

강변여과수(충적층 및 하상) 열자원 활용 기술 개발

김 형수¹⁾, 서 민우²⁾, 정 우성³⁾, 송 윤호⁴⁾

Development of Technology on Water Thermal Energy Utilization of Riverbank(including Alluvial and Riverbed deposits) Filtration

Hyoung-Soo Kim, Minwoo Seo, Woosung Jung, Yoonho Song

Key words : Thermal energy(열에너지), Bankfiltration(강변여과), Alluvial(충적층), Heat pump(열 펌프), Riverbed deposit(하상)

Abstract : Geothermal energy becomes to be one of the promising energy sources. In this study, technology using water thermal energy from riverbank filtration system(including alluvial and riverbed deposit) is reviewed and checked as an energy resources. The objects of this study are (1) long-term monitoring of alluvial and riverbed sites, (2) preliminary design of cooling and heating system at riverbank filtration facility, and (3) calculation of potential groundwater heat energy, including riverbank filtration system. Measuring data of alluvial and riverbank filtration show slight fluctuations comparing to temperature of atmospheric air, which indicates that groundwater obtained from the riverbank filtration system have a sufficient potential as a source of cooling and heating energy.

Subscript

toe : ton of oil equivalent
RT : 냉각톤 (refrigerating ton)
COP : 성능계수 (coefficient of performance)
RBF : 강변여과 (riverbank filtration)

1. 서 론

최근 들어, 석유 가격의 폭등과 함께 국가적으로 화석연료 이외의 에너지에 대한 관심이 고조되고 있으며, 지열 에너지 개발도 대체 에너지의 하나로 주목을 받고 있다. 이에 정부는 2004년 4월 “ 대체 에너지 개발 및 이용 보급 촉진법” 시행령을 공포하여 국가, 지방자치단체, 정부투자기관 등의 공공기관은 의무적으로 대체 에너지를 활용할 것을 권고한 바 있다.

지열 에너지 개발은 크게 두 가지 범주로 구분할 수 있다[1]. 우선 지열-전기 응용 방식으로 매우 높은 지열로 인해 발생하는 지하의 수증기를 이용하여 발전용 터빈을 돌려 전기를 얻는 방식이다. 또 한 가지는 지열을 직접 난방 등에 활용하는 방식으로 직접 방식으로 불리며, 유럽에서는 낮은 열량만을 활용한다는 의미로 낮은 엔탈피(low enthalpy) 방식으로 불리기도 한다. 지열 에너지 이용 냉난방 시스템은 지중 열교환기 포함 전체 시스템의 초기 설치비가 기존의 냉난방 설비보다 크다는 단점이 있지만, 연간 유지비가 적게 들고, 이산화탄소와 같은 온실가스의 배출이 적어 환경적인 측면

에서도 최근 많은 주목을 받고 있다.

본 연구의 목적은 지열 에너지를 직접 방식으로 불리는 에너지 개발 방식을 이용하여 하천[2] 주변의 충적층 및 하상 바닥의 열자원 활용 타당성을 평가하고, 이를 적용한 시험 시설을 설치하여 적용성을 실증적으로 확인하고, 본 기술의 경제성을 개략적으로 산정하는 것이다.

강변여과수(RBF) 열자원 활용 기술이란, 일반적으로 지하수 혹은 하천 바닥 물은 지상 대기 온도가 기후 변화에 매우 민감한데 반하여 상대적으로 계절적인 온도 변화가 작다는 특성을 이용하여 에너지를 얻는 방식을 말한다. 대표적인 유도방식 인공함양방법인 강변여과방식은 강변에 존재하는 대수층의 오염저감능력을 이용하는 기법으로, 하천과 인접한 곳에 양수정을 설치하여 하천과 양수정 사이에 물의 흐름을 관정방향으로 유도하는 방식을 말한다(그림 1)[2].

- 1) 한국수자원공사 수자원연구원
E-mail : hskim@kowaco.or.kr
Tel : (042)860-0330 Fax : (042)860-0357
- 2) 한국수자원공사 수자원연구원
E-mail : minwseo@kowaco.or.kr
Tel : (042)860-0422 Fax : (042)860-0357
- 3) 한국수자원공사 수자원연구원
E-mail : usjung@kowaco.or.kr
Tel : (042)860-0325 Fax : (042)860-0357
- 4) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
E-mail : song@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3175 Fax : (042)863-9404

이러한 강변여과수 혹은 하천수 열에너지는 동절기에는 열펌프의 증발기 가열열원으로 하절기에는 응축기의 냉각열원으로 이용하면, 공기를 열원으로 하는 열펌프에 비해 고효율로 냉온열을 제조하여 단위 건물의 열공급원으로 이용할 수 있다는 장점이 있다[3, 4].

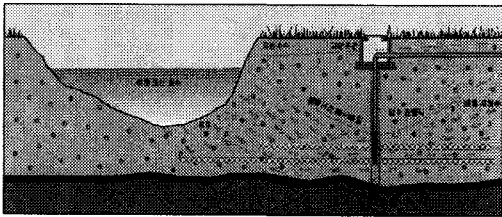
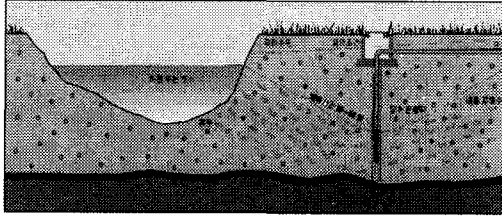


Fig. 1 강변여과 방식 모식도 (상단: 수직방식, 하단: 수평방식)

2. 강변여과 현장 수온 변화 조사

2.1 대상 지역

계절 변화에 따른 충적층 및 하상에서의 온도 분포를 장기적으로 모니터링하기 위하여 대청 조정지댐 직상류 및 하류를 그 대상지역으로 선정하였다.

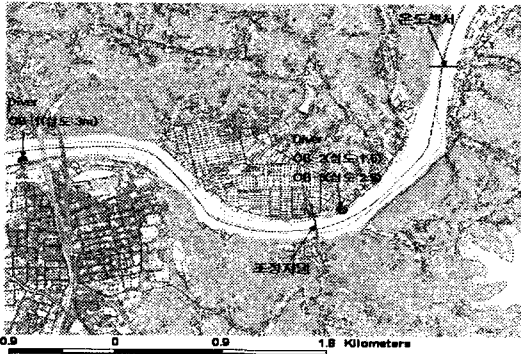


Fig. 2 충적층 및 하상바닥 센서 설치 위치

대청 조정지댐 직상류 및 하류의 충적층에서의 장기 온도 모니터링은 2004년 12월에 자동 온도 측정 장치를 3개소에 설치한 후, 매30분 간격으로 온도 변화를 측정하였다. 또한 대청 조정지댐 하상 바닥부 온도는 2005년 4월 이후부터 38개의 온도센서를 하상 바닥에 설치하고(그림 2), 2개의 온도 센서를 대기 중에 노출시켜, 매 1시간 간격으로 온도변화를 관측하였다. 또한 기존 강변여과 시험 현장인 충적층에서 수위변화와 함께 수온을 측정하여 대기온도와 수온의 온도 차이를 확인하였다.

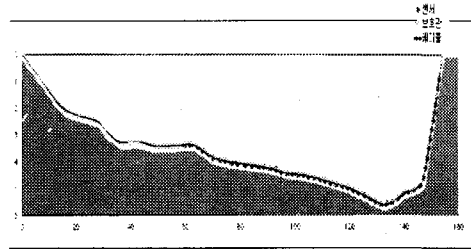


Fig. 3 하상 바닥에 설치된 온도 센서 위치

2.2 관측 결과

2.2.1 대청 조정지댐 상하류

충적층 2곳 3개 위치에서 수행한 온도 변화 측정 결과와 하상 바닥에서 측정한 온도 변화는 그림 4, 그림 5와 같다.

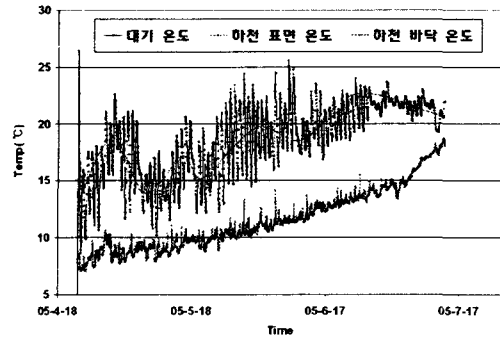


Fig. 4 측정된 대기 및 하상 바닥 온도

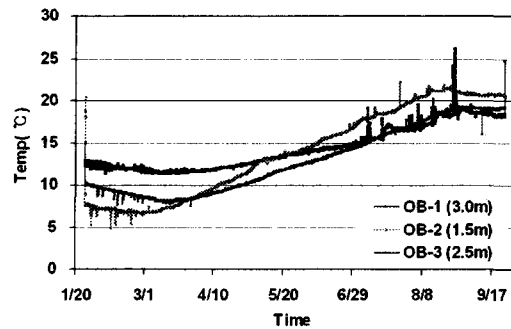


Fig. 5 측정된 충적층 온도 분포

그림 4는 대기온도와 하천에 설치된 온도 분포를 함께 보여주고 있다. 그림을 살펴보면 봄(4월, 5월)에는 대기온도와 하천 온도사이에 약 5도에서 10도 정도의 일정한 차이 보이고 있었다. 하지만 여름(7월)으로 갈수록 하천 온도와 대기온도 사이에 온도 차이가 점점 줄어드는 모습을 보이고 있으며, 따라서 이 부분에 대한 지속적인 관측이 필요하다. 또한 충적층에서 측정된 자료를 보면 충적층의 깊이가 깊을수록(OB-1) 온도차이가 작음을 확인할 수 있었다. 약 3.0m 깊이에 설치된 OB-1의 경우, 여름과 겨울 사이에 약 5도 정도의 온도 차만을 보였다. 이는 충적층에서 강변여과수를 취수할 경우, 냉난방용으로 사용하기에 충분한 가능성이 있는 에너지원임을 의미한다.

2.2.2 강변여과 시험 현장 총적층

기존 총적층 지하수에 대한 5년간 측정한 대기온도, 수위 및 총적층 온도 변화는 그림 6 같다[5]. 이러한 국내 총적층 지하수의 온도 변화는 하천 주변 총적층을 활용하는 강변여과 현장에서도 비슷한 양상을 보일 것으로 판단된다. 그림에서 대기온도와 총적층 온도를 비교해 보면 크기는 15도까지 그리고 평균적으로 5도에서 10도 정도의 온도 차이가 남을 알 수 있다. 그리고 최대 대기 온도와 최대 총적층 온도 사이에는 일정 시간의 지체가 있음도 발견할 수 있었다. 본 그림에서 보여지는 계절에 따른 온도 차이 경향과 최대점 발현 지점의 시간 지연 자료 등은 향후 강변여과를 이용한 지열 시스템 설계시 유용한 참고자료가 될 수 있을 것이다.

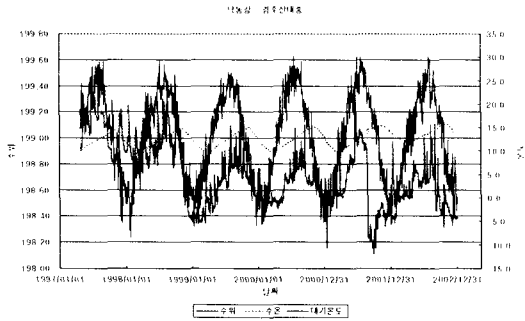


Fig. 6 총적층지하수 현장에서의 온도 관측

2.3 소결 및 향후 계획

총적층 및 하상에 대한 장기 온도 모니터링 결과 총적층 및 하상의 온도 조건은 대기 온도에 비해 냉난방을 위한 열교환 시 적어도 5도에서 10도 정도의 온도 편차가 있는 것으로 평가되었다. 그러나 낮은 깊이의 하천에서는 여름에는 대기온도와 하천수 사이에 온도차이가 작게 발생하였으며 이는 하천수 이용 냉난방 시스템에는 한계요소로 작용할 수 있다. 이 부분에 대해서는 계속적인 관측이 필요하다. 하지만 하천 인근 총적층에서 단기·장기간 관측한 자료를 살펴보면 깊은 곳일수록 그 온도 변화가 작았으며, 따라서 하천 인근 총적층에서 취수를 하는 강변여과수 역시 냉난방 시스템에 활용하기 매우 유리한 에너지원임을 확인하였다.

3. 강변여과수 열자원 활용 시스템 설계

강변여과수를 열원으로 사용하면 사계절 수온이 균등하게 유지되어 수온변화에 따른 문제가 발생되지 않으며, 홍수나 갈수기에도 수질과 수량이 안정적으로 공급할 수 있다. 본 연구에서는 강변여과수와 대기 온도 간에 온도차를 이용하는 냉난방 시스템의 타당성을 검토하기 위하여, 기존에 설치 운영되고 있는 강변여과 시설에 지열 펌프를 설치하는 냉난방 시스템 예비 설계를 실시하였다.

지열원 히트펌프 시스템(GHPs: Geothermal heat pumps)의 종류는 크게 3가지로 나눌 수 있다. 즉, 지표면에 있는 물을 이용하는 지표수 시스템(SWHP: surface-water heat pump systems), 땅속에 파이프를 묻고 내부에 유체를 순환시키는 지열 시스템(GCHP: Ground-coupled heat pump systems), 지하수를 이용하는 지하수 시스템(GWHP: Ground-water heat pump

systems)으로 나눌 수 있다. 그리고 지하수 시스템(GWHP)은 단일공 시스템(SCW: Standing column well systems)으로부터 지하수를 직접 순환시키는 방식인 개방회로(open-loop)시스템이 있다.

3.1 창원시 강변여과시설 개요

창원시에 위치한 강변여과시설은 용수확보 방안으로 낙동강 제방 제외지에 수직 집수정을 설치하여 상수원으로 사용하고 있으며, 총 3단계 사업 중 현재 1단계 사업이 완료되어 정상 운영 중에 있다. 본 강변여과시설은 총 24개의 취수공과 8대의 송수펌프, 11개의 가압소로 구성되어 있으며, 하루 가능 최대 공급량은 180,000 m³이며, 현재 하루 60,000 m³의 물을 취수 및 정수하여 일반 수용가로 공급하고 있다.

3.2 강변여과 냉난방 시스템 설계

지열원 히트펌프 시스템은 공기열원 히트펌프 시스템(air source heat pump)보다 에너지 소비가 적고, 열원이 공기보다 안정적이며, 대기 중에 노출되는 기기가 없으며, 사용되는 냉매의 양이 상대적으로 적다는 장점이 있다. 그러나 지중열 교환기의 매설을 포함한 전체 시스템의 초기 설치비가 기존 냉난방 설비보다 큰 것은 단점이라고 할 수 있다.

본 연구의 대상인 지열원(강변여과수) 히트펌프 시스템(GHPs: Geothermal heat pumps)은 상수도 취수장에서 취수한 강변여과수를 본관에서 분기하여 이를 열원으로 사용하도록 설계되었다. 기존에 어느 정도 장치가 설치된 상수도 사업소 내 강변여과수를 열원으로 사용하므로 초기 설치비가 저렴하고, 연간 온도 변화가 적은 강변여과수를 열원으로 이용하기 때문에 향후 효과적이고도 경제적인 냉난방 시스템이 될 수 있을 것으로 예상된다.

본 시스템은 강변여과수를 직접 순환시키는 방식인 개방회로 시스템으로 설계되었으며, 따라서 상수도 사업소 강변여과수 본관에서 분기된 일부 강변여과수는 냉방 시에는 열교환기에서 열을 흡수하고, 난방 시에는 반대로 열교환기를 통해 열을 공급하는 시스템으로 냉난방에 활용하도록 하였다. 그리고 열교환을 끝낸 순환수는 다시 정수장으로 보내져 정수가 되도록 시스템을 구성하였다.

예비 시험을 위한 창원시 강변여과수 시설 활용 냉난방 시스템에는 15 RT급 히트펌프 1대를 설치하여, 창원시 상수도사업소 내 체력단련실, 사무실, 문서고, 소회의실 등의 냉난방을 담당하도록 설계하였다. 냉매의 압축은 스크롤식 압축기를 사용하는 것으로 하였으며, 본 현장에 설계된 히트 펌프는 냉방시 15.0 USRT, 난방시 50.5 Mcal/h의 냉난방 부하를 가지며 약 450 m³의 면적의 냉난방을 담당할 수 있도록 하였다.

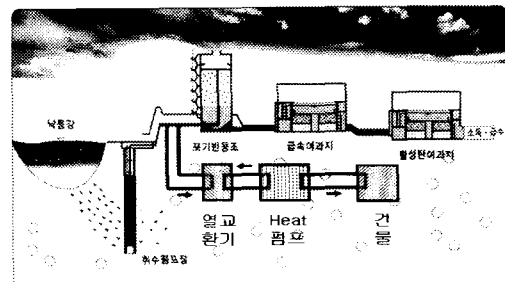


Fig. 6 강변여과수 활용 냉난방 시스템 개념도

4. 지하수 열에너지 보급 가능량 산정

지하수, 특히 강변여과수를 이용한 에너지 개발 가능량 및 기존 에너지 대체 효과를 대략적으로 산정하여 보았다. 개발 가능량과 현재 상황을 비교하기 위하여 먼저 최근까지 지열 열펌프 보급 추세를 살펴보면 표 1과 같다. 현재까지 누적된 양을 살펴보면, 총 34개 지점에 약 1,768 RT 용량의 지열열펌프가 설치되었으며, 이용량은 석탄, 천연가스 등 모든 에너지 사용량을 원유 1 ton이 내는 발열량으로 환산한 에너지 단위인 toe로 환산하였을 때 이 수치는 약 1,355 toe였다.

Table 1 국내 지열 열펌프 보급 추세 (2004 대체에너지보급통계)

항목 \ 년도	2000	2001	2002	2003	2004
총개소수	1	5	10	14	34
RT	10	88	207	670	1,768
toe/yr	-	-	122	393	1,355

지하수 열자원 이용 가능량을 추정해보면 다음과 같다. 기존 자료에 의하면 2002년도 지하수 사용량은 3,467,857,397 m³/yr으로 조사되었고, 그 중 생활용수와 공업용수 사용량은 전체 사용량의 53%에 해당하는 1,824,999,192 m³/yr(≅5,000,000 m³/d)였다. 지하수로부터 냉난방에 활용 가능한 에너지량은 식 (1)에 의해 산정된다.

$$0.131\text{toe/yr(per m}^3/\text{d)} \times 5,000,000\text{m}^3/\text{d} \cong 655,000\text{toe/yr} \quad (1)$$

여기서, 계수 0.131은 1 m³/d 수량에 대한 연간 열에너지 생산량을 의미하는 계수로 아래와 같이 계산된다.

$$0.7\text{kW} \times 3,600\text{sec} \times 24\text{h} \times 65\text{day} \times 0.25(\text{capacity factor}) = 5,518.8 \text{ MJ} = 0.131\text{toe} \quad (2)$$

또한 0.7 kW는 통상 15 °C의 부피 10 m³/d의 열에너지가 2 RT 혹은 7.034 kW임을 고려하여, 부피가 1 m³/d인 경우에 해당하는 에너지 값을 의미한다.

따라서, 식 (1)에 의하면 지하수로부터 냉난방에 활용 가능한 총 에너지량은 655,000 toe/yr이고, 이 중에서 2015년까지 이중 약 20%만을 활용할 수 있다고 해도 이 규모는 130,000 toe/yr이 된다. 이 크기는 현재까지 지열 이용량(표 1 참조)의 10배에 이르는 양으로 아직도 지하수로부터 활용 가능한 에너지량은 충분할 뿐만 아니라, 그 잠재력도 매우 큼을 알 수 있다.

한편 강변 여과수의 경우, 2015년경에는 약 300,000 m³/d의 용량의 시설이 설치될 것으로 예상하고 있다. 이는 위의 식 (1)과 동일한 방법에 의해 연간 개발 가능 에너지를 계산해보면,

$$0.131\text{toe/yr(per m}^3/\text{d)} \times 300,000\text{m}^3/\text{d} \cong 40,000\text{toe/yr} \quad (3)$$

에 해당한다. 이는 강변여과수 시스템 운영 시 수온차 열에너지를 냉난방에 이용할 수 있다면, 2004년에 지열 열펌프로 얻은 에너지의 약 3배에 해당하는 에너지를

얻을 수 있다는 의미이다. 즉, 강변여과 시스템에 열펌프 이용 냉난방 시스템을 설치한다면 상당한 규모의 에너지를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

5. 예비 결론 및 향후 계획

본 연구는 하천과 인접한 곳에 양수정을 설치하여 물을 취수하는 방식인 강변여과수의 열적 특성, 즉 년중 작은 온도차 특성을 이용하여 경제적인 냉난방 시스템을 개발하고자 계획되었으며, 이를 위해 하천 및 층적층 온도 관측, 강변 여과 시설에 대한 냉난방 시스템 예비설계, 대략적인 지하수 열에너지 보급 가능량을 산정하였다. 현장 온도 관측을 통해 하천 인접 층적층의 온도 변화가 대기온도에 비해 매우 안정적인 모습 보이고 있음을 확인하였으며, 대략적인 열에너지 활용 가능량 산정을 통해 지하수 및 강변여과수가 향후 냉난방 시스템 큰 기여를 할 잠재적인 에너지원임을 정량적으로 확인하였다. 또한 강변여과수 활용 냉난방 시스템의 실제 적용 가능성을 검증하기 위하여, 현재 운영 중인 시설에 본 시스템 설치를 위한 예비 설계를 수행하였으며, 향후 설치 및 장기적인 운영을 통해 본 시스템의 활용성을 평가할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부“ 에너지·자원 기술 개발 사업”의 일환임을 밝혀둡니다. 연구비를 지원해준 산업자원부(에너지관리공단)와 참여 기업인 한국수자원공사, 티이엔 및 씨엔이에 감사드리며, 특히, 강변여과수 활용 냉난방 설비에 대한 설계 자료를 제공해주신 티이엔의 김태원 사장과 이진중 과장께 감사드립니다.

References

- [1] Harrison, R., Mortimer, N. D., Smarason, O. B., 1990, Geothermal Heating, Pergamon Press, 558p.
- [2] 김형수, 석희준, 2004, 지속가능한 지하수 개발 및 인공함양, 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단 기술보고서(TR2004-04), 66p.
- [3] 박성룡, 안영훈, 박준택, 라호상, 2002, 하천수 열원 열펌프 시스템의 성능 분석, 대한설비공학회 2002 하계학술발표대회 논문집, pp.420-428
- [4] 남현규, 서정아, 김영일, 신영기, 2004, 지하수 열원 열펌프 시스템 개발을 위한 지하수 온도 변화 특성 연구, 대한설비공학회 2004 동계학술발표대회 논문집, pp.439-444
- [5] 한정상, 한규상, 한혁상, 한찬, 2005, 지열열펌프 냉난방 시스템(재판), 한림원.