

# 개방형 지열시스템의 지하수환경 친화적 설치 및 관리

이진용, 김남주

강원대학교 지질학과 부교수, (주)지오엔지니어링 대표이사

## 1. 서론

개방형 지열시스템은 다른 열원 시스템과 비교하여 환경친화적이며 그 에너지 효율이 매우 높다(Lee, 2009; 안재영 등, 2011; 권구상 등, 2012). 그러나 땅속의 지하수를 열교환유체로 사용한다는 측면에서 밀폐형 지열시스템과 다른 지하수환경의 변화에 대한 우려와 때로는 불필요한 오해를 낳고 있다(조운주 등, 2009a; 목종구 등, 2011). 그러나 이러한 환경우려의 상당 부분은 개방형 지열시스템의 잘못된 설치와 관리 혹은 지하수시스템에 대한 몰이해에서 유래된 것도 적지 않다(조운주 등, 2009b). 이런 이유로 지열시스템의 높은 효율성과 친환경성에도 불구하고 특히 개방형시스템이 실제 현장에서 홀대받는 경우가 있어 전체적인 신재생에너지 산업의 위축을 초래하는 이유의 하나로 지적되기도 하였다(Lee et al., 2013).

초기에 개방형 지열시스템의 지하수(지반)환경 영향으로 지목된 우려들은 다소 많다(표 1). 그러나 이런 문제에 대한 다수 연구자의 다년간 현장 조사 및 모니터링연구(물론 충분이 많고 길지는 않음)를 통하여 상당 부분 궁금증과 우려가 해소되었고 또 일부 영향에 대해서는 필요한 저감 대책 등이 제시되었다(이진용 등, 2008; 조운주 등,

2009; 환경부, 2010; 목종구 등, 2011; 안창민 등, 2012; 박영운 등, 2013). 예를 들어 초기에 제기된 지하수토양환경 영향 문제들 중에서 열적 및 미생물학적 영향은 주어진 모니터링 기간(3~4년)내에서는 그렇게 뚜렷하거나 크지 않은 것으로 나타났다(목종구 등, 2011; 안창민 등, 2012; 박영운 등, 2013). 물론 이러한 판단은 지열시스템의 장기간 운전과 수명을 고려하였을 때 선부른 판단일 수도 있으나 최소한 관련 영향의

〈표 1〉 초기에 제기된 밀폐형 및 개방형 지열시스템에 대한 주요 토양·지하수 환경우려(이진용 등, 2008; 조운주 등, 2009)

구분	우려되는 토양 및 지하수 환경영향
물리·화학적 영향	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 천공과정에서 현장부실관리에 의한 토양지하수 오염 우려</li> <li>• 히트펌프 냉매의 누출</li> <li>• 지중열교환기 열교환유체의 누출</li> <li>• 그라우팅 물질의 영향</li> <li>• 재주입지하수에 의한 원대수층 수질변화</li> <li>• 히트펌프시스템 폐쇄 후 열교환유체 누출 영향</li> </ul>
수리지질학적 영향	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지하수 과다사용에 따른 지반 침하 우려</li> <li>• 지하수 과다사용에 따른 지하수량 감소(고갈) 및 수리적 간섭</li> <li>• 심부천공에 따른 천부 및 심부 대수층의 연결과 오염 우려</li> </ul>
미생물학적 영향	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지하수온 변화에 따른 미생물학적 변화 우려</li> <li>• 재주입지하수 수질변화에 의한 원대수층 미생물학적 변화 우려</li> </ul>

규모를 가늠하게 하는 좋은 기초자료를 제공하고 있다.

여기서는 우리나라 지하수온의 특성, 개방형 지열시스템의 현황(관련 연구 및 설치현황)과 그동안 다수의 현장조사 및 모니터링 연구에도 불구하고 개방형 지열시스템에 대하여 일부 해결되지 않은 혹은 오해가 있는 지하수관련 몇 가지 이슈들에 대해 살펴보고자 한다.

## 2. 개방형 지열시스템 현황

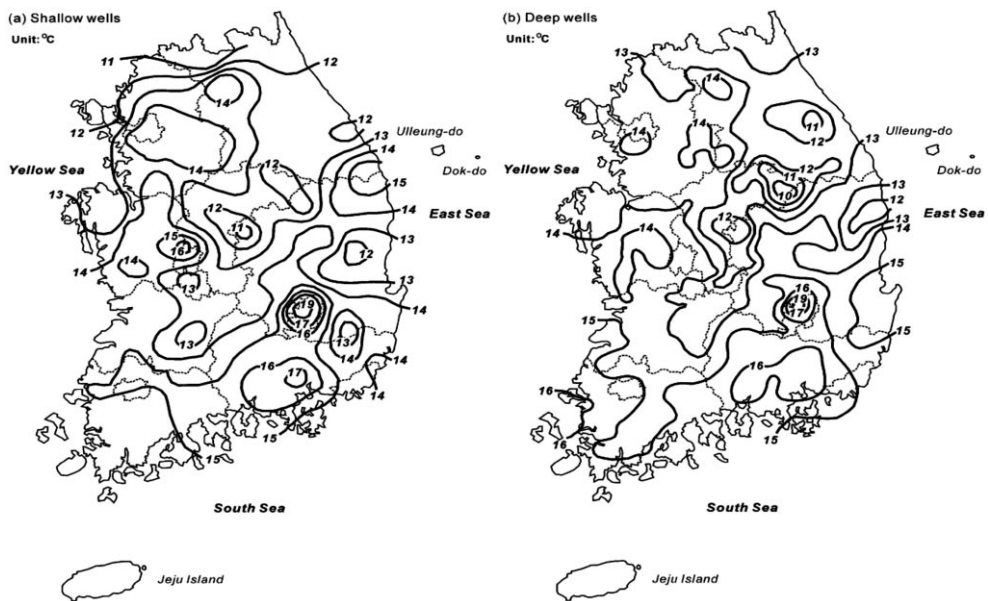
### 2.1 우리나라 지하수온 분포 및 변동특성

Lee and Hahn (2006) 및 Park et al. (2011)에 의하면 우리나라의 천부(~20 m 내외) 및 심부(~70 m 내외)의 지하수의 연평균 온도는 각각 11~19℃ 및 10~19℃로 나타났다(그림 1). 천부 지하수온의 경우 직접적인 태양복사에너지(혹은 기온)의 영향을 많이 받으며 심부 지하수온은 그 영향이 다소 적은 것으로 보고하였다. 그런데 지하수온은 태양에너지의 지중전파의 지연영향으

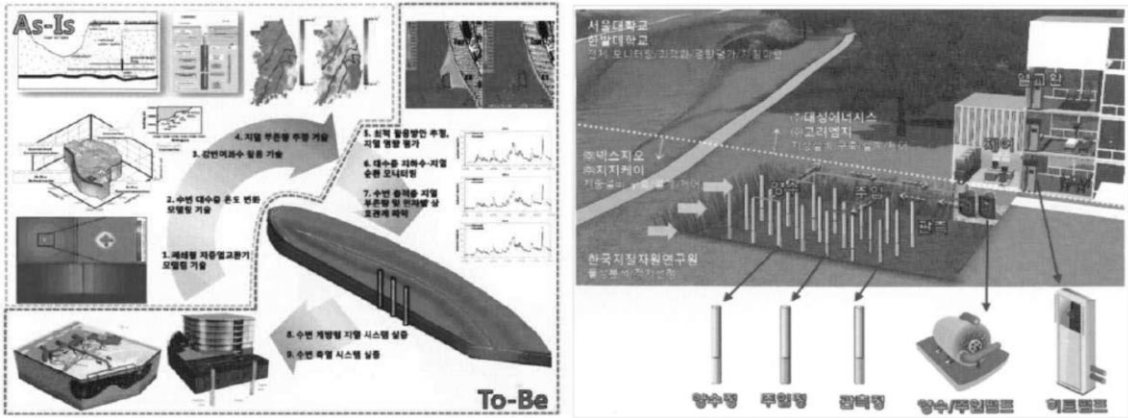
로 최고 지하수온은 12~1월에 나타나며 최저 지하수온은 오히려 5~6월에 나타나 기온과의 역전 현상을 보였다(Lee and Hahn, 2006). 한편 우리나라 지하수온의 연중변동은 대부분 4℃내외이며, 100 m 정도 깊이에서 지하수온의 연중변동은 거의 없어 개방형 지열시스템의 적용에 매우 유리한 것으로 평가되었다(Lee, 2006; Lee and Hahn, 2006).

### 2.2 국내 개방형 지열시스템 연구

우리나라에서 지열시스템에 관한 연구는 많은 경우 밀폐형 위주로 진행되었으나 최근에 개방형 지열시스템의 적용성이 제고되면서 몇몇 연구자에 의해 활발히 진행되고 있다. 몇 가지 대표적 사례를 들면 다음과 같다. 첫 번째로 개방형 지열시스템의 적용성을 본격적으로 조사·연구한 것은 김형수 등(2006), 서민우 등(2006), 정우성 등(2007) 및 한찬 등(2007)에 의한 것으로 창원시 대신면 강변여과 정수장에 설치된 냉난방 설비이다. 강변여과수를 수자원과 냉난방에 동시에 적용



[그림 1] 우리나라 천부 및 심부 지하수온 분포(Lee and Hahn, 2006)

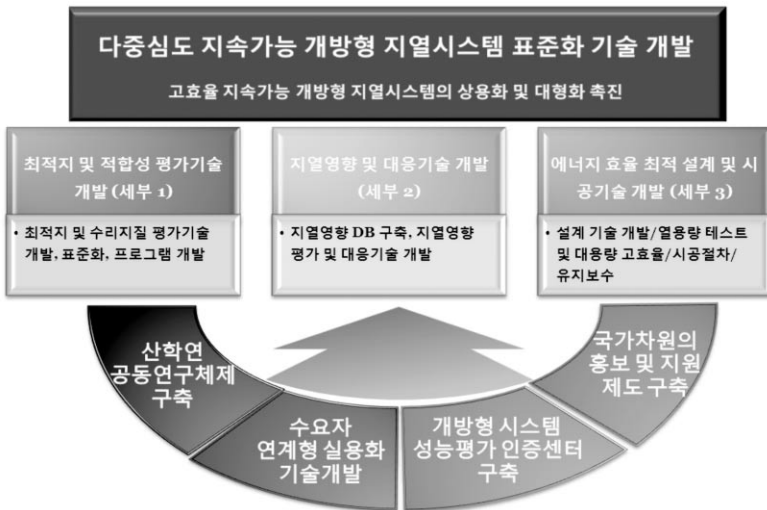


[그림 2] 수변구역 총적층 대수층 지열이용 실증시스템 개요(이강근, 2011)

하는 뛰어난 아이디어로 그 적용성이 매우 크다고 할 수 있다(신지연, 2009). 한편 이와 같은 초기연구를 바탕으로 보다 본격적인 대수층을 활용한 연구들이 추진되고 있으며 복수정을 이용한 대수층 지열 활용 및 ATEs 방식과 총적층 지중열교환기 등의 실증연구가 이루어지고 있으나 개방형 지열시스템의 기술개발 표준화가 늦어짐에 따라 실질적인 보급은 크게 미미한 수준이다. 2011년부터 국토해양부 주관으로 수변 총적층

지하수열의 활용저장을 위한 실증연구가 진행되고 있으나(그림 2), 유비쿼터스 열자원으로서의 지하수의 활용지역(수변구역만)에 제약이 있다는 측면이 약점이다(지식경제부, 2012).

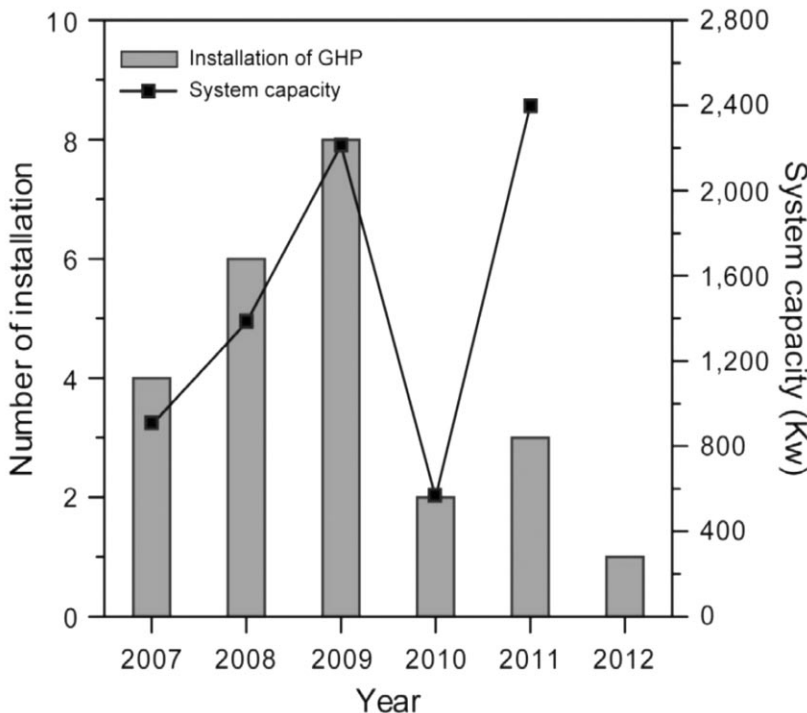
한편 이와 같은 연구에도 불구하고 개방형 지열시스템에 대한 기술표준화의 요구는 지속적으로 대두되었다. 이에 지식경제부는 한국에너지기술평가원을 통해 이러한 시대적 요구에 부응하기 위해 개방형 지열 냉난방 시스템의 시공기준 확립 및 신뢰성 확보를 위한 실증연구(지식경제부, 2012)를 시작하였다. 본 연구는 3년 1단계로 진행되며 크게 개방형 지열시스템의 최적지 및 적합성 평가기술 개발, 지열영향 및 대응기술 개발 그리고 에너지 효율 최적 설계 및 시공기술 개발로 구성되어 있다(문현주, 2012; 지식경제부, 2012). 본 연구를 통해 환경영향을 최소화하는 개방형 지열시스템의 표준화 작업이 가능할 것으로 기대하고 있다(김남주 등, 2012; 김윤호 · 김성규, 2012; 차장환 등, 2012).



[그림 3] 개방형 지열 냉난방 시스템의 시공기준 확립 및 신뢰성 확보를 위한 실증연구 내용(지식경제부, 2012)

### 2.3 우리나라 개방형 지열시스템 현황

앞서 밝힌 바와 같이 개방형 지열시스템은 에너지 효율성이 뛰어난에도 불구하고 국내 설치건수는 미미하다. 이러한 부진의 가장 큰 원인은 환경오염 및 지하수 고갈에 대한 우려 때문이다(Lee and Choi, 2012; Lee et al., 2013). 파악 가능한 국내 개방형 지열시스템의 현황을 살펴보면 2008년까지 밀폐형(거의 대부분 수직밀폐형)과 개방형(복수정 타입은 매우 적으며 대부분 SCW형)의 설치비율은 7:3 정도였으나(Lee, 2009), 이후 개방형의 설치는 급격히 감소하여 2011년까지 누적비율은 8.5:1.5 정도로 나타났다(권구상 외, 2011). 특히 2010년부터는 개방형 지열시스템의 설치가 극히 미미한 실정이다(그림 4). 다만 개별 시스템의 설치용량은 커져서 개방형 지열시스템이 밀폐형에 비해 대용량 시스템 적용에 유리함을 나타낸다(권구상 등, 2011).



[그림 4] 국내 개방형 지열시스템 설치(박영운 등, 2013)

### 3. 주요한 우려와 대책

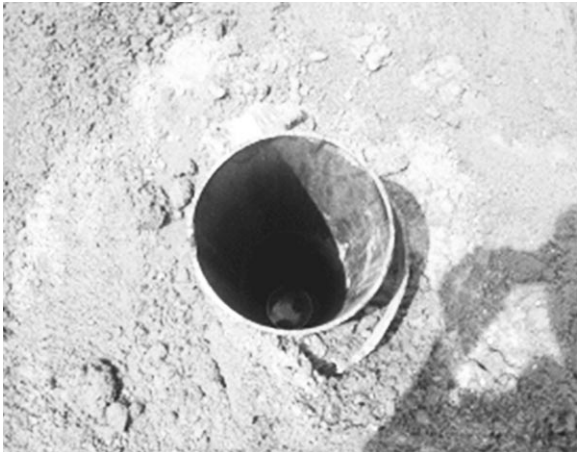
앞서 언급한 바와 같이 개방형 지열시스템의 설치가 국내에서 미미한 것은 지하수 오염과 고갈에 대한 우려가 주된 이유이며 또한 이러한 것을 방지하고 또 평가하는 표준적 절차가 마련되어 있지 않기 때문이다(지식경제부, 2012). 여기서는 주요하게 지하수 오염 및 고갈에 대해 고찰하고 저감 가능한 방법에 대해 살펴보도록 한다.

#### 3.1 지하수 오염

흔히 개방형 지열시스템을 얘기할 때 가장 자주 언급하는 것이 지하수오염에 대한 우려이다. 그러나 이는 특별히 개방형 지열공에만 해당하는 특수한 오염을 얘기하는 것이 아니다. 모든 지하수를 이용하는 관정은 잘못된 시공과 관리를 할 경우 오염의 개연성은 있다. 그러나 다음의 몇 가지

측면에서 개방형 지열시스템 설치 시 고려해야할 사항들이 있다. 우선 우리나라의 개방형(앞서 언급한 바와 같이 특별한 언급이 없는 한 SCW형을 지칭)의 경우 밀폐형의 열교환 천공깊이인 평균 200 m 내외에 비해 두 배 이상 깊은 평균 500 m의 지열관정을 설치하고 있다(Lee, 2009; 권구상 등, 2011). 이는 열교환을 원활히 하기 위하여 많은 지하수량을 확보하고 또 에너지 효율을 극대화하기 위한 것이다.

그런데 일반적으로 지하수량이 많은 관정을 개발하기 위해서는 기초적인 수리지질조사 및 지구물리탐사 등



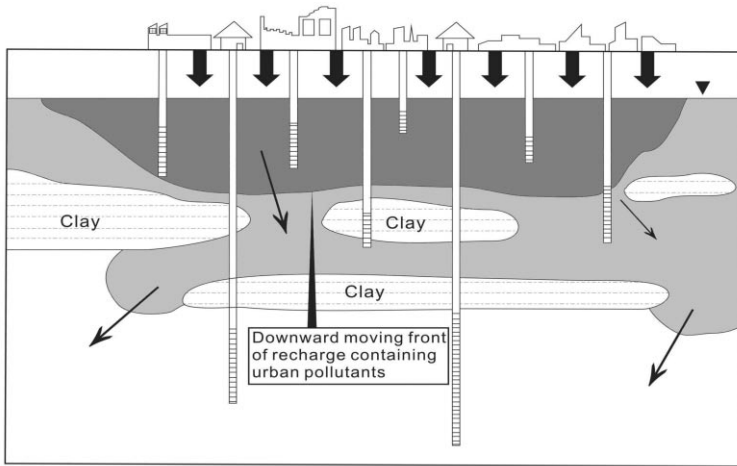
[그림 5] 개방형 지열공 천공시 부실관리(좌) 및 천공 후 적절한 마감 사례(이진용 등, 2008)

이 반드시 선행되어야 한다. 지하수는 어디에나 존재하는 유비쿼터스 자원으로 여겨진다. 그러나 원하는 시스템 용량에 맞는 수량을 공급하기 위해서는 천공 전에 적절한 수량을 확보할 수 있는 수리지질학적 조건이 되는지 평가할 필요가 있다. 이런 사전 조사 및 평가없이 무턱대고 지열 관정을 천공하다보면 적절한 수량을 확보할 수 없어 다수의 폐공이 발생하고 이러한 폐공을 경제적인 이유 등을 들어 적절한 처리없이 방치할 경우 지하수 오염을 유발할 수 있다(이명재 등, 2007; 이진용 등, 2007). 물론 이러한 지하수 오염의 가능성은 일반 지하수개발 관정에서도 동일하게 우려되는 현상이다.

한편 일반 관정과 마찬가지로 개방형 지열관정을 설치할 당시 주변에 대한 오염방지 조치가 매우 중요하다. 현실적으로 시스템을 설치하는 기간을 선택하기는 어렵지만 지중공사가 진행되는 시기는 우기를 피하는 것이 바람직하다(환경부, 2010). 우기에는 천공중인 지열공을 통하여 지표의 오염물질이 하부 대수층으로 유입될 우려가 있기 때문이다. 또한 건기에도 천공 중인 관정에 대하여 적절한 오염방지 시설을 하지 않을 경우 지표층을 통하여 오염물질이 유입될 수 있으며 간헐적 강우가 발생할 경우 오염에 매우 취약하게

된다(조운주 등, 2009b). 그러므로 주변 지역에 대한 우수배제시설 그리고 천공중인 관정에 대해서는 적절한 상부보호시설 등이 필요하며 천공이 끝난 후에도 철저한 오염방지시설이 필요하다(환경부, 2010).

앞서 언급한 바와 같이 우리나라의 개방형 지열 시스템 지열공의 경우 천편일률적으로 500 m 내외로 설치하고 있다(Lee, 2009; 권구상 등, 2011). 물론 이는 경험적 수치로 볼 수 있으나 과학적, 기술적 근거는 다소 희박하다(차장환 등, 2012). 우리나라의 경우 충적층이 두껍게 발달한 수변구역을 제외하면 대부분의 경우 수 m의 미고 결퇴적층 아래에는 풍화대 그리고 그 밑에는 암반이 발달해 있다. 이런 경우 충분한 지하수를 공급하는 파쇄대는 50~100 여 m 내외에서 발달하며 그 이하에는 투수성 단열이 많지 않은 것으로 사료된다(전남대 여인옥 교수, personal communication). 그러므로 지하수량에 크게 기여하지 않는 구간에 대하여 일률적으로 500 m 까지 굴착하여 천부대수층과 심부대수층을 연결하여 불필요하게 오염가능성을 높일 것이 아니라(그림 6; Lawrence et al., 1998; 조운주 등, 2009b), 적절한 조사 및 평가를 통하여 적절한 필요 심도(시스템용량에 맞는 최소한의 깊이)만 천공하고 각



[그림 6] 심부관정 천공과 양수에 의한 지하수 오염개연성 증가 (Lawrence et al., 1998; 조윤주 등, 2009b)

설치 지점의 특수한 수리지질학적 특성에 따라 다르게 하는 것이 필요하다(김윤희 · 김성규, 2012; 차장환 등, 2012).

### 3.2 지하수 고갈

지하수오염에 이어 개방형 지열시스템에 대두되는 주요 이슈의 또 다른 하나는 지하수 고갈 우려이다. 일반 지하수개발 관정 혹은 먹는샘물 개발에서도 흔히 제기되는 우려로 개방형에만 특별히 해당하는 이슈는 아니다. 앞서도 언급한 바와 같이 우리나라의 개방형 지열시스템은 복수정이 아닌 대부분 스탠딩칼럼웰(Standing Column Well) 방식이다(그림 7). 이 경우에는 양수한 지하수의 상당 부분이 일정한 시간 격차를 두고 재주입된다. 이때 시스템 효율을 위해 일부는 다른 곳으로 양수한 지하수를 배출(혹은 이용)하게 되는데 이를 블리딩(bleeding)이라고 칭한다. 이 블리딩이 어느 정도이냐에 따라 지하수 고갈에 대한 염려의 정도가 달라진다.

과거에는 흔히 SCW형의 경우 양수한 지하수를 열에너지만 이용하고 거의 대부분 재주입하는 것으로 알려졌으나(이진용 등, 2008; 조윤주 등,

2009b), 최근의 현장조사에 의하면 일부 실제로 에너지효율을 위하여 양수한 지하수를 전량 배출하거나 상당한 비율로 블리딩을 하는 것으로 파악되었다(이상훈 등, 2010). 이런 경우 실제로 지하수가 고갈(지하수위 강하)되어 더 이상 개방형 지열시스템을 사용할 수 없게 되는 경우를 일부 발견하였다(김남주 등, 2012; 이상훈 등, 2010). 이는 시스템의 잘못된 설계와 운영에 의한 것으로 충분한 수리지질학적 조사, 단계양수시험 등을 통한 적정 채수량 결정(지하수영향평가) 그리고 재주입에 의

한 지하수온의 장기적 변동에 대한 수치적 예측 모델링 등을 통해 불필요하게 블리딩을 많이 하지 않고도 충분히 에너지 효율을 높일 수 있는 방법이 있다. 최근에 이와 같은 우려를 불식시키기 위해 개방형 지열시스템의 지침으로 일정 이상의 블리딩을 규제하고 있기도 하다(김남주 등, 2012). 그러나 중요한 것은 규제적 측면이 아니라 시공자 및 이용자 입장에서 안정적이고 지속 가능한 개방형 지열시스템을 위해서라도 적정한 양수와 최소한의 블리딩을 고려하는 것이 반드시 필요하다.

이런 염려에도 불구하고 일부를 제외하고 모범적으로 운영되고 있는 개방형 지열시스템의 경우 그 에너지 효율이 매우 좋으며 지하수위 측면에서 큰 문제가 없는 것으로 보고되고 있다(목종구 등, 2011). 지하수 고갈의 우려는 시스템 설계와 운영의 문제이다. 해당 대수층이 감당할 수 있는 정도의 양수와 블리딩으로 우려를 충분히 제거할 수 있는 이슈이다

### 3.3 수온변화 및 수질 영향

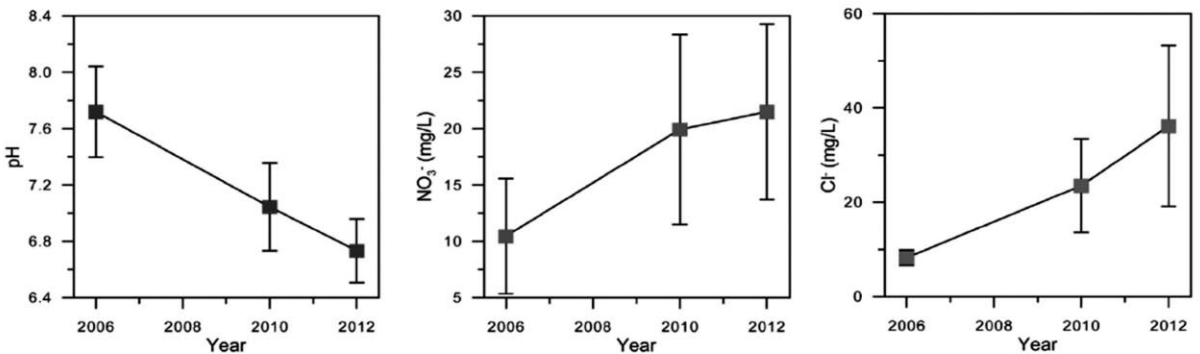
개방형 지열시스템의 경우 지하수열을 이용하



[그림 7] 우리나라의 대표적인 SCW 방식 지열냉난방 시스템적용 대학건물 (삼양에코너지, 2012)

로 열에너지를 사용한 지하수가 재주입됨으로써 수온변화에 따른 주변 지하수의 영향을 충분히 고려할 필요가 있다(이진용 등, 2008; 조운주 등, 2009b; 환경부, 2010). 밀폐형으로 유명한 미국의 스톡톤대학의 지열시스템의 경우 일부 최인접 지역에서 지열시스템 운영에 따라 총 박테리아 수가 일부 증가하는 영향을 보이기는 하였다 (York et al., 1998; 이진용 등, 2008). 그러나 우리나라 개방형 지열시스템에서 단기간 모니터링 한 결과는 거의 미생물학적 변화가 발견되지 않았다(이진용 등, 2008).

그러나 박영윤 등(2013)은 전국에서 운영중인 6지역의 개방형 지열냉난방시스템의 지하수를 분석한 결과 지하수의 pH는 약간 감소하였고, 지표 오염 물질의 지시자에 해당하는 질산성질소와 염소이온이 점진적으로 증가하는 양상을 보임으로써 지열공의 부실한 관리에 의해 지하수 오염의 우려가 있음을 나타내기도 하였다(그림 8). 그러나 이런 변화가 지열시스템의 설치·운영에 따른 것인지 인과관계를 확인하기 어려우며 설사 변화가 있다더라도 현재로서는 먹는물 기준에 매우 적합한(기준값보다 한참 아래) 상태라 오염이라고



[그림 8] 우리나라 6개 개방형 지열관정 지하수의 수질변화(박영윤 등, 2013)

할 수 없이 깨끗한 상태이다. 향후 추가적인 모니터링을 통하여 그 추세와 영향 여부를 판단할 수 있을 것으로 사료된다. 다만 수차례 언급한 바와 같이 이런 지열공은 일반 지하수 이용관정과 마찬가지로 부실한 관리는 당연히 지하수오염으로 귀결되는 것은 자명하다. 그러나 지열관정에 특별히 발생하는 현상은 아니다(박영윤 등, 2013).

#### 4. 결론

개방형 지열시스템은 매우 에너지 효율적이고 친환경 냉난방시스템이며 대용량시스템 적용이 가능하다. 그럼에도 불구하고 우리나라에서는 여러 가지 기술적 문제와 환경우려 등으로 산업이 활성화되지 못하고 있다. 흔히 일반인들과 타 분야의 전문가들이 우려하는 지하수 오염과 고갈의 문제는 특별히 개방형에 특징적인 것은 아니다. 어떤 시설이든 부적절한 설치와 관리는 환경오염을 유발하게 되어있다. 최근 국토부, 지식경제부와 한국에너지기술평가원을 통해 개방형 지열시스템의 적용 표준화를 위해 많은 연구자들이 노력하고 있다. 향후 범용적인 설치 및 운영·관리 기술이 개발되어 고효율의 개방형 지열시스템이 친환경적으로 적용되기를 기대해 본다. 개방형 지열시스템은 열교환유체로 지하수를 사용한다는 측면에서 유비쿼터스(언제 어디서나) 시스템으로 볼 수 있다. 그러나 충분한 지하수 수량과 수리지질학적 조건이 맞는 곳에서만 설치할 수 있는 특이성도 있다는 사실을 명심해야 할 것이다. 마지막으로 저자는 다음과 같은 문구로 본 글의 핵심적 내용을 전달하고자 한다. Groundwater is ubiquitous but application of open loop GSHP is specific.

#### 감사의 글

본 글은 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행

한 연구과제입니다(No. 20123040110010).

#### 참고문헌

1. 권구상, 이진용, 목종구, 2012, 우리나라 지열시스템 이용현황 업데이트(2008-2011), 지질학회지, 48(2), 193-199.
2. 김남주, 이순영, 김창훈, 최범규, 이진용, 2012, 개방형 지열시스템의 관리기준 및 개선방향 검토, 2012 추계지질과학연합학술대회, p. 70.
3. 김운호, 김성규, 2012, 개방형 지열 냉난방시스템의 설계 및 시공기준 확립 및 신뢰성 확보, 2012 추계지질과학연합학술대회, p. 68.
4. 김형수, 정우성, 안영섭, 황기섭, 2006, 강변여과수(충적층 및 하상)의 열원을 이용한 지열에너지 활용에 관한 연구, 대한설비공학회 하계학술발표회 논문집, pp. 209-214.
5. 목종구, 임홍균, 장범주, 박유철, 이진용, 2011, 시계열 분석을 이용한 지열히트펌프 가동에 따른 지하수특성변화 해석, 지질공학, 21(1), 35-43.
6. 문현주, 2012, 지열 기술개발 현황 및 향후 과제, 2012 한국지열에너지학회·한국지열협회 공동포럼, pp. 17-26
7. 박영윤, 권구상, 김남주, 이진용, 윤진구, 2013, 개방형 지열냉난방 시스템 사용에 따른 지하수의 지화학적 특성 변화, 지질학회지, 49(2), 289-296.
8. 삼양에코너지, 2012, 개방형 지열 냉난방 시스템의 시공기준 확립 및 신뢰성 확보를 위한 실증연구, 한국에너지기술평가원, 79 p.
9. 서민우, 정우성, 김형수, 황기섭, 안영섭, 2006, 강변여과수 활용 냉난방 시스템 개발 및 시범시설 구축, 지열에너지저널, 2(1), 11-19.
10. 신지연, 2009, 강변여과시설을 활용한 다양한 조건에서의 지열에너지 활용 평가, 서울대



- 학교 대학원 석사학위논문, 59 p.
11. 안재영, 이진용, 목종구, 2011, 국내 지열히트펌프시스템의 기술적 적용분석(2009-2010), 지질학회지, 47(1), 89-96.
  12. 안창민, 한지선, 김창균, 박유철, 목종구, 장범주, 2012, 분자생물학적 방법을 이용한 지열시스템 관정 및 주변지역 미생물종 모니터링, 지하수토양환경, 17(6), 23-32.
  13. 이강근, 2011, 수변지역 지질지하수 융합에너지 활용 기술 개발, 국토해양부, 17 p.
  14. 이명재, 이진용, 목종구, 여인옥, 이강근, 박유철, 안경환, 원종호, 2007, 다중 추적자 시험을 통한 폐공의 지하수 오염가능성 평가, 지질학회지, 43(2), 241-252.
  15. 이상훈, 박찬호, 윤태일, 안근목, 최용석, 2010, 개방형 지중열교환기의 블리딩 효과에 대한 실험적 고찰, 대한설비공학회 2010 동계학술발표대회 논문집, pp. 446-452.
  16. 이진용, 이명재, 이은희, 2007, 지하수 모델링을 통한 폐공의 오염가능성 평가, 지구자원연구, 21, 37-58.
  17. 이진용, 이종규, 김정우, 김창균, 2008, 지열시스템이 토양·지하수에 미치는 영향에 관한 연구 최종보고서, 환경부, 240 p.
  18. 조운주, 이진용, 김창균, 한지선, 2009a, 지열시스템의 그라우트 및 수온변화가 미생물에 미치는 영향 실험, 한국지하수토양환경학회지, 14(4), 10-14.
  19. 조운주, 이진용, 임수영, 홍경표, 2009b, 지열히트펌프시스템의 설치 및 운영이 토양지하수에 미치는 영향에 대한 고찰, 한국지하수토양환경학회지, 14(3), 22-31.
  20. 정우성, 황기섭, 안영섭, 서민우, 김형수, 2007, 강변여과수 활용 냉난방 시스템 개발 및 시범시설 구축(2), 지열에너지저널, 3(1), 13-23.
  21. 지식경제부, 2012, 개방형 지열 냉난방 시스템의 시공기준 확립 및 신뢰성 확보를 위한 실증연구 연구기획사업 최종보고서, 25 p.
  22. 차장환, 주정웅, 이명재, 신선호, 김성훈, 김용성, 개방형 지열냉난방시스템의 최적지 및 적합성 평가, 2012 추계지질과학연합학술대회, p. 69.
  23. 한찬, 전재수, 윤운상, 한혁상, 한정상, 2007, 하천-충적층대수층계의 강변여과수를 열원으로 이용하는 지하수 열펌프 시스템의 계절별 입구온도와 효율성 평가, 한국지열에너지학회논문집, 3(2), 39-51.
  24. 환경부, 2010, 지열에너지 설비의 환경관리 요령, 환경부.
  25. Lawrence, A.R., Morris, B.L., and Foster, S.S.D., 1998, Hazards induced by groundwater under rapid urbanization, Geohazards in Engineering Geology, 15, 319-328.
  26. Lee, J.Y., 2006, Characteristics of ground and groundwater temperatures in a metropolitan city, Korea: considerations for geothermal heat pumps, Geosciences Journal, 10, 165-175.
  27. Lee, J.Y., 2009, Current status of ground source heat pumps in Korea, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, 1560-1568.
  28. Lee, J.Y. and Choi, H.M., 2012, Use of underground air for a heating and cooling energy source on Jeju volcanic island of Korea, International Journal of Green Energy, 9(7), 597-611.
  29. Lee, J.Y. and Hahn, J.S., 2006, Characterization of groundwater temperature obtained from the Korean national groundwater monitoring stations: Implications for heat pumps, Journal of Hydrology, 329, 514-526.
  30. Lee, J.Y., Kim, N.J., and Kwon, K.S.,

- 2013, Status and issues of open loop GSHP systems in Korea, 2013 Korea-Japan Joint Seminar on GSHP Technology, April 29, 2013, KIGAM, Daejeon, Korea.
31. Park, Y.C., Jo, Y.J., and Lee, J.Y., 2011, Trends of groundwater data from the Korean National Groundwater Monitoring Stations: indication of any change? *Geosciences Journal*, 15(1), 105-114.
32. York, K.P., Jahangir, Z.M.G.S., Solomon, T., and Stafford, L., 1998, Effects of a large scale geothermal heat pump installation on aquifer microbiology, The 2nd Stockton Geothermal Conference, p. 8.