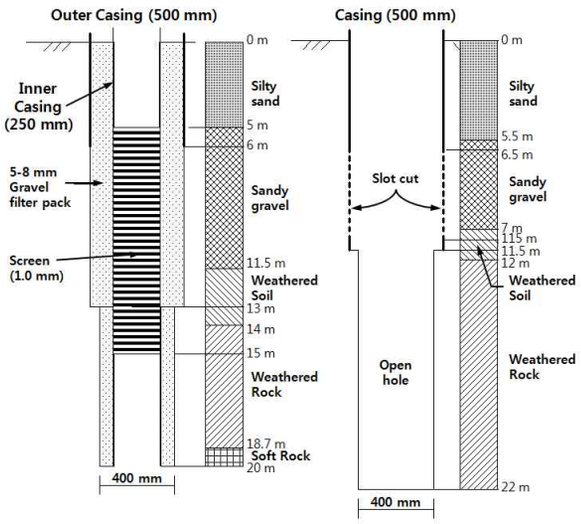
Case-A는 충적대수층이 발달한 시설원예 남측에 취수정 2곳을 개발하고, 상대적으로 충적대수층이 덜 발달한 시설원예 동편에 회수정 1곳을 개발하는 설계안이다. 이는 취수정과 회수정간의 이격거리가 커서 회수된 물이 취수정까지 영향을 미치기 어렵지만, 취수공간의 이격거리가 짧아 취수량에 영향을 줄 수 있는 단점이 있다. Case-B는 취수공간의 이격거리를 크게 하고자 시설원예 남측과 동편에 취수정을 각 1곳씩 개발하는 설계안으로, 회수정과 취수정간의 이격거리가 짧아져 회수된 물이 비교적 짧은 시일 내에 취수정에 영향을 미칠 수 있게 된다.

피압지하수의 우물집수를 예측하는 Thiem 식을 이용하여 취수량을 예측한 결과, Case-A와 Case-B는 각각 600~2,260 m^3/day와 530~2,000 m^3/day로 예측되었다. 따라서 안정적인 취수량 확보에 있어 Case-A가 유리한 것으로 확인되었다.

회수공에 주입한 물이 취수관정의 온도변화에 미치는 도달시간을 회수량에 따라 예측하여 Table 1에 나타내었다. 물-물 타입의 수열원 히트펌프는 일반적으로 축열조를 갖추고 있어 히트펌프의 동작시간은 일 12시간을 넘지 않을 것으로 예측하며, 두 취수정에서 취수한 물을 하나의 회수정에 모두 회수할 수 없으므로 회수량을 200 m^3/day까지 검토를 하였다. 회수한 물은 회수정과 가까이 위치한 취수정에 먼저 영향을 미치고 있다. 200 m^3/day 회수를 하는 경우 Case-A는 취수정2에 영향을 미치는 시간이 231일로 난방기간 6개월(180일) 이상인 반면, Case-B는 취수정1에 영향을 미치는 시간이 95일로 난방기간 내에 영향을 미치는 것으로 예측되었다. 따라서 안정적인 취수량 확보와 회수한 물의 도달시간에서 보다 유리한 Case-A의 취수정과 회수정 위치를 최종적으로 선정하였다.

3.2 취수정 및 회수정

취수정과 회수정은 Fig. 5와 같이 상부는 500 mm의 직경으로 케이싱을 구성하고 풍화토 하단부터는 400 mm 직경으로 관정을 설계하고 구축하였다. 취수정1에 대한 시추조사 결과에 따르면 실트질 모래가 지하 5.0 m까지 분포하므로, 외부케이싱은 실트질 모래의 유입을 방지하고자 지하 6.0 m까지 설치하였고, 내부케이싱은 250 mm의 직경으로 스크린



(a) Pumping well (P1) (b) Recharge well

Fig. 5 Schematic diagram of pumping and recharge wells

을 구성하여 설치하였다. 스크린의 슬롯 크기는 1.0 mm이며 주대수층과 풍화토를 포함할 수 있도록 길이를 10 m로 구축하였고, 그 결과 슬롯 내 유입속도는 0,0025 m/s로 산정되어 제한기준인 0.03 m/s보다 충분히 작았다. 그리고 일반적으로 100 m 이상 굴착하는 지하수 관정과 비교하여 취수정과 회수정의 굴착 깊이는 20 m와 22 m로 상당히 얕아 시공시 관정 구축비용을 절감할 수 있었다.

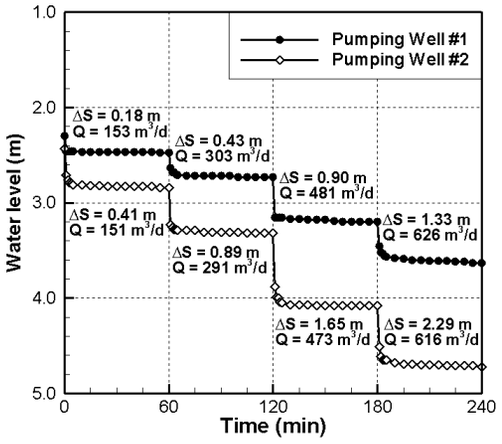
한편, 취수정의 여재는 현장 대수층의 입도분석결과를 기준으로, 미국 EPA[9]와 Driscoll[10]에 의한 D30 Technique을 이용하여 3~6 mm로 설계하였으나, 실제 시공은 구매가 용이한 5~8 mm 여재로 구축하였다.

Fig. 5에는 취수정1에 대한 단면만 나타내었는데, 취수정2의 경우 현장 굴착시 실트질모래층이 지하 6.0 m까지 분포되는 것으로 확인되어 외부케이싱을 지하 7.0 m까지 설치하고, 스크린은 모래자갈층인 상부인 지하 6.0 m부터 16.0 m까지 설치하였으며, 지하심도는 취수정1보다 2.0 m 더 깊은 22.0 m까지 굴착하였다.

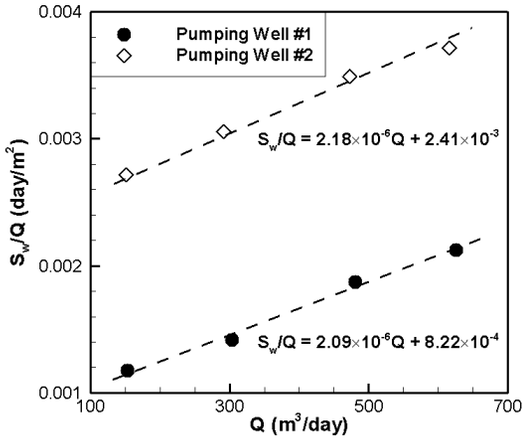
회수공의 경우 지하 11.5 m까지 외부케이싱을 설치하였고, 지하 6.5 m에서 10.5 m 구간에 외부케이싱에 회수를 위한 슬롯 가공을 하여 주입된 물이 회수될 수 있도록 하였으며, 지하심도는 22.0 m까지 굴착하였다.

3.3 양수시험 결과

대수층의 수리특성을 조사하고 취수관정의 안정취수량을 산정하기 위하여 단계양수시험, 장기양수시험, 수위회복시험을 수행하였다. 단계양수시험은 150 m^3/day, 300 m^3/day, 450 m^3/day, 600 m^3/day의 유량에 대하여 4단계로 나누어 1시간씩 시험을 실시하고, 장기양수시험은 24시간동안 500 m^3/day의 유량에 대하여 실시하였으며, 수위회복시험은 6시간 동안



(a) Time-drawdown



(b) Specific drawdown for pumping rate

Fig. 6 Results of step-drawdown tests

실시하였다.

60RT 히트펌프를 가동하기 위하여 최대 1,000 m³/day의 열원이 필요하게 되어 본 관정의 안정취수량으로 가능한지 조사하였다. 안정취수량이란 지하수 회수조건, 인근 우물에 대한 수리간섭, 잠재오염원의 영향, 정호 효율, 영향권, 양수시간 등을 고려하여 결정되는데 한계취수량을 초과해서는 안된다. 한계취수량은 지하수 고갈, 오염물질 유입, 지반침하 등과 같은 지하수 장애를 일으키지 않으면서 관정의 지하수위 강하를 최대로 하였을 때 취수 가능한 지하수량으로 본 연구에서는 단계양수시험 결과를 기준으로 산정하였다.

관정의 수위강하는 대수층의 수두손실과 관정에 의한 수두손실의 2가지로 구성되므로 Rorabaugh[11]는 관정 수위강하를 식(1)과 같이 표현하였다.

$$S_w = BQ + CQ^n \tag{1}$$

여기서, S_w는 총수위 강하, BQ는 대수층 수두손실, CQ^n은 관정 수두손실이며, n은 1.5~2.5이다.

단계양수시험을 150 m³/day에서 600 m³/day까지 150 m³/day 간격으로 4단계로 나누어 1시간씩 시험을 실시하였고, 그 결과를 Fig. 6(a)에 나타내었다. Fig. 6(a)은 취수량에 따른 수위강하를 나타내고 있으며, 대수층에서 유입되는 유량이 상당히 많은 관계로 600 m³/day까지 시험을 하는 동안 단계별 1시간 시험 과정 중 초기 5분 내에 안정된 수위를 찾아가고 있음을 확인할 수 있다.

수위강하량을 나타내는 식(1)에서 $n=2$인 경우 양변을 양수량 Q로 나누면 식(2)로 나타나게 된다.

$$\frac{S_w}{Q} = B + CQ \tag{2}$$

수위강하량을 양수량으로 나눈 값을 비수위강하량(S_w/Q)이라고 하며, 비수위강하량은 양수량에 대한 1차 함수로서 선형적인 관계가 된다. 단계양수시험을 수행하면서 단계별로 양수량을 변화시키면 일정한 수위강하가 발생한 후 수위가 안정되는 경향을 나타내며, 한계취수량를 넘어서게 되면 수위가 안정되지 못하고 계속 낮아지게 된다. 이는 한계취수량보다 적은 양수량에 대해서는 비수위강하량이 식(2)와 같이 선형적인 관계를 나타내지만, 한계취수량을 넘어서게 되면 선형적인 관계를 나타내지 못하게 된다. 이를 확인하고자 양수량에 따른 비수위강하량을 Fig. 6(b)에 나타내었다.

본 연구에서는 5.0 hp의 모터를 장착한 펌프를 이용하여 양수시험을 진행하였으며, 이 펌프의 최대 양수량까지 시험을 한 결과, 취수정1은 626 m³/day, 취수정2는 616 m³/day까지 양수시험을 진행하였다. Fig. 6(b)의 결과에서도 알 수 있듯이 펌프 최대 양수량까지는 양수량과 비수위강하량이 선형으로 나타나고 있다. 이 결과를 바탕으로 식(1, 2)로 나타내어진 수위강하 관련된 상수를 구할 수 있으며, 선형회귀분석을 통해 취수정 1과 취수정2의 비수위강하량은 각각 식(3)과 (4)로 나타낼 수 있다.

$$S_w/Q = 2.09\times10^{-6}Q + 8.22\times10^{-4} \tag{3}$$

$$S_w/Q = 2.18\times10^{-6}Q + 2.41\times10^{-3} \tag{4}$$

Choi et al.[12]은 선형회귀직선 식에 수위강하량(S_w)을 대입하여 최적취수량을 산정한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 각 취수정의 최대 수위강하량을 예측하여 안정취수량을 산정하게 되었다.

진주 현장은 거시적으로는 자유면대수층으로 볼 수 있으나 국부적으로는 피압대수층으로 볼 수도 있어, 안정취수량을 자유면대수층과 피압대수층인 경우로 가정하여 각각 산정하였다. 자유면대수층인 경우에는 관정효율을 감안할 때 최대 수위강하량을 대수층 바닥 불투수층으로부터 자연수위까지의 높이의 2/3일 때의 취수량을 안정취수량으로 산정하

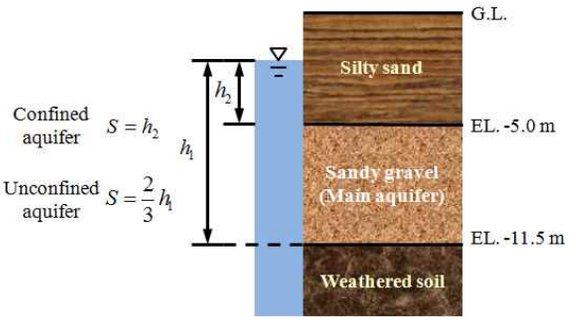


Fig. 7 Estimation of Max. drawdown for confined and unconfined aquifer

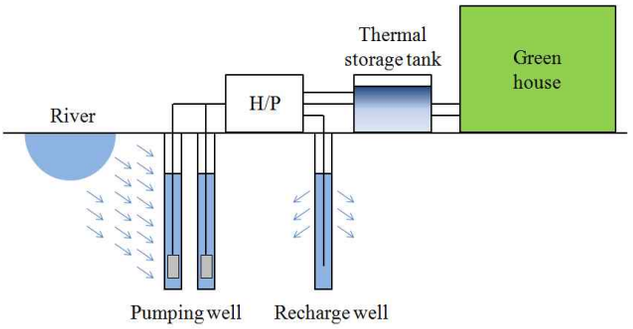


Fig. 8 Schematic diagram of green house heating and cooling system

Table 2 Predicted stable pumping rate

Well	Confined aquifer		Unconfined aquifer	
	S_w (m)	Q (m³/d)	S_w (m)	Q (m³/d)
P1	2.70	957	6.13	1,527
P2	2.57	666	6.05	1,202

Table 3 Heat pump capacity

Model (Refrigerant)	H/P capacity (kW)		Power consumption (kW)	
	Heating	Cooling	Heating	Cooling
HP-0300WW (R407)	133.0	105.0	33.0	21.5

고, 피압대수층인 경우에는 자연수위에서 주대수층의 상부에 도달하지 않는 범위 내에서 최대 수위강하량을 적용하여 안정취수량을 산정하였다. Fig. 7은 피압대수층과 자유면대수층인 경우 최대 수위강하량을 나타내고 있으며, 취수정1과 취수정2의 자연수위는 각각 EL.−2.30 m와 EL.−2.43 m일 때 안정취수량을 산정하여 Table 2에 나타내었다.

자유면대수층인 경우 최대 수위강하량이 크기 때문에 안정취수량이 크게 예측되었다. 피압대수층으로 가정하더라도 취수정1과 취수정2의 안정취수량은 각각 957 m³/day과 666 m³/day으로 산정되었다. 따라서 본 연구를 통해 개발된 두 관정에 대한 안정취수량은 1,623 m³/day이며, 시설원예 냉난방을 위한 60RT급 히트펌프열원으로 1,000 m³/day을 공급하는 데는 충분할 것으로 판단된다.

4. 온실 냉난방시스템과 지속가능성

4.1 온실 냉난방시스템의 구성

시설원예 냉난방시스템의 구성도를 Fig. 8에 나타내었다. 2개의 취수정에서는 강주변의 여과수 700 lpm(≃ 1,000 m³/day)을 취수하여 히트펌프의 열원으로 공급한 후, 회수정을 통해 다시 지중으로 환원하고 있다. 히트펌프는 Table 3에 나타낸 30 RT 용량 2대가 설치되어 운전된다. 생산된 열은 110 m³(=3.2 m×10.0 m×3.5 m)용량의 격판분리 축열조에 저장을 하며, 온실 내부의 온도를 모니터링하여 냉난방이 필요한 경우 축열조에 저장된 열을 공급하도록 되어 있다.

4.2 냉난방시스템의 성능

4.1과 같이 구성한 시설원예 냉난방시스템을 가동하면서 시스템의 성능을 측정하였다. 두 취수정의 수심별 수온 및 히트펌프, 축열조, 온실의 유입, 유출수의 온도를 측정하고, 각 배관에서의 유량과 소비전력량을 측정하였다. 이러한 데이터를 기반으로 식 (5), (6)을 이용하여 히트펌프의 성능계수를 산정하였다.

$$COP_{unit} = \frac{Q}{W_{hp}} = \frac{c\rho\dot{q}\Delta t}{W_{hp}} \quad (5)$$

$$COP_{sys} = \frac{Q}{W_{sys}} = \frac{c\rho\dot{q}\Delta t}{W_{hp} + W_{pump1} + W_{pump2} + W_{pump3}} \quad (6)$$

Q는 히트펌프의 생산열량이며, 이는 히트펌프 부하측 물의 비열(c), 밀도(ρ), 유량($\dot{q}$), 유입유출수의 온도차(Δt)의 곱으로 나타낼 수 있다. W는 소비전력량으로 히트펌프 유닛 성능계수는 히트펌프의 소비전력량(W_{hp}) 대비 히트펌프의 생산열량의 비로 나타내어지고, 전체 냉난방시스템의 성능계수는 히트펌프의 소비전력량 뿐만 아니라 여과수 취수펌프(W_{pump1}), 축열조 펌프(W_{pump2}), 온실순환펌프(W_{pump3})의 소비전력량을 모두 합하여 산정하게 된다.

Table 4는 2011년 2월부터 4월까지 난방기간 동안의 히트펌프 열원으로 사용하는 여과수의 온도와 월평균 히트펌프 유닛 및 시스템 성능계수를 나타내고 있다. 지중의 여과수는 대기의 온도 변화의 영향을 받는데 상당한 시일이 소요되어, 대기의 온도는 2월부터 점차 상승하게 되지만, 여과수의 온도는 오히려 2월 14.4 ℃에서 4월에는 11.8 ℃로 떨어지게 된다. 이러한 특징을 갖는 여과수는 겨울철 난방시 따뜻한 수온을 유지하고, 여름철 냉방시 차가운 수온을 유지할 수 있어

Table 4 Monthly averaged COP

Month	T_{water} (℃)	COP_{unit}	COP_{sys}
February	14.4	4.5	3.3
March	13.8	4.2	3.1
April	11.8	4.0	2.9

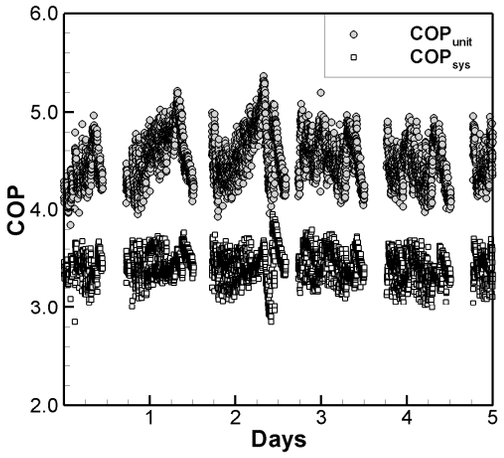


Fig. 9 COP variations for 5 days from March 1, 2011

히트펌프의 열원으로서 보다 장점을 갖게 된다.

식(5)와 (6)을 이용하여 산정한 성능계수는 난방열원인 여과수의 수온이 점차 내려감에 따라 유닛 성능계수의 경우 2월 4.5에서 4월에는 4.0으로 낮아지고, 시스템 성능계수도 3.3에서 2.9로 점차 낮아지는 특징을 나타낸다.

한편, Fig. 9는 3월 1일 0시부터 5일 동안 1분 간격으로 측정한 유닛 성능계수와 시스템 성능계수를 나타내고 있다. 5일 동안에는 여과수 온도의 변화가 크지 않아 일평균 성능계수는 거의 일정하며, 히트펌프 운전시 축열조의 온도와 온실냉난방을 위한 순환펌프의 동작 여부에 따라 성능계수의 변화가 나타나고 있다.

저녁에 난방이 시작되면서 낮시간 동안 축열조에 저장한 열과 히트펌프 가동으로 생산한 열을 이용하여 온실을 난방하게 되며, 축열조의 수온이 점차 내려감에 따라 히트펌프의 성능계수는 증가하는 경향을 나타내고, 축열조 수온이 상승하게 되면 히트펌프의 성능계수는 감소하는 경향을 나타낸다.

해가 뜨는 아침이 되면 온실에서는 햇빛을 받기 위해 천장 커튼이 열리게 되고, 온실 내부 온도를 유지하기위해 난방이 가속화된다. 이 후 온실 내부 온도를 유지하게 되면, 햇빛으로 인해 온실 난방이 중지되어 온실 순환펌프가 가동을 멈추게 되고, 히트펌프는 축열조에 축열하기 위해 가동이 계속된다. 온실 순환펌프가 가동을 멈춤으로 인해 소비전력량이 조금 감소되어 시스템 성능계수의 경우 조금 증가하는 패턴을 나타내며, 이 후 축열조 축열로 인해 축열조 온도가 상승하여 성능계수는 감소하는 패턴을 나타내게 된다.

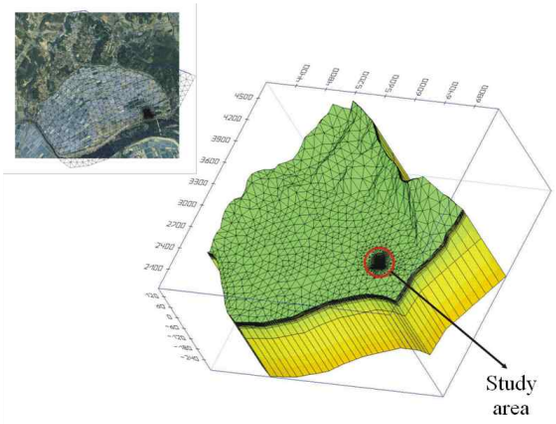


Fig. 10 Computational domain for hydrogeological simulation

4.3. 지속가능성에 대한 예측

여과수를 이용하여 냉난방을 지속하는 경우 여과수의 지하수위와 온도 변화를 예측해 보았다. 회수를 지속함으로 인해 장기간 동안 여과수의 온도 변화를 예측하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다.

현장 주위의 수치지도와 현장 시추조사 자료, 남강 수위변화 자료, 하천수 온도변화 자료, 진주지역 기온 및 강우자료를 기반으로 수치 모델링을 하였으며, Fig. 10은 구축된 모델에 대한 전체 해석 영역과 격자를 나타내고 있다. 양수와 회수가 진행되는 지역은 100m×100 m 내외 이지만, 주변의 지하수 흐름과 열 흐름 평가를 위해 3,000 m×2,000 m의 넓은 영역을 모델링하였다. 연구지역의 지하 지질구조는 Fig. 3에 나타낸 시추조사 결과에 기반하여 수치 모델링을 위한 물리적인 층은 5개, 계산을 위한 층은 총 16개로 구분하였다.

지하수와 열의 흐름은 지하 수두와 온도의 경사도에 지배받게되어, 수리지질 모델링의 지배방정식(7)~(10)으로 표현된다.

$$\rho^g c^g \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T - \rho^f c^f \boldsymbol{q} T) + H \tag{7}$$

$$\boldsymbol{q} = -\boldsymbol{K}(\nabla h + \chi \boldsymbol{e}) \tag{8}$$

$$\boldsymbol{K} = \frac{\boldsymbol{k}\rho^f g}{\mu^f} \tag{9}$$

$$S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (\boldsymbol{K}(\nabla h + \chi \boldsymbol{e})) + Q \tag{10}$$

T, λ, $\boldsymbol{q}$, H는 각각 온도, 열전도 계수, Darcy 속도, 열원을 나타내고, 위 첨자 g와 f는 지질과 지하수를 각각 나타낸다. 식(8)의 $\boldsymbol{K}$는 수리열전도계수, h는 수리 수두, χ는 부력 계수, $\boldsymbol{e}$는 중력가속도 방향벡터를 나타낸다. 또한, $\boldsymbol{k}$는 투수 텐서, g는 중력가속도, μ는 점성계수를 나타낸다.

지배방정식을 통해 지하수리의 열과 유동을 예측하게 되

며, 본 연구에서는 FEFLOW라는 프로그램을 이용하여 해석을 수행하였다.

전체 영역의 북측과 일부 동측 경계에서는 산지 분수령에 해당되는 지역으로 이 경계를 통과하는 지하수 흐름은 없는 것으로 가정하여 no flux 경계조건을 설정하였다. 남측 경계는 하천으로 하천 바닥을 통해 하천수와 지하수가 수두 차에 따라 상호 이동할 수 있는 혼합 경계조건을 설정하였고, 동측 일부는 지하수위의 변화가 특별히 크게 나타나지 않을 것으로 판단되어 일정 수두 경계조건을 설정하였다. 마지막으로 지표에서 강수에 의해 지하로 유입되는 회수량은 기상청의 30년간 월평균 강수량 자료를 참조하여 강수량의 20%가 지하로 침투하는 것으로 가정하였다.

냉난방시기는 진주지역의 30년간 기온 데이터 및 현장 조사를 바탕으로 11월부터 4월까지 6개월간 난방을 하고 7월부터 8월까지는 냉방을 수행한다고 가정하였다. 5~6월과 9~10월은 평균기온이 15~20 ℃ 내외로 이 시기에는 냉난방을 수행하지 않는 휴지기로 설정하였다.

두 취수정에서는 500 m³/day을 취수하고, 회수정에서는 취수한 물 100 %(=1,000 m³/day)를 회수하는 경우와 50 %(=500 m³/day)를 회수하는 경우로 구분하여 해석을 진행하였다. 히트펌프는 Fig. 9의 운전패턴과 같이 하루 24시간 중 약 18시간 운전이 되지만, 장기간 동안의 변화를 예측하는 모델링에서는 24시간 운전하는 것으로 가정하여 가혹한 조건을 설정하였다. 회수하는 물의 온도는 난방시 10 ℃, 냉방시 25 ℃로 가정하였으며, 이는 인접한 진주 초전 국가지하수 관측소의 자료에 근거하여 연구지역 충적층의 수온은 7~17 ℃이며, 히트펌프에서 열원을 이용한 후 회수하는 물의 온도를 가정하였다.

양수 및 회수가 일어나지 않은 상태로 10년간 자연적인 지하수위 및 온도변화를 예측하여 초기조건으로 설정하였으며, 이 후 10년 동안의 지하수위와 온도를 예측하였다.

Fig. 11은 회수량이 500 m³/day인 경우와 1,000 m³/day인 경우 지하 12 m에서 시간에 따른 지중온도 분포를 나타내고 있다. Fig. 11(a-1)에는 Fig. 4(a)에 나타낸 두 취수정(P1, P2)과 회수정(R1)의 위치를 나타내었다. 1월부터 시뮬레이션을 시작하여 난방이 종료되는 4월 말까지 약 120일 후, 5~6월의 휴지기 종료시점의 약 181일 후, 7~8월의 난방시점 종료시점인 약 243일 후, 9~10월의 휴지기 종료시점인 304일후, 마지막으로 10월부터 다음해 4월까지 난방을 한 후 시점인 485일 후의 온도분포가 비교되고 있다.

약 120일 후인 (a-1)과 (b-1)의 결과를 비교해보면 회수량이 많은 경우가 회수정 주위의 보다 넓은 지역에 온도변화 영향을 미치고 있으며, 이러한 경향은 계속 반복되고 있다.

(a-1), (a-2)의 결과와 (b-1), (b-2)의 결과를 비교해보면 난방이후 휴지기 동안에는 지중온도가 조금 확산만 이루어지고 변화가 크게 일어나지 않고 있음을 확인할 수 있다.

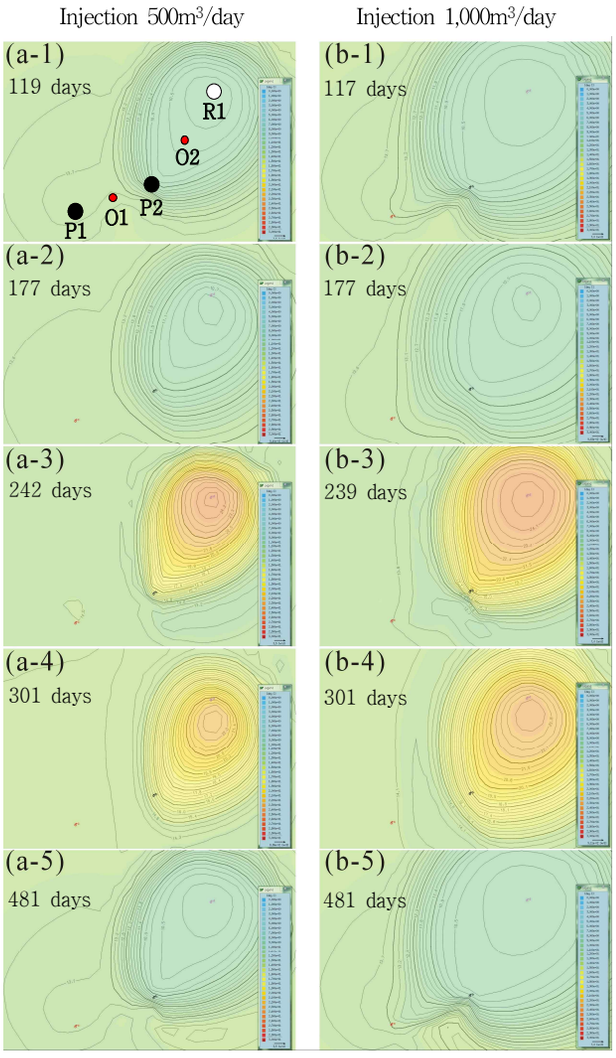


Fig. 11 Predicted temperature in aquifer(z=GL-12m)

냉방을 시작하는 시점에서 취수정2는 동절기 회수한 물의 영향을 받고 있어 냉방초기 히트펌프 경제적 운전에 유리한 찬 물이 유입될 것으로 예측된다.

냉방시에는 회수정에 25℃의 물이 회수되며, 이로 인해 난방 종료시점에는 취수정2까지 회수한 물의 영향이 나타나는 것으로 예측되었다. 냉방 이후의 휴지기에는 냉방 이후 휴지기와 유사하게 온도변화는 크게 나타나지 않고 있으며, 난방을 시작하는 시점에 취수정2는 따뜻한 회수한 물의 영향을 받고 있어 난방 초기에 취수정1에 비해 상대적으로 따뜻한 물을 취수하여 냉난방을 경제적으로 수행하는 데 도움이 될 것으로 평가된다.

이후 6개월 동안 난방이 지속되면서 10 ℃의 물이 회수되며, 취수정 2는 회수한 물의 영향을 받게 되고 취수정 1은 (b-5)에서 나타난 바와 같이 1,000 m³/day을 회수하는 경우 미미하게 영향을 미치는 것으로 예측되었다.

회수정과 상대적으로 가까운 취수정2는 회수한 물의 영향을 받게 되어 냉난방 초기에는 상대적으로 히트펌프의 경제

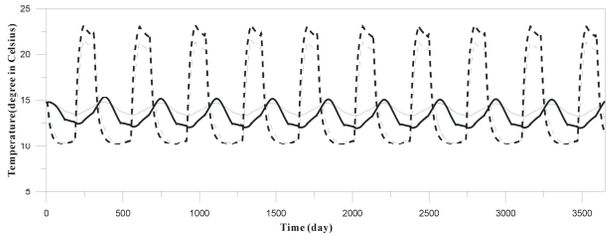


Fig. 12 Time history of temperature in observation point 1(O1, solid) and 2(O2, dashed) : thick line for recharge rate of 1,000 m³/day and thin line for 500 m³/day

적 운전이 가능하지만, 후반으로 갈수록 불리한 운전조건이 될 수 있다. 따라서 냉난방 후기에는 취수정2의 취수량을 줄이고 취수정1의 취수량을 늘려 운전하게 되면 히트펌프의 경제적 운전에 도움이 될 것으로 판단된다.

Fig. 11(a-1)에 나타낸 바와 같이 두 취수정 중간 관측지점(O1)과 취수정2와 회수정1의 중간에 관측지점(O2)을 설정하고, 두 지점에서 10년 동안의 온도변화를 관측하여 Fig. 12에 나타내었다.

관측지점 O2는 회수정과 거리가 가깝기 때문에 회수량이 1,000 m³/day인 경우 10 ℃의 냉수가 회수되는 난방시기에는 10 ℃까지 내려가고, 25 ℃의 온수가 회수되는 냉방시기에는 25 ℃까지 상승하고 있다. 한편, 관측지점 O1에서는 12 ~15 ℃ 사이의 온도변화를 나타내고 있어 회수한 물의 영향이 미미한 것으로 예측된다. 또한, 회수량이 500 m³/day인 경우에는 1,000 m³/day인 경우보다 회수한 물의 영향이 적게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

전반적으로 난방기간(6개월)이 냉방기간(2개월)에 비해 장기이므로 대수층 내의 수온이 점진적으로 하강되는 현상이 관찰되지만, 10년 후에도 그 하강온도는 1 ℃를 넘지 않는 것으로 예측되어 지속적으로 냉난방을 하는데 문제가 없는 것으로 평가되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 지속적인 온실 냉난방을 위해 수열원 히트펌프의 열원으로 강변여과수를 개발하고 온실 냉난방시스템을 구축하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 최적의 위치에 대용량 여과수열원 취득 및 회수를 위한 관정을 구축하고자 전기비저항 탐사와 시추조사를 수행하였다. 관정 깊이가 20 m 내외로 얕기 때문에 회수정과 취수정간 상호 영향을 줄이기 위하여 이격거리를 최대한 넓힐 수 있는 관정위치를 검토하였으며, 난방기간(6개월) 동안 200 m³/day 회수시 영향을 미치지 않는 두 취수정과 회수정의 최종위치를 선정하였다.

2) 두 취수정의 안정취수량 산정을 위해 양수시험을 실시하였다. 시험에 사용한 취수펌프 초과용량에 대해서는 단계양수시험 결과를 근거로 두 관정의 안정취수량을 산정한 결과, 60RT급 히트펌프열원의 필요유량 1,000 m³/day을 초과하는 1,623 m³/day으로 산정되었다.

3) 2월부터 4월까지 온실 난방을 시행한 결과, 2월보다 4월에 취수온도가 내려감에 따라 히트펌프 성능계수가 조금 하락하였으나, 평균 유닛 COP와 시스템 COP는 각각 4.2와 3.1 이상으로 측정되어 고효율 냉난방운전이 가능한 것을 확인하였다.

4) 장기간 온실 냉난방을 가혹하게 운영하는 경우 여과수 온도 변화를 예측한 결과 대수층 내 수온은 점진적으로 하강하지만, 10년간 가혹조건으로 운영하더라도 그 하강온도는 1℃를 넘지 않는 것으로 예측되어 지속적인 냉난방 시행에 문제가 없는 것으로 평가되었다.

후 기

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ006508032011)의 지원에 의해 이루어진 것이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) 박용정, 유영선, 2009, “수평식 지열시스템 온실 적용사례,” 대한설비공학회지 설비저널, Vol. 38, No. 1, pp. 61~66.

(2) Kang, S. H., Choi, J. M., Moon, J. M. and Kwon, H. J., 2010, “Heating Performance of a Ground Source Multi-Heat Pump for a Greenhouse,” Korean Journal of Air-Conditions and Refrigeration Engineering, Vol. 22, No. 6, pp. 337~344.

(3) 은종림, 2011, “대형 수평 밀폐형 지열시스템 시설원예 적용사례,” 지열에너지저널, Vol. 7, No. 2, pp. 29~45.

(4) Hwang, K. S., Jung, W. S., and Ahn, Y. S., 2006, “The Field Test of Bankfiltration (including alluvial and riverbed deposits) Source Heat Pump Cooling & Heating System,” Proceedings of the SAREK Annual Summer Conference, pp. 1186~1190.

(5) Hahn, J. S., Han, H. S., Hahn, C., Jeon, J. S., and Kim, H. S., 2007, “Optimum Pumping Rates of Ground-Water Heat Pump System Using Groundwater or Bank Infiltrated Water,” Economic and Environmental Geology, Vol. 40. No. 6, pp. 833~841.

(6) Nam, Y. and Ooka, R., 2010, “Numerical Simulation of Ground Heat and Water Transfer for Groundwater Heat Pump System Based on Real-scale Experiment,” Energy and Buildings, Vol. 42, pp. 69~75.

(7) Nam, Y., Ooka, R., and Shiba, Y., 2010, “Development of Dual-source Hybrid Heat Pump System Using Groundwater and Air,” Energy and Buildings, Vol. 42,

pp. 909~916.

(8) Cho, Y. and Yun, R., 2011, “A Raw Water Source Heat Pump Air-conditioning System,” Energy and Buildings, Vol. 43, pp. 3068~3073.

(9) US Environmental Protection Agency, 1975, Manual of Water Well Construction Practices, OffIce of Water Supply, EPA-570/9-75-001.

(10) Driscoll, F. G. 1986. Ground Water and Wells, 2nd Edition. Johnson Division, St. Paul, Minnesota, U.S..

(11) Rorabaugh, M. I., 1953, “Graphical and theoretical analysis of step-drawdown test of artesian well,” Proceedings American Society of Civil Engineers, Vol. 79, pp. 1~23.

(12) Choi, H.-M., Lee, J.-Y., Cheon, J.-Y., Jun, S.-C, Kwon, H.-P., 2010, “Estimation of Optimal Pumping Rate, Well Efficiency and Radius of Influence Using Step-Drawdown Tests,” Journal of Engineering Geology, Vol. 20, No. 2, pp. 127~136.