한국신·재생에너지학회 2006년도 춘계학술대회논문집 pp.455~458

지열히트펌프 운영에 따른 지하수 환경영향 평가

김진한[1], 박수영[2], 박정환[3], 김태원[4]

Evaluation of Underground Water Environmental Effects on Performance of the Geo-thermal Heat Pump

Jinhan Kim[1], Sooyoung Park[2], Junghwan Park[3], Taiwon Kim[4]

Key words : Geo-thermal(지열), Heat pump(히트펌프), Environmental effects(환경영향), Underground water(지하수)

Abstract : 본 연구는 자연에너지를 이용하는 모든 냉·난방기술 중에서 에너지효율이 가장 높은 것으로 알려져 있으며 에너지 자원이 부족하고 에너지비용이 높은 상황에서 반드시 필요한 기술인 지하수를 이용한 건물의 냉·난방을 수행하는 스탠딩컬럼웰 지열히트펌프 기술을 운영함에 따른 지하수에 미치는 환경영향을 평가하기 위해 수행되었다. 즉, 스탠딩컬럼웰을 적용한 지열히트펌프 시설이 가동되고 있는 주변지역의 지하수질 및 지하수위의 변화를 평가하기 위하여 지하수 환경영향평가를 실시하였다.

연구결과, 히트펌프의 유입수 및 유출수, 그리고 주변 지역의 수질은 지하수 수질기준 및 공업용수, 생활용수 수질기준에 적합한 안정적인 수질을 나타내었으며, 시설 운영에 따른 지하수 오염은 거의 없는 것으로 판단된다. 또한 지열히트펌프에 이용되는 4개의 양수정에 의한 주변 지역의 지하수위 변화 등의 영향을 예측하기 위하여 취수가 없는 상태와 양수정당 취수량을 50m^3/day로 증가시켰을 경우를 가정하여 지하수두를 분석한 결과 취수량을 증가시켰을 경우 지하수두가 약 2.2m 감소하는 것으로 나타나 조사지역내의 지하수 거동은 양수정 가동조건과 주변지역에 분포되어 있는 정천의 취수량 변화에 따라 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

1. 서 론

일반적으로 사용되는 에너지원으로 석탄, 석유, 천연가스 등과 같은 화석연료를 이용하거나, 또는 핵연료를 이용하는 경우가 대부분이다. 그러나 화석연료는 연소과정에서 발생하는 각종 공해물질로 인하여 환경을 오염시키고 핵연료는 수질오염 및 방사능과 같은 유해물질을 발생시키는 단점과 함께 이들 에너지원은 매장량의 한계가 있다. 따라서 근래에는 거의 영향을 미치지 않으면서 무한한 에너지를 얻을 수 있는 장점이 있는 반면 에너지 밀도가 대단히 낮은 결점으로 인하여 그 밀도를 높여야 이용 가능한 형태로 변환하는 것이 자연에너지 기술개발의 핵심관건이라 할 수 있다. 이러한 자연에너지 기술 중의 하나로 각광받고 있는 것이 지열을 열원으로 이용하여 냉난방을 행하는 히트펌프 시스템이 알려져 있는데 이것은 온도가 10~20℃인 지중의 열에너지를 이용하는 기술이다.

지열이나 지하수를 이용한 히트펌프 시스템은 자연에너지를 이용하는 모든 냉난방 기술 중에서 에너지 효율이 가장 높은 것으로 알려져 있으며 에너지자원이 부족하고 에너지비용이 높은 상황에서 반드시 필요한 기술이라 할 수 있다.

본 연구는 스탠딩컬럼웰을 적용한 지열히트펌프 시설이 가동되고 있는 주변지역의 지하수질 및 지하수위의 변화를 평가하기 위하여 지하수 환경영향평가를 실시하였다.

1) 인천전문대학 환경화학과 교수
E-mail : jhkim@icc.ac.kr
Tel : (032)760-8756 Fax : (032)760-8282
2) (주)에스엔비텍 대표이사
E-mail : drakepark@hanmail.net
Tel : (032)766-7522 Fax : (032)766-7534
3) 인하공업전문대학 화공환경과 부교수
E-mail : jhpark@inhatc.ac.kr
Tel : (032)766-7566 Fax : (032)766-7534
4) (주)티이엔 대표이사
E-mail : t1@ten-i.com
Tel : (032)260-1266 Fax : (032)260-1260

2. 실증실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구를 위한 실증시설은 인천광역시 서구 심곡동에 위치한 인천기독교종합사회복지관에 설을 설치하였는데, 총 5개의 지하수 관정을 시공하였고 그 중 4개는 착정심도가 400m, 천공 구경은 165~200mm이며 나머지 하나의 관정은 지하심도별 온도 측정공으로서 착정심도 500m, 천공 구경 165mm로 시공하였다.

따라서, 실증시설의 운영에 따른 지하수 환경영향을 평가하기 위해 주변지역의 지하수질 및 지하수위의 변화를 평가하였고 지하수질의 경우 히트펌프 유입수 및 유출수와 이미 그 지하수를 사용하고 있는 것으로 판단되는 주변지역 3곳의 지하수의 수질을 모니터링하였다. 또한 지하수를 이용함에 따라 주변 지역에서 예상되는 지하수의 유동에 관한 현상을 파악하기 위하여 Visual MODFLOW를 이용하여 지하수의 거동 및 분포, 그리고 지하수 오염 가능성을 3차원적으로 해석하였다.

2.2 실험방법

1) 지하수 수질 모니터링

지하수 수질 분석은 히트펌프 유입수 및 유출수 경우 실증시설이 가동된 2005년 7월부터 현재까지 월 1회씩 분석하였으며 지하수를 생활용수로 사용하고 있는 주변지역의 경우 연구가 시작된 2004년 8월부터 현재까지 월 1회씩 분석하였다.

지하수 수질 분석 항목은 지하수 수질기준에 근거하여 총 52개 수질항목에 대해 분석을 실시하였다.

2) 지하수 흐름 컴퓨터 Modeling

실증시설 주변지역에서 지하수의 유동에 관한 현상을 파악하기 위하여 Visual MODFLOW를 이용하여 지하수의 거동을 3차원적으로 해석하였다.

MODFLOW(Modular Three-Dimensional Finite Difference Flow Model)모형은 미국 지질조사국(USGS)에서 개발한 3차원 지하수 유동모형으로 McDonald and Harbaugh(1988)에 의하여 처음으로 개발된 이후에 여러 보완 작업을 거쳐 현재 MODFLOW-2000이 개발되어 지하수 거동 해석에 가장 널리 사용되고 있다. 이 모형에서는 지하수 흐름에 대한 편미분 방정식을 유한차분법 수치해석으로 정리하는데, 자유수면 지하수와 피압대수층 지하수의 유동과 여러 층의 지층에 대한 3차원 흐름을 모사할 수 있으며 우물, 지하배수, 지표면 함양, 강 및 하천, 수위경계조건, 증발산 등에 의한 영향을 해석할 수 있는 기능을 가지고 있다.

일정한 밀도를 가지는 다공성매질을 통해서 흐르는 등온조건의 지하수는 다음 식 (1)의 3차원 편미분 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z})-W=S_x\frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

여기서,

K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} =x,y,z 좌표축의 수리전도도 (hydraulic conductivity, LT-1)

h = 지하수 수위(potentiometric head, L)

W = 대수층 단위부피당 부피 flux(T-1)

S_s = 대수층의 비저류계수 (specific storage coefficient, L-1)

t = 시간(T)

일반적으로 S_s, K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}는 대수층의 특성에 따른 공간의 함수($S_s=S_s(x,y,z)$, $K_{xx}=K_{xx}(x,y,z)$)이고, W는 시간과 공간의 함수($W=W(x,y,z,t)$)이다. 식 (1)은 불균질, 비등방성 매질의 비정상상태의 지하수 흐름을 나타내는 식으로 분석적 해는 불가능하므로 유한차분법(finite difference method)을 이용한 수치해석으로 근사값을 얻는다.

식 (1)을 각 미분항에 대하여 중앙차분으로 바꾸고 시간 미분에 대하여 전방차분을 취하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t}=\frac{h^{m}_{i,j,k}-h^{m-1}_{i,j,k}}{\Delta t} \quad (2)$$

여기서, $h^{m}_{i,j,k}$는 시간간격 m에서 i,j,k셀에 있는 지하수두, x, y, z는 각각 x, y, z좌표 격자점간의 간격, t는 시간간격, 아래첨자 i,j,k는 각각x, y, z 좌표의 지수이다. 한편 Kxx, Kyy, Kzz 에 대하여 Taylor series를 적용하여 2차 이상의 항을 생략하면 식(3)과 같이 정리된다.

$$K_{xx\ i,j,k}=K_{xx\ i+\frac{1}{2},j,k}+\frac{\partial K_{xx\ i,j,k}}{\partial x}\cdot\frac{\Delta x}{2}$$

$$K_{yy\ i,j,k}=K_{yy\ i,j+\frac{1}{2},k}+\frac{\partial K_{yy\ i,j,k}}{\partial y}\cdot\frac{\Delta y}{2}$$

$$K_{zz\ i,j,k}=K_{zz\ i,j,k+\frac{1}{2}}+\frac{\partial K_{zz\ i,j,k}}{\partial z}\cdot\frac{\Delta z}{2} \quad (3)$$

따라서, 식 (3)을 식(1)에 적용시키고 정리하면 식(4)를 얻을 수 있다.

$$K_{xx\,i+\frac{1}{2},j,k}\cdot\frac{h^m_{i+1,j,k}-h^m_{i,j,k}}{\Delta x^2}-K_{xx\,i-\frac{1}{2},j,k}\cdot\frac{h^m_{i,j,k}-h^m_{i-1,j,k}}{\Delta x^2}$$

$$-K_{yy\,i,j+\frac{1}{2},k}\cdot\frac{h^m_{i,j+1,k}-h^m_{i,j,k}}{\Delta y^2}-K_{xx\,i-\frac{1}{2},j,k}\cdot\frac{h^m_{i,j,k}-h^m_{i,j-1,k}}{\Delta y^2}$$

$$-K_{zz\,i,j,k+\frac{1}{2}}\cdot\frac{h^m_{i,j,k+1}-h^m_{i,j,k}}{\Delta z^2}-K_{xx\,i-\frac{1}{2},j,k}\cdot\frac{h^m_{i,j,k}-h^m_{i,j,k-1}}{\Delta z^2}$$

$$-W_{i,j,k}=S_{s\,i,j,k}\cdot\frac{h^m_{i,j,k}-h^{m-1}_{i,j,k}}{\Delta t} \qquad (4)$$

위와 같은 방정식이 수치계산을 위한 기본 차분방정식이다. 각 격자망의 요소 및 시간에 대하여 식(4)의 연립방정식을 구하면 해를 얻을 수 있게 된다.

한편, 주변여건을 고려하여 지하수 유동해석에 사용한 MODFLOW 모형의 적용을 위한 경계조건을 설정하였으며, 시추된 지질자료를 근거로 MODFLOW모델의 매개변수를 추정하였다.

3. 결과분석

3.1 지하수질 영향평가

3.1.1 유입수 수질

히트펌프로 유입되는 유입수 수질 분석결과 미생물에 관한 항목 중 일반세균이 14~19CFU/mL로 측정되었고 총대장균군과 여시니아균 및 대장균/분원성대장균군은 검출되지 않았다.

건강상 유해영향 무기물질에 관한 항목 중 불소 및 질산성질소를 제외한 모든 항목은 측정되지 않았으며 불소는 0.2~0.5 mg/L로 측정되었으며 질산성질소는 1.4~2.2mg/L로 측정되었다.

건강상 유해영향 유기물질에 관한 항목과 소독제 및 소독부산물질에 관한 항목은 모두 검출되지 않았으며 심미적 영향물질에 관한 항목 중 냄새 및 맛은 적합하게 측정되었으며 구리, 세제(음이온계면활성제), 철, 망간, 알루미늄도 검출되지 않았다. 경도의 경우 6~12mg/L, 과망간산칼륨 소비량은 1.2~1.7mg/L, 색도는 기준이 5도 이하인데 모두 3도이하로 측정되었다. 수소이온농도(pH)는 6.9~7.2로 중성을 나타내었으며 아연의 경우 0.003~0.01mg/L가 측정되었다. 염소이온농도는 7~9mg/L, 증발잔류물(TS)은310~415 mg/L로 500mg/L이하인 기준치를 만족시켰다. 탁도는 0.25~0.39NTU로 측정되었고 황산이온은 14~18mg/L가 측정되었다.

3.1.2 유출수 수질

유출수 수질 분석 결과 미생물에 관한 항목 중 일반세균이 15~20CFU/mL로 측정되었고 총대장균군과 여시니아균 및 대장균/분원성대장균군 역시 검출되지 않았다.

건강상 유해영향 무기물질에 관한 항목도 유입수와 마찬가지로 불소 및 질산성질소를 제외한 모든 항목은 측정되지 않았으며 불소는 0.2~0.5 mg/L로 측정되었으며 질산성질소는 1.5~2.4mg/L로 측정되었다.

건강상 유해영향 유기물질에 관한 항목과 소독제 및 소독부산물질에 관한 항목은 모두 검출되지 않았으며 심미적 영향물질에 관한 항목 중 냄새 및 맛은 적합하게 측정되었으며 구리, 세제(음이온계면활성제), 철, 망간, 알루미늄도 검출되지 않았다. 경도는 12~15mg/L, 과망간산칼륨 소비량은 1~1.5mg/L, 색도는 모두 2도이하로 측정되었다. 수소이온농도(pH)는 6.8~7로 중성을 나타내었으며 아연의 경우 0.019~0.033mg/L가 측정되었다. 염소이온농도는 7~12mg/L, 증발잔류물(TS)은324~420 mg/L로 500mg/L이하인 기준치를 만족시켰다. 탁도는 0.26~0.39NTU로 측정되었고 황산이온은 14~17mg/L가 측정되었다.

3.1.3 주변지역 수질 분석

본 실증시설 주변에서 같은 지하수를 이용하는 것으로 예측되는 3에 대하여 지하수 수질을 분석하였다.

A, B, C 지점의 지하수 수질 분석 결과 미생물에 관한 항목 중 일반세균이 세 지역 모두 5월에서 8월 사이에 기준치인 100CFU/mL에 가까운 75~98CFU/mL로 높게 검출되었다. 그러나 총대장균군과 여시니아균, 대장균/분원성대장균군은 모두 검출되지 않았다.

건강상 유해영향 무기물질에 관한 항목도 유입수와 마찬가지로 불소 및 질산성질소를 제외한 모든 항목은 측정되지 않았고 불소는 세 지역 중 A 지점이 2.3~3.89 mg/L로 가장 높게 측정되었으며 B지점이 0.1 mg/L 이내로 낮게 측정되었다. 또한 질산성질소 역시 A 지점이 1.6~2.5 mg/L로 높게 측정되었고 C 지점이 0.4 mg/L 이내로 측정되었다.

건강상 유해영향 유기물질에 관한 항목과 소독제 및 소독부산물질에 관한 항목은 세 지역 모두 검출되지 않았으며 심미적 영향물질에 관한 항목 중 냄새 및 맛은 적합하게 측정되었고 구리, 세제(음이온계면활성제), 알루미늄은 검출되지 않았다.

결론적으로 지하수 수질 분석 결과 실증시설의 가동에 따른 지하수질의 변화는 없는 것으로 판단된다.

3.2 지하수 흐름 컴퓨터 Modeling

MODFLOW 모형의 보정은 모델의 경계조건으로 STR패키지를 이용하였다. 즉, 실증시설 주변지역의 공촌천과 심곡천을 하천(Stream) 경계조건으로 하여(복개된 하천 구간은 경계조건에서 제외) 물리적으로 적절한 범위의 수리전도도로 보정함으로써 모델에서 계산된 수두와 관측정(OW1)에서 측정된 지하수 수두를 비교하여 수행하였다. 관측치와 계산된 지하수두의 상대오차는 0.68%로 신뢰할만한 수준으로 나타났다.

스탠딩컬럼웰 방식의 지열히트펌프에 이용되는 4개의 양수정에 의한 지하수의 영향을 예측하기 위하여 취수가 없는 상태와 각 양수정당 취수량을 50m^3/day로 증가시켰을 경우를 가정하여 지하수두를 분석한 결과 취수가 없는 경우에는 수

두변화가 60cm 상승하는 것으로 조사되었고 취수량을 50m³/day로 늘렸을 경우에는 지하수두가 2.2m 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 조사지역내의 지하수 거동은 양수정 가동조건과 주변지역에 분포되어 있는 정천의 취수량 변화에 따라 민감하게 반응할 것으로 판단된다.

또한 조사지역인 양수정의 지하수 흐름 상류에는 잠재적 오염원이 위치해 있지 않은 관계로 외부 오염원에 의한 양수정에 대한 지하수 오염은 없을 것으로 판단된다. 그러나 대상지역의 잠재오염원 중에서 정천 오염에 영향을 미칠 수 있는 잠재오염원이 있어 이들에 대한 지하수 오염 가능성을 분석하여 보았다. 이들 잠재오염원은 유류 및 유해화학물질의 누출이 예상되는 오염원으로서 정천의 지하수 흐름 상류 지역에 위치하고 있으므로 이들에 대한 오염가능성을 조사하였다.

지하수 오염에 대한 모사는 양수정에서는 취수가 없는 상태하에서 실시하였고, 그 결과 Fig. 1에 나타난 오염물질의 진행 궤적과 같이 추정된 잠재오염지역에서 유출되는 오염물질은 정천을 오염시킬 수 있음을 알 수 있었다.

이때 자유면 대수층을 기준으로 볼 때 오염물질이 정천 1에 도달하는 시간은 약 340일, 그리고 정천2는 약 820일만에 도달하는 것으로 분석되었다. 또한 오염물질 유출지역의 오염물질 중 약 2/3가량은 심곡천 방향으로 흘러 들어가고 그 나머지는 공촌천 하류 방향으로 유출되고 있음을 알 수 있다. 그러나 이들 오염물질 현황 분석은 모사에 사용된 수리학적 파라미터에 의존하는 것으로 정량적이라기보다는 정성적인 면을 고려해야 할 것임이 확실하나 이들 잠재오염원에 대한 관리가 철저히 이루어져야 할 것으로 판단된다. 따라서 조사지역에 분포되어 있는 잠재 오염원에 대한 오염물질의 종류 및 유출량 그리고 지하수의 오염농도를 측정하여 해당지역에 대한 오염물질의 예측과 오염도를 정확히 알아내는 것이 필요하고 이에 대한 모니터링을 수행할 수 있는 지하수 수질보호계획이 필요할 것으로 판단된다.

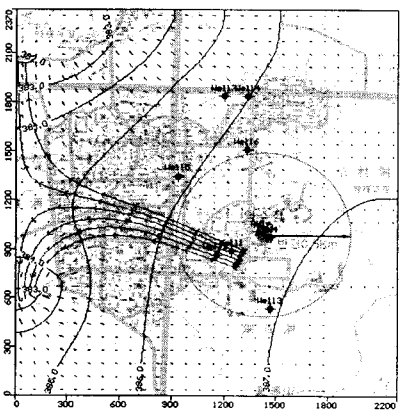

Fig. 1 Example diagram of pollution processing

4. 결 론

스탠딩컬럼웰 지중열 방식으로 건물의 냉난방을 수행하는 실증시설의 운영에 따른 지하수 환경영향을 평가하기 위해 주변지역의 지하수질 및 지하수위의 변화를 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 지열히트펌프 가동에 따른 지하수의 수질 변화는 없는 것으로 나타났다.
2. 대상 지역내의 지하수 거동은 양수정 가동조건과 주변지역에 분포되어 있는 정천의 취수량 변화에 따라 민감하게 반응할 것으로 판단된다.
3. 조사지역인 양수정의 지하수 흐름 상류에는 잠재적 오염원이 위치해 있지 않은 관계로 외부 오염원에 의한 지하수 오염은 없는 것으로 판단된다.
4. 조사지역에 분포되어 있는 잠재 오염원에 대한 오염물질의 종류 및 농도, 그리고 유출량을 측정하여 해당지역에 대한 오염물질의 예측과 오염도를 정확히 알아내어 이에 대한 모니터링을 수행할 수 있는 지하수 수질보호계획이 필요하다.
5. 지하수 유동 해석 결과로 앞으로 지하수 관정을 이용하는 지열히트펌프 실증 연구나 유사한 연구 분야에 대한 유동해석을 적용함에 있어서 그 유용성이 타당할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 연구비지원으로 수행되었으므로 이에 감사드립니다.
(과제번호 2004-N-GE11-P-01)

References

[1] 한정상 등, 지열펌프 냉난방시스템, 한림원(2005)
[2] K. R. Rushton, Groundwater Hydrology, John Wiley(2003)
[3] Arist대 Renzoni et al., Contaminant in the Environment, CRC Press(1994)
[4] 전영서, 김진오, 대체에너지 기술개발에 대한 수익성 평가분석, 기술혁신학회지, 제7권, 제2호, 325-349(2004)
[5] S. P. Kavanaugh, K. Raffery, Ground-Source Heat pump. ASHRACE(1997)
[6] 산업자원부, 산업폐열 현황분석 및 최적 열회수 이용기술 개발(2003)