

수변지역 개방형 지하수열 활용 기술 연구

배광옥*, 이은혜*, 이강근*, 김규범**

*서울대학교 지구환경과학부, ** K-water연구원 수변지하수 연구단장

1. 개요

수변지역 충적층 지하수의 연중 수온차를 열에너지원으로 활용하는 것은 양적으로 풍부한 수변지역 지하수 활용을 극대화 할 수 있는 방안이다. 수변 충적층의 풍부한 지하수량과 개방형 지열시스템의 융합은 300 RT 이상의 대용량 지열원의 확보도 가능하게 한다. 특히 상수도 공급을 위한 강변여과수개발사업 등과 연계하면 수변 개방형 지열냉난방시스템 지중시설의 초기 시설비용과 운영비를 크게 절감할 수 있다. 이러한 장점에도 불구하고 국내에서 수변 개방형 지열 활용에 대한 연구 및 기술개발은 매우 미흡한 실정이었다. 일반적으로 개방형 지열 시스템이 밀폐형 지열 시스템에 비해 효율이 월등히 높은 것으로 알려져 있으나, 지중에 물질 및 에너지를 인공적으로 주입하는 행위의 적절성 여부와 환경 영향을 판단할 수 있는 연구사례는 거의 없었다.

4대강살리기사업은 결과적으로 수변지역 지하수에도 영향을 주게 된다. 4대강 사업으로 변화된 지표수와 지하수 환경을 적절하게 활용하고 수변지역의 효율적이고 체계적인 이용관리를 위하여 정부는 친수구역활용특별법을 제정하여 수변지역의 관리를 강화하는 조치를 취한 바 있다. 친수

구역활용특별법은 수변지역에서 하천으로부터 2 km 이내 지역의 일부를 체계적으로 개발할 수 있는 내용을 포함하고 있는데, 하천과의 연계성과 신재생에너지의 활용을 최대화할 것을 기본 방향으로 하고 있어 대용량의 지열에너지의 필요성과 효율성이 대두되고 있다. 또한 전국적인 에너지 절감 노력에 부응하여 수변지역에서 수자원의 양적인 균형을 유지하면서 냉난방으로 인한 에너지 수요를 지열에너지 활용으로 대체해 나간다면 우리나라의 전력 사용 절감에도 부응하게 될 것이다. 이러한 측면에서 본다면 에너지를 절감하고 환경친화적인 수변 지하수열원에 대한 수요는 꾸준히 증가할 것으로 예상된다.

이러한 현실 요구를 반영하여 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)의 “수변지하수 활용 고도화 연구단”(단장 김규범 박사, 한국수자원공사)의 제4세부과제로 “수변지역 지질·지하수 융합 에너지 활용기술 개발”(연구책임자 이강근 교수, 서울대학교) 연구를 2011년 11월에 착수하여 2016년 6월까지 4년 8개월간의 일정으로 수행하고 있다.

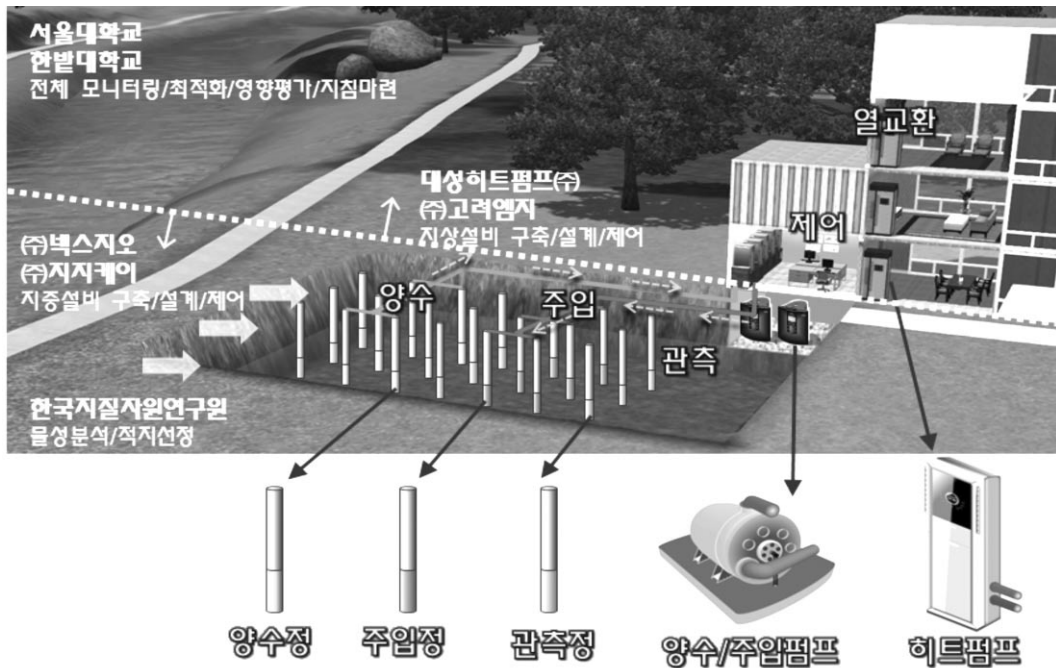
본 연구는 수변지역 충적 대수층에 부존하는 대용량 지하수 열원을 활용하는 지중 및 지상설비를 포괄하여 기존 지열활용 시스템 대비 10% 이

상 효율이 개선된 개방형 냉난방 시스템을 확보하고, 수리지질학적 특성 자료와 지질매체의 열물성 자료, 히트펌프 입·출구 온도 등을 모니터링하여 지하수열의 추출과 활용 효율을 높이고 최적화하는 것으로 목표로 한다. 또한 테스트베드를 구축하여 개발된 수변 지하수열원 활용 개방형 시스템의 직접 운영을 통해 검증하고, 수변 층적층 지하수열 냉난방시스템의 설계, 운영, 환경영향에 대한 기술적 지침을 마련하여 실용화와 보급 확대 기반을 넓히는 것이 연구의 주요 추진방향이다.

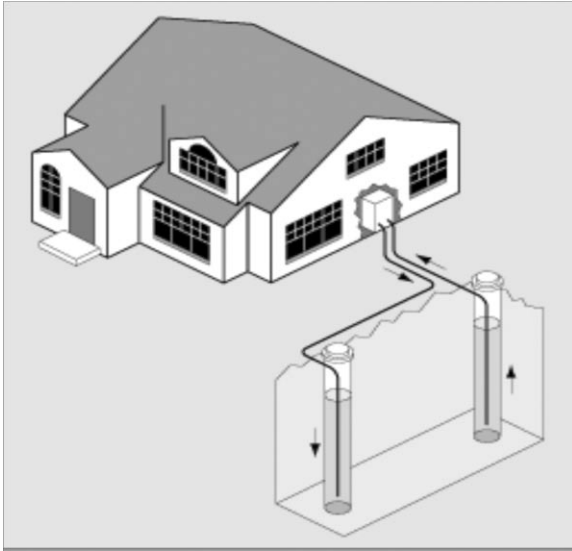
2. 연구팀 구성

연구팀은 다년간 지열에너지 관련 기술의 연구 개발 경험과 실무 노하우를 축적해온 대학교 두 곳(서울대학교, 한밭대학교), 대기업 한 곳(대성히트펌프(주)), 중소기업 세 곳((주)넥스지오,

(주)지지케이, (주)고려엠지), 정부출연연구소 한 곳(한국지질자원연구원) 등 총 7개 참여기관으로 구성하였다. 서울대학교는 주관기관으로서 지하수 수질 등 물환경 모니터링, 수치 모델링을 이용한 지열 활용 최적화, 환경영향평가 방안 및 지침 수립 등의 연구를 수행한다. 한밭대학교는 수변 지하수열 활용 지상 핵심기기 설계 및 성능평가 기반기술 개발, 대성히트펌프(주)와 (주)고려엠지는 히트펌프 등 지상설비 설계·구축·제어기술 개발, (주)넥스지오와 (주)지지케이는 지열정 등 지중설비 설계·구축·제어기술 개발, 한국지질자원연구원은 열물성 측정·분석, 지열 부존량 평가, 적지 선정 등의 역할을 맡고 있다(그림 1). 수변 지하수열 활용 시스템의 전 요소기술 분야를 망라하는 연구팀을 구성하여 통합적이고 유기적인 연구 시스템이 구축·운영될 수 있도록 하였다.



[그림 1] 에너지 리사이클링



[그림 2] Double Well 지열 시스템 개념도

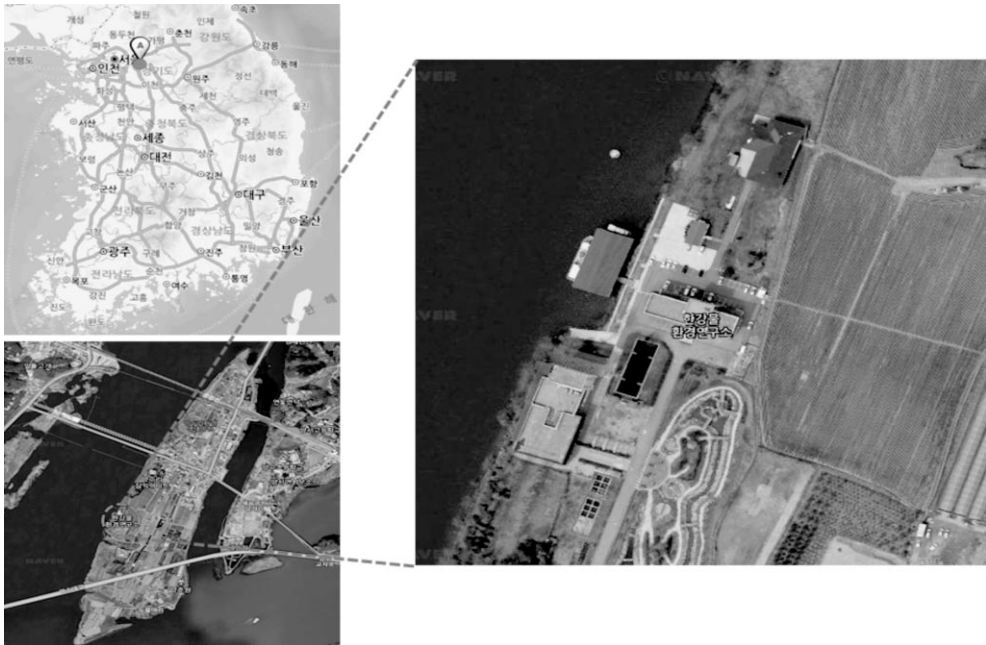
3. 개방형(Double Well) 지열 냉난방 시스템

수변 충적대수층의 풍부한 지하수량을 감안하

여, 본 연구에서는 가장 효율이 뛰어난 양수정과 주입정이 한 쌍이 되는 Double Well 개방형 시스템을 기술 개발 및 실증 시험 대상으로 한다(그림 2). 이 시스템은 건물 루프의 열교환기와 지하수 루프의 열교환기를 분리 설치하면, 각 루프를 최적의 서로 다른 유량으로 운영하여 최고의 효율 목표를 달성할 수 있다. 또한 밀폐형과 유사하게 지속적인 비용절감이 가능한 에너지 효율을 제공한다. 하지만, 시스템의 이용 가능 열용량이 지하수 양수 가능량에 의존하므로 수리전도도와 비양수량이 큰 대수층을 찾아내야 하는 어려움도 있다.

4. 테스트베드 구축 및 운영

실증 연구시설 구축을 통한 지속적인 지열 활용 시스템 모니터링, 지열정 설치·운영 전후의 지하수 환경 변화 모니터링, 개발 기술의 실용화 검증을 위해 적절한 조건을 갖춘 지역에 테스트베드



[그림 3] 테스트베드 위치도



(a) 한강물환경연구소 측정분석동

(b) 측정분석동 FCU 설치

(c) 지하수 온도, 수위, 수질 관측정 설치

[그림 4] 테스트베드 시설 구축

를 구축·운영하는 것이 필수적이다. 테스트베드 부지 선정을 위해 냉난방 부하가 되는 건물(학교, 박물관, 국가 및 지방 공공기관 우선)의 존재 여부, 강과의 이격 거리, 모래·자갈층의 두께 등의 수리지질 조건을 고려하여 한강 유역 11개소, 금강 유역 8개소, 낙동강 유역 21개소에 대한 디지털맵 조사와 문헌조사를 수행한 결과 북한강 수변에 위치한 경기도 양평군 소재 한강물환경연구소 부지를 테스트베드로 선정하여 구축·운영 중에 있다(그림 3).

냉난방 부하로 이용할 한강물환경연구소 측정분석동 건물은 연면적 440 m² 규모로 2011년 말 건물 개보수공사를 진행시 지열원 히트펌프와 연결할 실내배관과 FCU, 지하수 수온, 수위, 수질 관측정, 지열 시험정 설치 공사를 진행하였다(그림 4).

5. 현재까지 연구성과

본 연구과제는 수변 충적층 지하수를 열원으로 하는 Double Well 개방형 지열 시스템의 지중설비(지열정 등) 설계·시공·제어기술, 지상설비(히트펌프 등) 설계·제작·시공·제어기술, 수변 충적층 지질 매체의 열물성 조사·분석 및 지열 부존량 평가, 지하수·지열·미생물 생태 환경 모니터링 조사, 지열정 배치 설계 및 운영 최적화,

수변 지하수열 활용에 의한 환경영향 평가 기술 지침 수립 등 지열 에너지 활용과 관련된 거의 전 분야와 내용을 망라하고 있다. 이 글에서는 현재 까지 진행된 테스트베드 시추조사, 지하수 및 북한강 수위·수온 관측, 수리물성 조사를 위한 양수시험, 열물성 조사, 지하수 및 북한강 수질 분석, 수치모델링 분석 성과를 중심으로 소개하고자 한다.

5.1 관측정 시추조사

테스트베드 부지의 토양, 수리지질 특성 및 열물성 파악과 지하수 수위, 수온, 수질 관측, 미생물 시료채취 등의 목적으로 관측정 2공(YSO-1, YSO-2)과 수리지질 특성 조사·시험 용도의 시험정(YSP-1)을 설치하였다. 각 관측정은 연암층인 지표 하부 50 m까지 충적층(지표하 17m까지)은 200 mm 구경, 풍화대 및 연암층(지표하 17~50m)는 150 mm 구경으로 굴착하였다. 관측정 굴착시 토출되는 파쇄암분(slime) 확인 결과, 관측정과 시험정 모두 유사하게 지표에서 12 m까지는 표토, 실트, 실트질 모래 및 자갈등으로 구성되어 있고, 12 m ~ 18 m까지 자갈, 모래 및 실트질 모래 등으로 이루어져 있으며, 지표하 18 m ~ 50 m까지 풍화된 편마암류로 구분된다(표 1).

<표 1> 관측정 시추조사 결과

공 번	지 질	심도(m)	두께(m)	지층특성
관측정1 (YSO-1)	표토	0.0 ~ 2.0	2.0	매립토 및 퇴적층
	미사질토	2.0 ~ 8.0	6.0	모래가 섞인 실트질 모래
	미사질토	12.0 ~ 15.0	3.0	자갈이 약간 섞인 실트질 모래
	사역토	15.0 ~ 17.0	2.0	큰자갈이 섞인 모래
	연암	17.0 ~ 20.0	33.0	편마암류
관측정2 (YSO-2)	표토	0.0 ~ 2.0	2.0	매립토 및 퇴적층
	미사질토	2.0 ~ 12.0	10.0	모래가 섞인 실트질 모래
	미사질토	10.0 ~ 14.0	4.0	자갈이 약간 섞인 실트질 모래
	사역토	14.0 ~ 17.0	3.0	큰자갈이 섞인 모래
	연암	17.0 ~ 50.0	33.0	편마암류
시험정 (YSP-1)	표토	0.0 ~ 2.0	2.0	매립토 및 퇴적층
	점토	2.0 ~ 4.0	2.0	매우 조밀한 점토층
	미사질토	4.0 ~ 10.0	6.0	모래가 섞인 실트질 모래
	미사질토	10.0 ~ 14.0	4.0	자갈이 약간 섞인 실트질 모래
	사역토	14.0 ~ 16.0	2.0	큰자갈이 섞인 모래
	연암	16.0 ~ 31.0	15.0	편마암류

5.2 지하수 및 북한강 수위, 수온 관측

열교환의 주요 매체인 지하수와 지하수에 영향을 미치는 북한강의 시계열 수위, 수온 변화를 파악하기 위하여 CTD-Diver 자동관측기를 관측정 두 곳, 시험정(YSP-1)과 북한강에 설치하였다. 측정 간격은 30분으로 설정하였다.

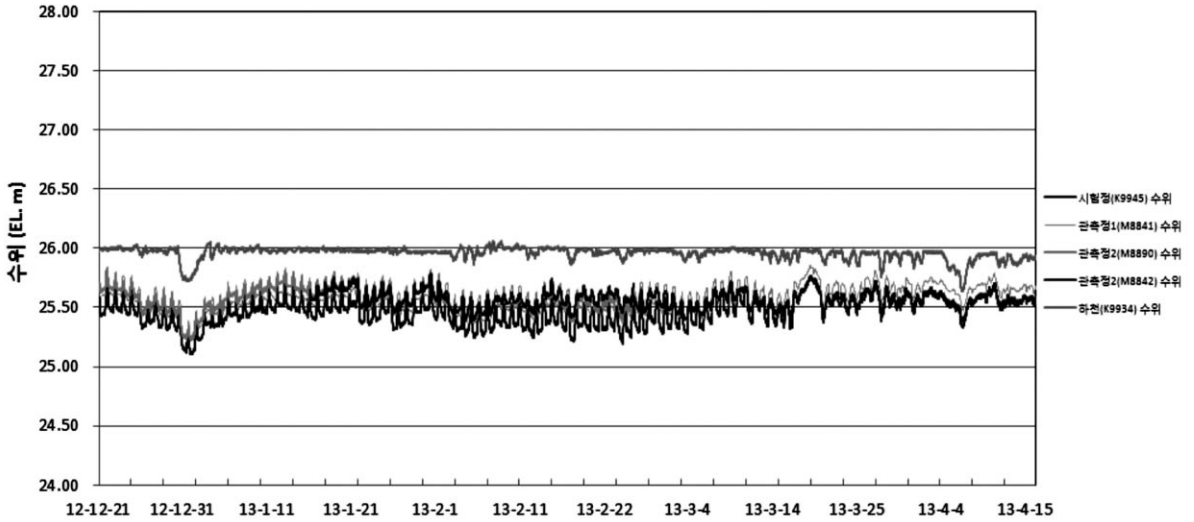
5.2.1 수위

그림 5는 2012년 12월 21일부터 2013년 4월 15일까지 약 4개월간 측정된 관측정, 시험정, 북한강의 수위 변화를 나타낸다. 관측정과 시험정의 변화 양상은 거의 같게 나타나고, 북한강의 수위변화는 관측정들에 비해 변화폭이 작았다. 시험정과 관측정자료에서는 지구조석과 강물 결빙의 영향으로 약 1일 주기의 반복적인 변화 양상을 보이며, 북한강의 결빙 상태가 해제되는 3월

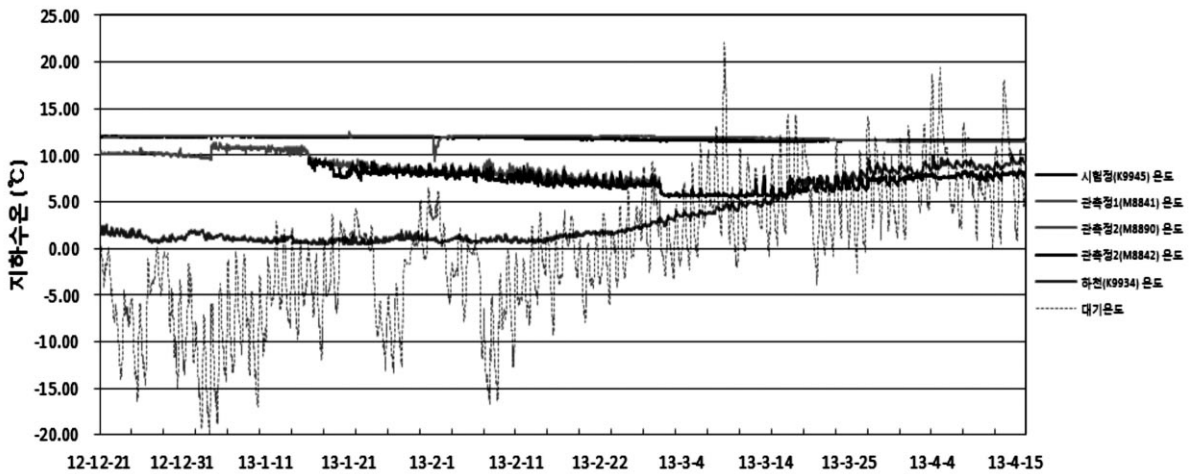
중순경부터 1일 주기 변동은 다소 불규칙한 양상을 보인다.

5.2.2 수온

그림 6과 같이 북한강으로부터 40 m 이상 떨어진 시험정과 YSO-1 관측정의 경우 수온 변화폭이 1°C 이내로 안정적이지만, 강에서 약 4 m 떨어진 YSO-2 관측정의 경우는 변화폭이 5°C로 강수온의 영향을 더 받음을 알 수 있다. 강물의 온도는 대기 온도의 변화에 직접적으로 영향을 받는 것으로 나타났다. 강물의 온도는 2013년 1월 21일에 최저온도인 0.46°C에 도달하는 반면, 시험정과 YSO-1에서는 3월 17일에 최저온도인 11.47°C에 도달한다. 따라서 주어진 부지 내에서 강수온의 영향에 덜 민감한 위치에 지열정을 배치하는 것이 지열 냉난방에 더 유리할 것이다.



[그림 5] 관측정, 시험정, 북한강 수위 변동



[그림 6] 관측정, 시험정, 북한강 수온 변동

5.3 수리지질 특성 및 열물성 조사

시험정에서 1,500 m³/day 양수량으로 12시간 동안 지하수를 양수하면서 시험정 및 관측정에서 지하수위 강하를 측정하였다. 시험정에서의 최종 수위강하는 4.81 m로 유지되었으며, 양수시험 자료 분석 결과, 대수층의 수리전도도는 7.1×10^{-2} cm/sec로 매우 큰 값을 나타냈다. 단계양수시험

결과 얻어진 적정 양수량은 1,800 m³/day 이상으로 대용량의 지열 시스템을 확보할 수 있는 양수량으로 평가되었다.

최소 교란 시료를 이용한 대수층 매질의 열물성을 측정하기 위하여 튜브 샘플링을 시행하였다. 시료는 YSP-1 시험정과 YSO-1 관측정 인근에서 한 지점, YSO-2 관측정 인근에서 한 지점, YSO-2 와 YSP-1 사이 중간 위치에서 한 지점

<표 2> 주요 이온 분석 결과

시료명	HCO3-	NO3-N	Cl-	SO42-	Br-	PO43-	F-	Na+	K+	Ca2+	Mg2+	Fe2+	Mn2+	Si4+
	(mg/L)													
YSO-1	79.3	2.3	5.6	9.9	ND	ND	0.2	4.9	1.8	13.8	3.2	0.5	0.0	1.7
YSO-2	183.0	25.7	17.7	33.2	0.1	ND	0.1	12.9	1.3	56.7	13.2	0.2	0.4	4.6
YSP-1	158.6	6.6	12.6	13.8	ND	ND	0.1	8.1	1.1	22.5	7.4	0.2	0.0	3.9
북한강	73.2	1.7	6.1	6.6	ND	ND	0.1	4.5	1.3	7.4	1.7	0.1	0.0	0.9

ND=not detected

등 모두 3개 지점에서 샘플러 관벽에 의한 교란을 최소화하기 위하여 직경을 100 mm로 채취하였다. 채취 심도 구간은 3.45 ~ 8.78 m이다. 미국 Anter사의 Quickline-30 needle probe를 사용하여 시료들의 열전도율, 체적열량, 열확산계수를 실험실에서 측정한 결과, 모래층 열전도도의 조화평균이 1.38 W/mK, 체적열량이 2.18×10^6 J/m²K, 열확산계수가 6.33×10^{-7} m²/s의 값을 보였고, 실트질점토층의 열전도도 조화평균이 1.21 W/mK, 체적열량이 2.12×10^6 J/m²K, 열확산계수가 5.71×10^{-7} m²/s의 값을 나타냈다. 세 지점의 시료들에서 측정된 모래층의 열전도도는 실트질점토층의 열전도도보다 약간 높은 것으로 나타난다. 이는 모래의 구성광물 중에 열전도도가 높은 석영(~ 7.7 W/mK)의 함량이 실트질점토층의 석영 함량보다 높아서 나타나는 현상으로 판단된다.

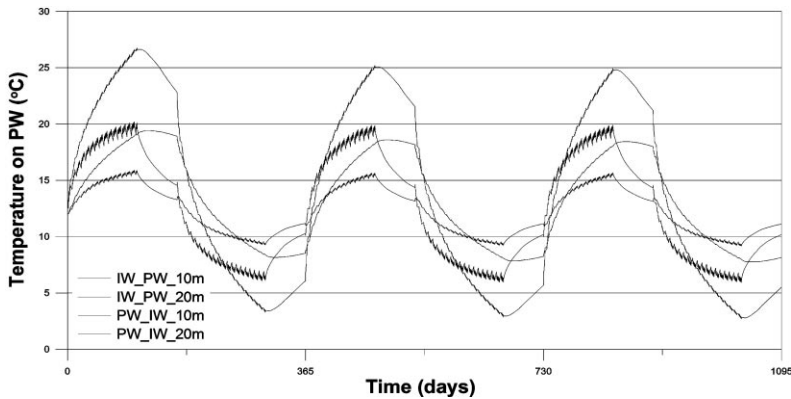
5.4 수질 분석

표 2에서 보는 바와 같이 YSO-2 관측점에서 NO3-N의 농도는 25.7 mg/L로 먹는물 수질 기준인 10 mg/L와 농업용수 수질 기준인 20 mg/L를 초과하였다. Pb, As, Cd 항목은 검출되지 않으며, Ni은 YSO-2 관정에서만 0.02 mg/L로 나타나며, Cu와 Cr은 모든 관정에서 낮은 농도로 검출되었다. 중금속 중에서 Zn 농도는 다른 중금속에 비해서 높으며, 시료에 따라서 0.01 ~ 10.19 mg/L의 농도를 나타낸다. 일반세균은 모든 시료에서 먹는물 수질 기준치인 100 CFU/mL를 초과하며 특히, YSO-2(15,000 CFU/mL)와 시험정(10,000 CFU/mL)에서 많은 수의 일반세균이 검출되어 향후 개방형 지열 시스템 가동시 미생물에 의한 막힘, 부식 현상 등에 대한 심도 깊은 연구를 진행할 예정이다.

<표 3> 중금속 및 미생물 분석 결과

시료명	Cu	Ni	Zn	Pb	As	Cr	Cd	일반세균 (CFU/mL)	총대장균군	대장균
	(mg/L)									
YSO-1	0.05	ND	0.08	ND	ND	0.03	ND	4100	불검출	불검출
YSO-2	0.03	0.02	3.26	ND	ND	0.04	ND	15000	검출	불검출
YSP-1	0.03	ND	10.19	ND	ND	0.02	ND	10000	불검출	불검출
북한강	0.03	ND	0.01	ND	ND	0.02	ND	200	검출	불검출

ND=not detected



[그림 7] 개방형 시스템 운영 조건에 따른 양수정 온도 변화

5.5 수치모델링에 의한 지열정 배치 설계

Double Well 지열 시스템의 지열정 배치 등의 설계를 위하여 수치모델링(FEFLOW)을 수행하였다. 테스트베드가 위치한 양수리 섬 전역을 모의 영역으로 하였고, 지하수 유동에 따른 양수정과 주입정의 배열, 양수정과 주입정 간 거리 조합에 따른 운영 형태의 적절성을 평가하였다.

그림 7은 지열 시스템 운영 형태에 따른 주입정에 주입된 물의 온도에 의한 양수정에서의 열간섭 영향을 나타낸다. PW_IW는 양수정이 주입정보다 하류에 위치하는 경우이고, IW_PW는 양수정이 주입정보다 상류에 위치하는 경우이다. 양수정이 상류에 위치하고 두 관정간 거리가 멀수록 주입정에 주입된 물의 온도에 의한 열간섭이 작아 시스템 운영 효율이 높아짐을 알 수 있다. 수치모델링 기법을 활용하면 제한된 토지 면적에서 허용 가능한 열간섭의 정도에 부합하는 양수정과 주입정간 최적의 배치와 거리를 도출하는 것이 가능하다.

6. 맺음말

본 연구는 향후 3년간에 걸쳐 수변 충적층에 특화된 지열정(양수정 및 주입정) 및 관련 설비 세부설계·시공, 신규 개발 지열원 히트펌프 기계설

및 관련 설비 시공, 수변 지열 시스템 시운전, 2년 이상의 기간 동안 냉난방 운전 및 입출구 온도, 전력 사용량 모니터링, 지열 시스템 가동 시 지하수·지열 환경 변화 모니터링, 수치모델링을 통한 지열정 배치 및 간격 설계 기법, 수변 지열 활용시 환경영향 평가 기술지침 수립 등의 연구가 진행될 계획이다. 연구 결과 도출될 특허, 신기술 등의 성과는 참여기업에의 기술이전을 통해 실용화·상업화해 나갈 것이며, 설계·시공기준, 환경영향평가 기술지침 등은 관련 부처와 협의를 통해 제도화를 추진해 나갈 것이다.

우리나라 국가하천들과 중대형 지방하천들에 발달되어 있는 수변 충적층은 지역 특성에 따라 다소간의 차이는 있으나, 풍부한 수량의 지하수와 지열원을 공급할 수 있는 능력을 갖고 있다. 이제는 수변 충적층 지하수를 강변여과수와 같은 상수도 공급원으로의 활용과 더불어, 환경친화적이고 풍부한 지열 냉난방 에너지원으로 그 쓰임새를 넓혀 나가야 하겠다.

사 사

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁시행한 물관리연구사업(11기술혁신C05)에 의한 ‘수변지하수활용고도화’ 연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 