

스탠딩컬럼웰을 적용한 지열히트펌프의 토양 및 지하수 미생물에 대한 영향 연구

A Study on the Effects of Heat Pump Using Standing Column Well on Soil and Groundwater Microorganisms

전 정 의¹⁾ · 박 시 삼²⁾ · 나 상 민³⁾ · 이 건 중⁴⁾ · 박 재 우[†]

Jun, Jungeui · Park, Sisam · Na, Sangmin · Rhee, Keonjoong · Park, Jaewoo

ABSTRACT : Standing column well (SCW) heat pump system produces geothermal energy by the heat exchange of the groundwater. If SCW system changed the temperature of soil and groundwater, it could also change species or population of microorganisms. Therefore it is needed to research about the effect of temperature change on microorganisms to use eco-friendly geothermal energy. We produced the simulative heat pump system (SHPS) and observed the change of the soil temperature in SHPS. Characteristic analysis of microorganisms isolated from soil was performed and groundwater temperature variation was evaluated. Also the bleeding effect in SHPS was investigated and the results are included. As the results, the population of microorganisms was increased about 90%, as the groundwater temperature increased 2-3 celsius degree. However the species of microorganism was little influenced by the temperature change of the soil.

Keywords : Standing Column Well (SCW), Simulative Heat Pump System (SHPS), Microorganism, Soil, Groundwater

요 지 : 스탠딩 컬럼웰(Standing Column Well) 히트펌프시스템은 지하수의 열교환으로부터 지열에너지를 생산한다. 모의지열펌프 시스템(SHPS)을 제작하고 이를 이용하여 변화하는 토양의 온도를 관찰하고, bleeding 실험 후 SHPS 내에서 토양 미생물의 양과 종의 변화를 파악하였다. 이와 같은 실험을 통해 토양의 온도 변화와 수분의 변화에 의해 토양 내 미생물의 전반적인 양은 감소하였고, 종의 개체수가 감소함을 볼 수 있었다. 열원으로 사용되는 지하수의 성분분석을 통해 사용 전 후의 특성을 파악하고, 지하수 시료를 생활용수 기준으로 수질 분석 하였다. 그 결과 지하수의 수질 자체가 매우 양호하여 지하수 오염은 일어나지 않은 것으로 파악되었다. 또한 지하수 시료의 경우에도 지하수 내 존재하고 있는 미생물의 종과 양의 변화를 파악하여, 열원으로 사용 전 후의 미생물의 종과 양이 변화 한다는 것을 알 수 있었다. 지하수의 온도가 2-3도 증가함에 따라 미생물의 양이 90% 정도 늘어났으며, 토양에 비해 종의 변화는 크지 않음을 확인할 수 있었다.

주요어 : 스탠딩컬럼웰(SCW), 모의지열펌프시스템(SHPS), 미생물, 토양, 지하수

1. 서 론

세계적으로 유가의 불안정과 온난화 문제는 신·재생 에너지에 대한 관심을 낳아 증대시키고 있다. 신·재생 에너지가 가지는 가장 큰 장점은 천연 자원을 사용함으로써 에너지원의 고갈이 없는 에너지원이며, 화석연료 사용 시 발생하는 여러 오염물질 배출이 없다는 점이다. 우리나라와 같이 에너지원의 대부분을 수입에 의존하는 국가는 유가의 변동과 기후 변화 협약과 같은 문제에 보다 효과적으로 대처하기 위하여 이러한 신·재생 에너지 개발 및 보급이 무엇보다도 중요하다 할 수 있겠다(이의준, 2006; 정상진 등, 2008).

이 중에서 지열(Geothermal)을 에너지원으로 사용한 냉난방 기술을 신·재생 에너지 기술 중에서도 높은 에너지효율을 가지고 있으며, 친환경적이고 비용대비 효율적인 측면에서도 매우 우수한 에너지원으로 각광받고 있다(나상민, 2007; 박시삼 등, 2006; 박시삼, 2007). 지열에너지(Geothermal Energy)는 지구 전체가 가지고 있는 열에너지로 지하 심부에서의 지질학적 및 지화학적 작용에 의해 발생하는 에너지와 태양으로부터 전달되는 에너지가 복합적으로 작용하여 지구 내부에 저장된 에너지를 가리킨다. 지구는 중심부로 들어갈수록 뜨거워지는데 이 열을 에너지원으로 사용하여 전력을 생산하는 지열 발전도 지열에너지의 이용방법중 하나이

1) 정희원, 한양대학교 건설환경공학과 석사과정

2) 정희원, GS건설(주)

3) 비희원, GS건설(주)

4) 비희원, (주)티이엔

† 정희원, 한양대학교 건설환경공학과 정교수

다(김건영 등, 2000).

전 세계적으로 1995년부터 2005년까지 5년 단위로 적용 분야별 전 세계 지열에너지 누적 이용현황(시설용량, 이용량 및 가동률 등)을 조사한 결과 매년 약 12%의 증가율을 보이고 있다(에너지 관리공단 신·재생에너지센터, 2008). 가장 많이 사용되는 방식은 지열 열펌프 시스템(Geothermal Heat Pump Systems)이다. 우리나라는 최근까지 지열에너지의 활용 사례가 그리 많지 않으며, 주로 온천 등으로 사용하는 것 외에는 거의 활용 사례가 없으나 최근에는 지열 열펌프를 이용한 냉난방 시스템의 활용이 점차 늘고 있다(김용식 등, 2006; 김영복 등, 1998; 김태웅 등, 1996; 박정환 등, 2008; Lee 등, 2007).

지열 열펌프 시스템은 크게 지중 열교환기(Ground heat exchanger 또는 Borehole heat exchanger)와 열펌프로 구성되어 있으며 냉방과 난방을 동시에 구현이 가능한 것이 특징이다. 냉방과 난방 모드에서 각각의 열원의 역할을 하는 지중의 온도는 연중 안정적이므로 지열 열펌프 시스템은 높은 효율과 우수한 성능을 갖게 된다(DOE, 2001)

이러한 지열 냉난방 시스템의 종류에는 두 가지가 있는데 토양으로부터 열을 직접 채취하여 사용하는 방식과 토양 내 지하수가 가지고 있는 열을 사용하는 방식이 있다. 토양 열원 시스템(Ground-Coupled Heat Pump Systems)의 경우 다양한 깊이로 시공이 가능하나 열전달의 성능이 다소 떨어지고 공사 면적이 많이 필요하다는 단점이 있다. 이에 반해 지하수 열원 시스템(Ground Water Heat Pump Systems)의 경우에는 열전달의 성능이 우수하고 설치 면적이 작다는 장점이 있으나 열원으로 사용되는 지하수의 오염 가능성이 우려된다(Kavanaugh 등, 1997). 또한 블리딩(bleeding)이 이루어질 경우 지하수의 오염 뿐 아니라 토양에 미치는 영향을 파악해야 할 필요가 있다. 블리딩은 열원으로 사용된 지하수의 일부를 시스템 외부로 방류하는 것을 말하는데 이러한 블리딩의 유무는 건물측 최대부하 및 지중 측의 용량과 관련되어 있다. 지열히트펌프 설계 시 일반적으로 건물측의 냉난방 최대부하를 기준으로 지중 측의 용량을 산정하는데 시스템의 효율 향상 및 경제성을 높이기 위하여 최대부하보다 작은 지중측 용량을 설계하고 이보다 큰 부하가 요구되면 블리딩을 통하여 이 부하를 담당하게 된다. 블리딩은 지하수 조건(유량)에 따라 달라지게 되나 순환수의 약 10% 내외로 이루어지게 되며 우리나라에서는 거의 이루어지지 않고 있고, 블리딩을 행하는 현장에서도 지표면에 분사하기보다는 하수관거를 통해 직접적으로 흘려보내는 방식을 사용하고 있다.

우리나라의 경우에는 국토의 면적이 좁으며, 상대적으로 풍부한 지하수를 활용하는 지하수 열원 시스템의 사용이 증가하고 있다. 그 중에서 열교환한 지하수를 같은 지열공

에 재주입하는 스탠딩 컬럼 웰(standing column well, SCW) 방식이 많이 사용되고 있다(Rees 등, 2004). 스탠딩 컬럼 웰 공법의 보급 및 확산을 위하여 설치 공사 과정 뿐 아니라 추후에 발생할 수 있는 환경에 대한 영향 파악 및 평가가 중요하다 하겠다. 또한 지하수가 열원으로 사용되는 과정에서 심부로부터 지표면 가까이의 열펌프까지 이송 시 일어날 수 있는 변화를 파악해야 할 필요가 있다(정상진 등, 2008; 최미영 등, 2009).

현재 국내에서는 지열 시스템 개발과 지열히트펌프 운영에 따른 지하수 환경 평가 등의 분야에서는 연구가 이루어지고 있으며 지하수 내 서식하고 있는 미생물에 미치는 영향에 대한 연구는 진행 중에 있다(박정환 등, 2008). 하지만 지열 시스템 사용에 따른 환경에 미치는 영향에 관한 연구, 특히 토양 내 서식하고 있는 미생물과 관련된 연구는 아직 미비한 실정이다.

국외에서도 지열히트펌프 자체 성능을 평가한 연구나 히트펌프의 냉난방 효율에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며 실제로 밀폐형 지열히트펌프시스템이 설치된 현장에서 토양의 온도 변화를 측정된 연구(Taylor 등, 1998)와 이에 따른 미생물의 양과 종의 변화를 파악한 연구 결과가 있다(York 등, 1998). 하지만 이러한 결과는 그 현장에 한정되어 있는 반면 본 연구에서는 칼럼 실험을 통해 일반적인 결과를 도출하고자 하였다. 또한 온도 변화와 더불어 블리딩이 미치는 영향까지 파악함으로써 후에 블리딩이 이루어지는 현장에서 활용이 가능하도록 하였다.

본 연구에서는 스탠딩 컬럼웰을 적용한 지열 냉난방 시스템 이용 시 주변 토양 및 지하수에 미치는 영향을 파악하기 위하여 컬럼 실험(Column test)을 통하여 토양의 온도변화를 확인하고 지하수의 수질 특성을 파악하여 지하수의 오염 확인 및 재이용 시 기초자료로 사용되어질 자료를 구축하고자 한다. 그리고 토양 및 지하수의 미생물 동정 분석을 통하여 기존에 서식하고 있는 미생물에 미치는 영향을 알아보려 한다.

2. 연구 내용 및 방법

2.1 모의지열펌프시스템(simulative heat pump system, SHPS) 제작

본 연구에서는 실제 지열히트펌프가 가동 중인 현장을 모사하는 모의지열펌프시스템 제작을 통하여 지열히트펌프 이용에 따른 토양 온도 변화를 파악하고 토양 내 미생물의 동정분석을 실시하였다. 지면에서의 열전달을 모사하기 위하여 원통형으로 설계하였으며 재질은 아크릴을 사용하여 두께 10mm, 내경이 800mm 높이가 750mm의 크기로 제작하였다. 바닥으

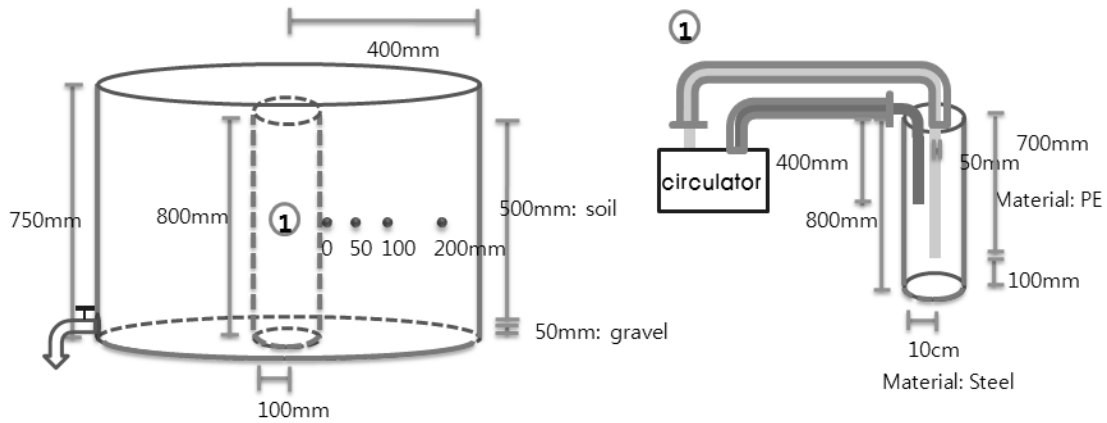


Fig. 1. Schematic diagram of simulative heat pump system (SHPS).

로부터 약 50mm 위치에 물의 배출을 위한 배수구를 만들었고, 지하수 순환 모사를 위한 파이프는 두 가지로 제작하였다. 외관의 파이프의 크기는 내경 200mm이고 재질은 강관(steel pipe)을 사용하였다. 국내에서는 스케일 및 부식을 방지하기 위하여 폴리염화비닐(polyvinyl chloride, PVC)을 주로 사용하는 반면 미국에서는 파이프의 파손을 예방하기 위하여 강관을 사용하는 경우가 많아 이번 모의실험에서는 강관을 사용하였다. 내관은 현장과 동일한 재질인 폴리에틸렌(polyethylene, PE)을 사용하여 내경 50mm 크기로 제작하였는데 지하수의 순환을 위하여 각기 다른 길이로 제작 후 수온이 일정한 지하수의 순환을 위하여 항온물순환장치(Constant Thermocirculator, HST-205 WL)를 연결하여 사용하였다.

모의지열펌프시스템(SHPS)의 중앙에 파이프를 설치하고 바닥으로부터 약 50mm 정도는 자갈로 채운 후 나머지는 토양으로 채웠다. 토양을 약 반 정도 채운 후 실시간으로 온도 측정이 가능한 센서를 각각 0, 50, 100 그리고 200mm 지점에 설치하고 나머지 부분에 대하여 토양을 채웠다. 그리고 데이터 로거(Data Logger, GR 100)를 사용하여 실제 현장에서 하루 평균 8시간 기기가 가동되는 것을 고려하여 하루 8시간 27°C의 지하수를 순환하고 10분 간격으로 토양의 온도변화를 측정하였다. 토양을 채운 모의지열펌프시스템은 온도 변화를 최소화하기 위하여 뚜껑을 덮고 시스템 외부를 단열재를 이용하여 감싸주었으며 실험실 내 온도는 항온습습기(Thermo-hygrostat, AEC-2000)를 이용하여 일정하게 유지하였다.

모의지열펌프시스템(SHPS) 내 토양의 온도는 20°C, 지하수는 27°C로 설정하였다. 이는 토양의 온도가 지표로부터 약 5mm 이하의 토양의 평균적인 온도를 고려하여 설정한 것이며, 현장 지하수의 수온의 경우는 계절과 시간대별로 약간의 차이가 있으나 큰 변화 폭을 보이지는 않으므로 평균적인 값으로 설정하였다.



Fig. 2. The figure of simulative heat pump system (SHPS).

2.2 모의지열펌프시스템(SHPS)의 블리딩(Bleeding) 실험

지하수의 열전달에 따른 토양 온도 변화 확인 실험 종료 후에 제작된 모의지열펌프시스템에서 블리딩(bleeding) 실험을 진행하였다. 이 실험에 사용된 지하수는 현재 가동 중인 청주대 현장에서 채취하여 사용하였다. 블리딩의 양을 결정하기 위하여 시스템 내의 수분을 측정된 결과 약 7.6%의 수분을 나타내었다. 일반적으로 토양 내 수분이 약 20% 정도임을 고려하여 하루 블리딩의 양을 53.2L로 결정하였다. 이 때 토양의 온도는 20°C, 지하수의 온도는 토양과 동일하게 설정하였다. 이 실험의 목적은 블리딩 시 일어날 수 있는 토양 내 미생물 변화 파악이므로 그 외의 조건은 모두 동일하게 유지하였으며, 미생물의 성장 주기를 고려하여 10일 동안 실험을 진행하였다.

2.3 모의지열펌프시스템(SHPS)에 의한 지하수 특성 분석

지하수는 실제 현장에서 열원으로 사용 중인 지하수를 각각 3월과 5월 두 차례에 걸쳐 채취하였다. 열원으로 사용

되기 전 지하수와 열원으로 사용 된 후 하수관거를 통해 버려지는 지하수의 특성을 비교·분석 하였다. 실험은 현장에서 채취 즉시 용존산소를 측정(DO meter, HANNA HI 9146) 하고 채취한 지하수는 밀봉 후 아이스박스에 즉시 옮겨와 분석을 실시하였다. 이 때 각 항목은 pH와 TDS는 Multi-meter(istek CP-500L), COD는 수질분석기(Dr-2800, Hach), 그리고 TOC는 Total organic analyzer(multi N/C 3100, Analytikjena)를 각각 이용하여 측정하였다. 또한 본 실험실에서 측정항목 이외에 유기물과 중금속 인자들은 한국환경시험연구소(수질오염공정시험기준 2008)에 생활용수 기준으로 수질분석을 의뢰하였다.

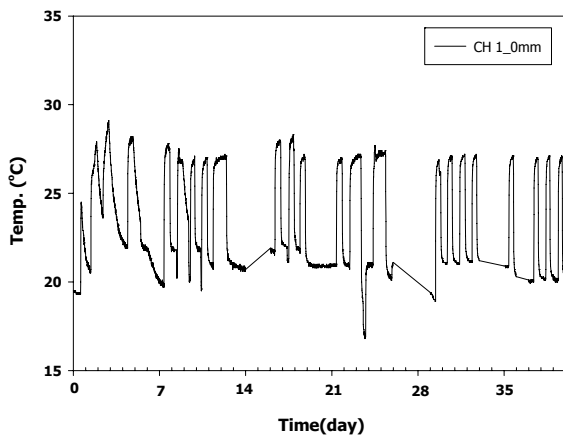
2.4 모의지열펌프시스템(SHPS)에 의한 토양 및 지하수 미생물 동정 분석

모의지열시스템(SHPS) 제작 시 사용한 토양의 일부를 채취하여 미생물 동정 분석을 엠포월드에 의뢰하였다. 채취한 토양은 밀봉하여 아이스박스에 보관하여 5°C를 유지한 상태로 의뢰하였으며, 온도변화 실험과 블리딩 실험이

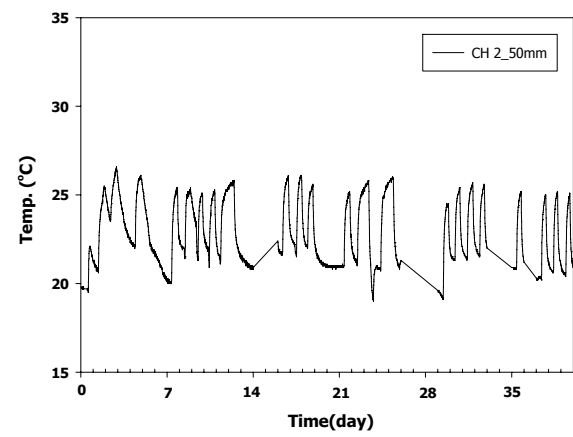
종료 한 후 시스템 내 토양을 깊이별로 채취한 다음 고루 섞어 밀봉하여 온도를 5°C로 유지한 상태로 2차 미생물 동정 분석을 실시하였다.

지하수의 경우에는 실제 지하수 내 서식하고 있는 미생물의 변화를 파악하고자 가동 중인 청주대 현장에서 지하수 시료를 채취하였다. 동일한 조건 하에서 열원으로 사용되기 전 지하수와 사용 후의 지하수를 채취하고 즉시 밀봉하고 토양과 마찬가지로 5°C의 온도를 유지하여 미생물 동정 분석을 실시하였다(정두영 등, 2007).

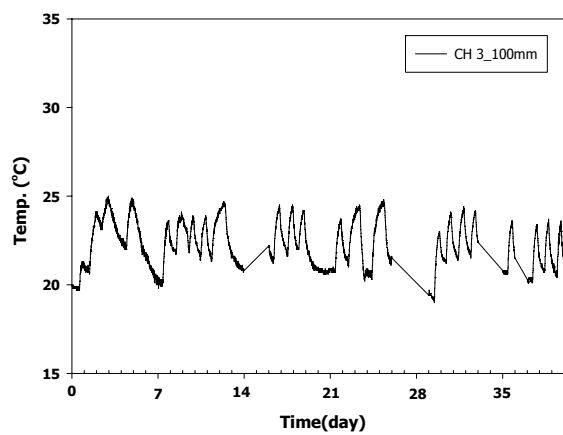
미생물 동정 분석은 16s rDNA 염기서열분석법을 수행하였다. 시료 1g을 10ml이 들어있는 cap tube에 넣어 고루 풀어준 후, 9ml의 멸균수에 시료 희석액 1ml를 넣어주고 Vortex mix를 이용하여 잘 섞어주었다. 이후 serial dilution을 실시하고, 해당 희석배수에서 100-200ul을 취하여 배양용 배지에 접종 및 흡수시킨 후, 28°C(±2°C) 조건에서 24시간, 48시간 배양에 따른 개체수 측정하였다. 또한 시료에서 분리한 균주의 성장분석을 위해 spread plate method를 통한 토양 및 지하수 시료로부터 40-300개의 colony가 발현된 agar



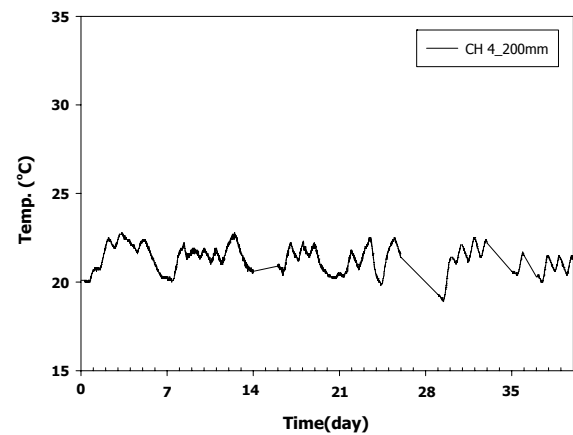
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3. Soil temperature variation at the distance with steel pipe in simulative heat pump system (SHPS): (a) 0 mm, (b) 50 mm, (c) 100 mm, (d) 200 mm.

plate를 대상으로 각각 40개체씩 colony를 취하여 계대배양 실시, Gram염색 후, 현미경을 통한 검경에서 순수 분리된 것을 확인한 후에 분리된 균주를 이용하여 catalase와 oxidase test를 실시하였다. 확보된 균주들로부터 PCR을 통하여 16s rDNA 염기서열 부분을 증폭하여 염기서열을 확보하였고, 확보된 16s rDNA 염기서열을 NCBI에 비교하여 균주의 동정을 실시하였으며, 동정된 결과를 바탕으로 성상분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 모의지열펌프시스템에 의한 온도변화

모의지열펌프시스템에서 토양의 온도변화는 40 일에 걸쳐 측정하였으며, 지하수의 온도는 27°C, 토양과 실험실 온

도는 항온습습기와 Circulator를 이용하여 20°C로 유지하였다. 또한 현장에서 실제 냉난방이 가동되는 시간을 고려하여 하루 8시간씩 모의실험을 진행하였으며, 이를 Data Logger를 이용하여 기록하였다.

0mm 지점, 즉 이송관 바로 옆에 부착한 센서의 온도변화는 지하수의 온도변화와 거의 동일하게 측정되었다. 평균적으로 약 7-8°C 정도의 온도 상승을 확인할 수 있었다. 50mm 지점의 센서도 약 5-6°C 정도의 온도변화를 보였으나 0mm 지점과의 차이는 확인이 가능하다. 이것은 거리의 차이가 약 50mm인 경우에도 토양의 온도는 변화함을 나타내 주는 결과라 할 수 있겠다. Fig. 3(c)와 Fig. 3(d)는 각각 100mm, 200mm 지점의 온도 변화를 관찰한 그래프이다. 100mm지점에서는 토양의 온도가 평균적으로 약 4°C 정도 상승하고, 200mm 지점의 토양에서는 약 2°C의 온도 상승을 확인할 수 있었다. 위의 그래프에서 보여지 듯 이송관내 지

Table 1. Groundwater analysis before and after heat pump circulation on March and May

	March		May	
	before	after	before	after
Temperature	-	13°C	-	17°C
pH	6.3	6.25	6.15	6.14
DO	5.54ppm	5.62ppm	9.6ppm	8.5ppm
TDS	204.7mg/L	208.0mg/L	207.0mg/L	205.2mg/L
COD	0mg/L	0mg/L	10.5mg/L	11.5mg/L
TOC	0.5654mg/L	1.18mg/L	0.1860mg/L	0.3702mg/L

Table 2. Groundwater analysis before and after heat pump circulation on March and May (Water Quality Standard)

검사항목	기준	March		May	
		순환 전A	순환 후B	순환 전A	순환 후B
수소이온농도	5.8-8.5	7.0	6.8	6.5	6.4
대장균 군수	5,000(대장균수 MPN/100mL)	<2	<2	<2	<2
질산성질소	20mg/L이하	6.2	7.1	6.1	6.2
염소이온	250mg/L이하	25	28	35	36
일반세균	100CFU/mL이하	30	8	35	85
카드뮴	0.01mg/L이하	불검출	불검출	불검출	불검출
비소	0.05mg/L이하	불검출	불검출	불검출	불검출
시안	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
수은	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
유기인	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
페놀	0.005mg/L이하	불검출	불검출	불검출	불검출
납	0.1mg/L이하	불검출	불검출	불검출	불검출
6가크롬	0.05mg/L이하	불검출	불검출	불검출	불검출
트리클로로에틸렌	0.03mg/L이하	불검출	불검출	불검출	불검출
테트라클로로에틸렌	0.01mg/L이하	불검출	불검출	불검출	불검출
1.1.1-트리클로로에탄	0.15mg/L이하	불검출	불검출	불검출	불검출
벤젠	0.015mg/L이하	불검출	불검출	불검출	불검출
톨루엔	1.0mg/L이하	불검출	0.0032	불검출	불검출
에틸벤젠	0.45mg/L이하	불검출	불검출	불검출	불검출
크실렌	0.75mg/L이하	불검출	불검출	불검출	불검출

하수의 온도에 따라 토양의 온도가 변화하고 각각의 거리마다 토양의 온도변화는 다르게 측정되는 것을 볼 수 있다.

3.2 모의지열펌프시스템에 의한 지하수 특성분석결과

3.2.1 지하수의 일반적인 특성분석

현장에서 사용되는 지하수는 3월과 5월에 각각 채취하여 측정하였으며, 지하수의 성상은 Table 1에서와 같이 나타났다.

온도와 pH, TDS, COD, DO 등의 모든 항목에서 현장 실험 전후의 변화가 거의 나타나지 않았으며, TOC의 경우 사용 후의 미세하게 증가하는 경향을 보였으나, 이는 컬럼 내에서 용존 유기물의 일시적인 단락에 의해 발생하는 것으로 사료되나, 이 또한 수질기준범위 안에서 극히 미세변화에 해당되어 전후의 변화가 거의 없는 것으로 판단된다.

3.2.2 생활용수 기준 분석

일반적인 측정항목 외에 유기물과 중금속 이온 등의 분석결과는 Table 2에서 나타내었다. Table 2에서 3월 수질기준평가 결과 모든 항목에 대해 지열펌프사용 전후에 기준치를 만족하였으며, 일반세균의 수치의 경우 순환 후에 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 5월의 수질기준평가 결과에서는 이와는 반대로 일반세균의 수치가 순환 후에 생활용수 기준 내에서 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 Table 1에서 나타난 3월과 5월경 계절에 따른 토양 및 지하수의 온도에 따라 미생물 성장에 영향을 준 것으로 보인다. 이는 지하수의 열을 토양에 전달함으로써, 미생물의 성장에 영향을 준 것으로 사료된다. 따라서 이 결과로 지열펌프순환에 따른 약간의 온도변화에 있어서도 미생물의 성장에 영향을 줄 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

또한 생활용수 기준으로 설비 내 배관을 순환 후의 지하수의 수질을 분석한 결과 인체에 유해한 물질은 전혀 검출이 되지 않았고, 모든 검사항목을 만족시키는 것으로 나타났다. 이는 지하수가 지열히트펌프 시스템에 사용 된 후 다른 용도로 사용이 가능함을 나타내며 지하수 자체의 수질이 매우 양호함을 나타내고 있다.

3.3 온도순환 및 블리딩(bleeding)에 따른 토양 미생물 동정 분석

모의지열펌프시스템(SHPS)을 이용한 온도순환실험과 지하수의 일정량을 반응조 내의 토양에 블리딩(bleeding)한 이후, 토양 시료의 미생물 동정분석 결과이다. 토양 시료는 serial dilution 후, 영양배지에 100μL씩 접종하여 28℃에서 4일간 배양을 실시하였다. Table 3은 온도순환과 블리딩 실험 전과 후의 토양 시료내의 균체수를 나타낸 것이다. 토양 시료의 경우 실험 전과 후에 $1.8 \times 10^6 \sim 2.1 \times 10^6$ cells/g로 균체량이 약 10% 감소하였다. 이는 블리딩(bleeding) 실험 후 미생물의 균체량의 상당수가 물에 쓸려 내려갔기 때문으로 사료된다.

Table 4와 Fig. 4는 온도순환과 블리딩 실험 전과 후의 토양 내의 미생물의 종을 분석한 결과이다. 순환 전에 우종을 차지하던 *Acidovorax*, *Bacillus*와 *Nocardioides* 등은 큰 폭으로 감소한 반면, 순환이 후 *Ralstonia*와 *Arthrobacter* 등은 큰 폭으로 증가하였다. 또한 순환 이전에 관측이 되지 않던 *Burkholderia*, *Cupriavidus*, *Janthinobacterium* 등이 새로이 나타남으로써 순환 이후 온도변화에 따라 미생물의 종의 변화가 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 *Burkholderia* 등의 미생물의 경우 병원성을 나타내는 것으로 알려져 있으나, 난분해성 오염물질에 대한 분해능을 가지는 종들이 많이 보고되고 있으며(정팔진 등 2004), *Cupriavidus*의 경우에는 Thiodiglycol를 분해하는 것으로 알려져 있다(박종덕 등 2007).

일반적으로 온도가 10℃ 증가 시 미생물의 양은 그에 비례하여 약 2배 가량 증가하는 것으로 알려져있다. 여기서는 토양의 온도가 평균적으로 10℃ 정도의 변화를 보였다. 이론에 따르면 토양 내 미생물의 양이 상당히 증가하여야 함에도 불구하고 미생물의 양이 오히려 감소한 것을 볼 수 있다. 이는 토양의 온도 변화 뿐 아니라 후에 이루어진 블리딩 실험 시 토양에 서식하고 있던 상당수의 미생물의 물에 쓸려 내려갔기 때문이라고 할 수 있다. 기존의 미생물과 더불어 새로운 종의 미생물이 나타난 것을 확인할 수 있는데 이는 기존 서식하고 있던 토착 미생물에 비해 토양 내 흡착이 우수한 종으로 사료된다.

Table 3. Microorganism population in soil performed with water circulation by simulative heat pump system (SHPS) and bleeding experiment

	Soil		decrease ratio
	before	after	
No. 1	2.5×10^5 cells/g	2.3×10^4 cells/g	10%
No. 2	2.0×10^5 cells/g	2.9×10^4 cells/g	
Ave.	2.3×10^5 cells/g	2.6×10^4 cells/g	

Table 4. Characteristic of microorganism isolated from water circulated by simulative heat pump system(SHPS) and bleeding experiment

Genus	before		after	
	Strain	%	Strain	%
<i>Acidovorax sp.</i>	5	12.5	1	2.5
<i>Agrococcus sp.</i>	1	2.5	0	0
<i>Aminobacter sp.</i>	1	2.5	0	0
<i>Arthrobacter sp.</i>	6	15	11	27.5
<i>Bacillus sp.</i>	3	7.5	0	0
<i>Caulobacter sp.</i>	1	2.5	0	0
<i>Comamonas sp.</i>	3	7.5	0	0
<i>Dietzia sp.</i>	1	2.5	0	0
<i>Gordonia sp.</i>	2	5	0	0
<i>Kocuria sp.</i>	1	2.5	0	0
<i>Leifsonia sp.</i>	1	2.5	0	0
<i>Lysobacter sp.</i>	2	5	0	0
<i>Mycobacterium sp.</i>	1	2.5	0	0
<i>Nocardia sp.</i>	1	2.5	0	0
<i>Nocardioides sp.</i>	6	15	0	0
<i>Ralstonia sp.</i>	1	2.5	18	45.0
<i>Rhodobacter sp.</i>	1	2.5	0	0
<i>Sinorhizobium sp.</i>	1	2.5	0	0
<i>Sphingomonas sp.</i>	1	2.5	0	0
<i>Streptomyces sp.</i>	1	2.5	0	0
<i>Burkholderia sp.</i>	0	0	3	7.5
<i>Cupriavidus sp.</i>	0	0	5	12.5
<i>Janthinobacterium sp.</i>	0	0	1	2.5
<i>Ralstonia sp.</i>	0	0	2	2.5
합계	40	100	40	100

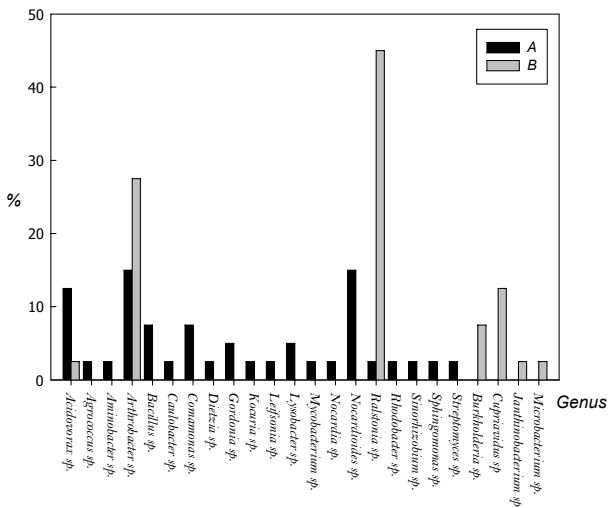


Fig. 4. Identification of microorganism isolated from water circulated by simulative heat pump system (SHPS) compost ion the basis of 16 rDNA analysis (A - before, B - after)

3.4 실제현장에서 지열펌프 이용시 지하수 내 미생물 동정 분석

실제 히트펌프가 가동 중인 청주대학교 예술대학에 펌프

순환의 전과 후의 지하수 시료를 이용하여 미생물 동정분석을 실시하였다. Table 6, 7과 Fig. 5은 실제현장에서 지열펌프 가동전과 후에 지하수 내 미생물 동정 분석의 결과이다. Table 6에서 볼 수 있듯 미생물의 균체량은 실험 전과 후에 각각 4.6×10^2 와 4.9×10^3 로 약 90% 정도 증가하였는데, 이는 지하수의 이송에 따른 토양온도의 증가로 미생물의 성장에 영향을 준 것으로 판단된다. 분리한 균주의 성상분석 결과 *Genus Acidovorax*, *Bacillus*, *Methylobacterium*, *Pseudomonas*, *Sphingomonas*가 지열펌프 가동전과 후에 동시에 나타났으며, *Genus Acidovorax*를 제외한 나머지 genus들의 경우 큰 차이가 나타나지 않았다(Table 7). 그러나 가동 전에 존재하던 *Genus Rhizobium*, *Bosea*, *Variorax*의 경우 가동 후에 나타나지 않았으며, *Genus Arthrobacter*의 경우 가동 후에 새로이 관측되었다. 이러한 온도에 따른 종의 변화는 이후 생물학적 토양 복원 시에 온도에 따라 처리에 유리한 종의 미생물의 배양효율을 높이는데 필요할 것으로 사료된다.

지하수 시료의 경우 미생물 균체량의 변화는 90%의 증가한 반면 미생물 종의 변화는 그리 크지 않다. 토양 시료와 비교하여 실험 기간의 차이가 없고 다른 변화 조건 없이

Table 5. Microorganism population in soil performed with groundwater circulation on steel pipe of heat pump.

	Groundwater		increase ratio
	before	after	
No. 1	4.7×10^2	4.6×10^3	90.5%
No. 2	4.6×10^2	5.1×10^3	
Ave.	4.6×10^2	4.9×10^3	

Table 6. Characteristic of microorganism isolated from groundwater circulated by heat pump

Genus	before		after	
	Strain	%	Strain	%
Acidovorax sp.	7	17.5	15	37.5
Bacillus sp.	5	12.5	3	7.5
Bosea sp.	3	7.5	0	0
Methylobacterium sp.	3	7.5	3	7.5
Pseudomonas sp.	9	22.5	11	27.5
Rhizobium sp.	5	12.5	0	0
Sphingomonas sp.	3	7.5	5	12.5
Variovorax sp.	5	12.5	0	0
Arthrobacter sp.	0	0	3	7.5
합 계	40	100	40	100

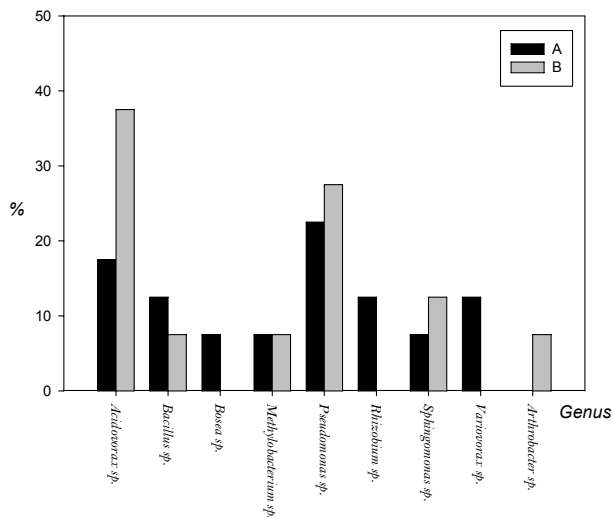


Fig. 5. Identification of microorganism isolated from groundwater circulated by heat pump composition on the basis of 16 rDNA analysis (A - before, B - after).

온도 변화만이 있다고 가정하였을 때 온도의 증가에 따라 자연스럽게 미생물의 양도 증가하게 된다. 지하수의 경우에는 현장의 지하수를 바로 채취하여 실험하는 과정에서 오차가 발생할 가능성이 있으며, 블리딩 실험에 따른 미생물의 쓸려 내려감은 없다고 생각할 수 있다. 사라진 미생물 종과 새로이 생겨난 종은 각기 최적의 온도에 따라 현재 순환 전 온도 이상이 될 때 사라지는 종이 있고 그 이상의 온도에서 생존하는 미생물의 종이 나타나게 되면서 이러한 결과가 나타나게 된다.

토양 및 지하수의 미생물 동정 분석을 통하여, 각각의 변화를 파악하였다. 토양과 지하수 모두의 경우 열원으로 사용되는 지하수의 온도가 미생물의 생태에 영향을 미치게 된다는 것이 확인 되었다. 이는 후에 토양 및 지하수 복원 시 별다른 처리 없이 미생물의 활용이 가능하다는 것을 보여주는 결과이다.

4. 결 론

본 연구에서는 스탠딩컬럼웰을 적용한 지열히트펌프 작동 시 지하수 이송관 주변 토양의 온도변화와 열원으로 사용되는 지하수의 성상을 분석하고 평가하였다. 이송관 주변 토양의 온도 변화는 이송관에서의 거리가 가까울수록 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 이송관 바로 주변 토양은 이송관을 흐르는 지하수의 온도와 거의 동일한 수치를 보였다. 이송관으로부터 거리가 멀어짐에 따라 온도의 영향은 감소하였다. 실험의 모사 대상인 청주대 현장의 경우는 강관이 아닌 PVC 관을 사용하고 있는데 PVC 관은 열전달 성능이 낮고, 부식 및 스케일의 우려가 없으므로 외부 충격에는 다소 약할 수 있으나 환경적인 측면에서는 훌륭한 선택이라 할 수 있겠다. 이송관을 흐르는 지하수의 성분분석 결과 지하수 자체의 수질이 양호하고, 실제 히트펌프에 이용된 후의 수질 또한 생활용수로서의 사용 기준에 만족하는 결과를 보였다. 이것은 히트펌프에서 지하수의 이용이 지하수 오염에 영향이 없음을 보여주는 결과라 할 수 있겠다.

다. 또한 토양과 지하수 내 미생물 분석을 통하여 히트펌프의 사용 전 후 미생물의 변화를 살펴본 결과 지하수의 경우에는 온도의 증가에 따라 미생물 양이 변화하는 것을 볼 수 있었다. 종의 변화도 있었으나 이는 토양에 비하면 미비하고 미생물이 서식하는 최적의 온도가 각기 달라 온도 변화에 따라 종의 변화가 있었다고 사료된다. 토양의 경우에는 미생물의 양이 상대적으로 감소하였는데 이는 온도 변화 실험 뿐 아니라 지하수 블리딩 실험으로 인해 상당수의 미생물이 물에 끌려 내려갔기 때문이라고 예측된다. 또한 지하수에 비해 상당히 많은 미생물의 종의 변화를 볼 수 있는데 이는 온도 변화와 토양 내 수분의 변화로 미생물의 서식 조건에 따른 변화라 볼 수 있겠다.

토양과 지하수의 영향을 분석한 결과 토양의 온도와 지하수의 성상 변화에 따라 토착 미생물의 변화가 있음을 알 수 있었으며, 이러한 변화는 토양 및 지하수 오염의 정화에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 지하수의 수질을 분석한 결과 히트펌프의 열원으로 사용되었을 경우 지하수 오염의 우려는 없는 것으로 사료된다. 이러한 결과는 후에 열원으로 사용되는 지하수의 농업용수 또는 공업용수로의 사용에 아무런 문제가 없음을 나타낸다. 또한 좀 더 세부적인 영향평가를 통하여 향후 SCW공법을 적용한 지열히트펌프 설계 전 후로 토양 및 지하수에 대한 꾸준한 모니터링이 지속되어야 하겠다.

참 고 문 헌

1. 김건영, 고용권, 김천수, 배대석, 박맹언 (2000), 유성 지역 지열수의 지구화학적 특성 연구, *지하수토양환경학회지*, Vol. 7, No. 1, pp. 32~46.
2. 김영복 (1998), 엔지구동 지열 열펌프의 성능 분석 : 부산·진주지방 지중온도 예측, *한국농업기계학회*, Vol. 23, No. 2, pp. 135~146.
3. 김용식, 김중현, 황광일 (2006), 주상복합 건축물에 적용된 지열이용 히트펌프 시스템의 냉방 성능 평가, *한국태양에너지학회 논문집*, Vol. 26, No. 4, pp. 9~16.
4. 김태용, 유호천 (1997), 주거 냉난방용 지열 에너지 이용효과에 관한 연구, *대한건축학회 논문집*, Vol. 33, No. 2, pp. 151~157.
5. 나상민 (2007), 지열 탐사 및 활용, *한국지반환경공학회*, Vol.

- 8, No. 1, pp. 19~30.
6. 박시삼 (2007), 지열의 정의, *한국지반환경공학회*, Vol. 8, No. 1, pp. 6~18.
7. 박시삼, 신경수 (2006), 지열이용 히트 펌프, *한국지반환경공학회*, Vol. 7, No. 4, pp. 8~18.
8. 박정환, 김주영, 홍원화, 안창환 (2008), 주거용 건물에 적용된 지하수 이용 지열 히트펌프 시스템의 냉방성능에 관한 연구, *대한건축학회 논문집*, Vol. 24, No. 3, pp. 273~280.
9. 박종덕, 김지천, 윤기홍 (2007), Thiodiglycol를 분해하는 *Cupriavidus sp.*의 분리특성, *미생물학회지*, Vol. 43, No. 4, pp. 311~316.
10. 에너지 관리공단 신·재생에너지센터 (2008), *신·재생에너지 RD&D 전략 2030* : 지열, pp. 81~88
11. 이의준 (2006), 지열원 열펌프 시스템 개발 및 보급 활성화 개선방안, *한국 신·재생에너지학회 추계학술대회논문집*, pp. 202~205.
12. 정두영, 송인근, 김영준 (2007), 음식물류폐수처리를 위한 유기물분해 미생물의 분리 및 동정, *유기성자원학회*, Vol. 15, No. 2, pp. 128~135.
13. 정상진, 이근상 (2008), 국내 지열에너지의 사용 현황과 환경영향, *한국공업화학회 공업화학전망*, Vol. 11, No. 4, pp. 1~8.
14. 정팔진, 조선영, 현미희, 김민정, 이은주, 전민식 (2004), *Burkholderia cepacia*를 이용한 축산폐수의 처리, *한국물환경학회지*, Vol. 20, No. 6, pp. 547~554.
15. 최미영, 고명진, 김용식, 박진철, 이언구 (2009), 지열히트펌프 시스템의 국내 적용현황 조사 및 분석, *대한설비공학회*, Vol. 21, No. 5, pp. 267~272.
16. DOE (2001), *Ground-source Heat Pumps Applied to Federal Facilities-2nd edition*, Federal Energy Management Program DOE/EE-0245(PNN L-13534), US Department of Energy, pp. 44.
17. Kavanaugh, S.P. and Rafferty, K. (1997), *Ground-Source Heat Pumps : Desing of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings*, ASHRAE, Atlanta, pp. 167.
18. Lee, J. Y. and Song, S. H. (2007), Groundwater Chemistry and Ionic Ratios in a Western Coastal Aquifer of Buan, Korea: Implication for Seawater Intrusion, *Geosciences Journal*, Vol. 11, No. 3, pp. 259~270.
19. Rees, S., Spitler, J., Deng, Z., Orio, C. and Johnson, C. (2004), A Study of Geothermal Heat Pump and Standing Column Well Performance, *ASHRAE Transactions*, Vol. 110, No. 1, pp. 3~13.
20. Taylor, H.E., Djawotho, P. and Stiles, L. (1998), Four Year Energy Analysis of the Stockton College Geothermal HVAC Retrofit. *2nd Stockton Geothermal Conference*, pp. 6.
21. 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. *2nd Stockton Geothermal Conference*, pp. 8.

(접수일: 2009. 7. 10 심사일: 2009. 8. 4 심사완료일: 2009. 10. 14)