

지하수이용 공조시스템의 최적이용법에 관한 연구

- 냉난방 실험 결과 및 수치해석법에 의한 비교 검토 -

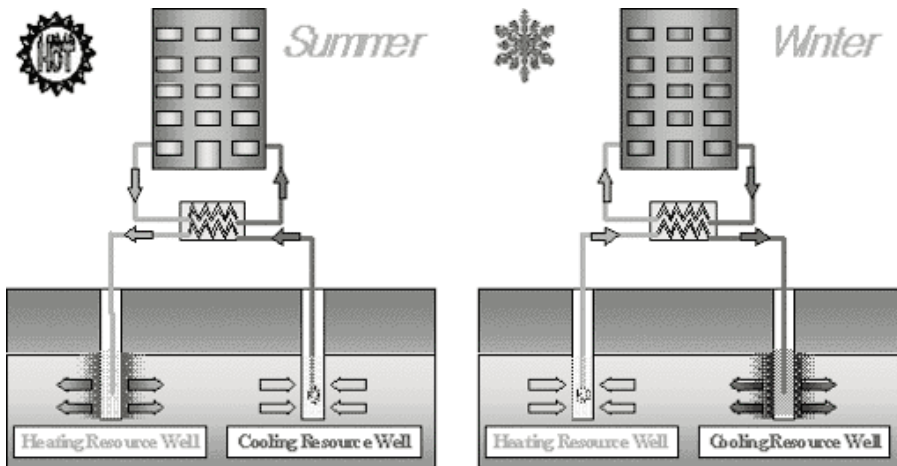
남유진*, Ooka Ryoza**, 황석호*
 *동경대학 대학원 박사과정, **동경대학 생산기술연구소 교수

1. 서론

최근 에너지 절약 및 CO₂배출량 삭감 기술이 지구 온난화 방지 대책으로서 시급한 과제로 떠오르면서 자연에너지 유효활용기술의 하나인 지열 및 지하수의 이용이 주목 받고 있다. 지하수 이용 공조 시스템은, 막대한 축열능력을 가지면서 연간 일정한 온도를 유지하는 지하수를 이용하여 건물의 냉난방공조를 할 수 있는 시스템으로(그림 1 참조), 기존의 공냉식 시스템에 비해 에너지 절감 효과가 기대되는 시스템이다. 또한, 지하수 흐름이 느린 지역에서는 계절간 축열이 가능하며, 여

름철 도심부의 열섬현상 (Heat Island Phenomenon) 완화 및 옥외 온열환경 개선에도 유효하다. 그러나, 이 시스템은, 이론상 지하수를 순환 이용하여 열교환하는 방식으로 지하수위 변화를 동반하지 않는 기술임에도 불구하고, 도심부의 엄격한 양수 규제 및 인식 부족 등의 이유로 보급이 늦어지고 있다.

한편, 일본 도심부의 지하수 이용은 지반 침하 문제를 계기로 1960년대 공업용수법, 건물용수법(건축물용 지하수 채취의 규제에 관한 법률)등의 법률이 생기면서 지하수 양수가 엄격하게 규제되었고, 그 결과 최근에는 지하수 수위 상승에



[그림 1] 지하수이용 공조 시스템의 개념도

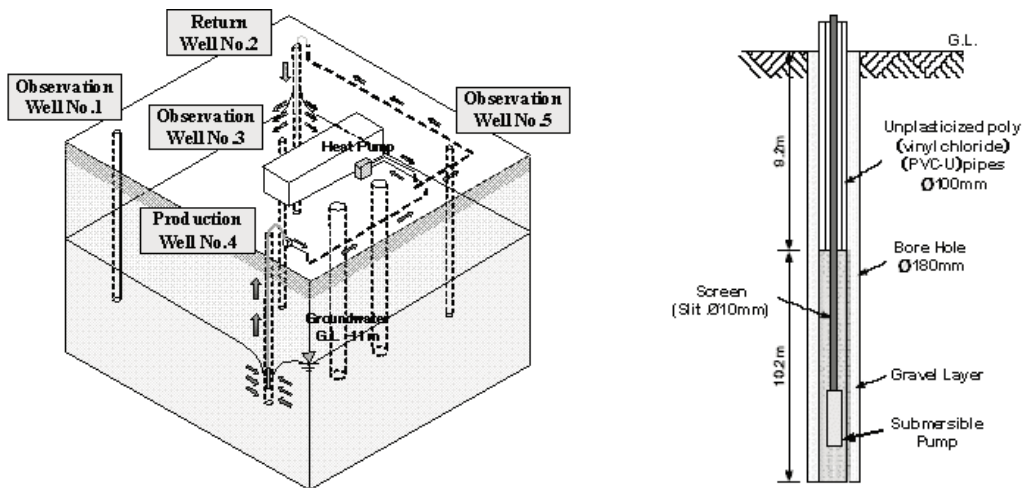
의한 도시기반시설의 악영향이 우려되고 있다. 실제로, 양수 규제 강화 이후 동경의 지하수는 급속도로 상승하여 우에노역 역사를 부상시키는 사례를 만들기도 했다. 이와 같은 사회 및 지하수 환경의 시대변화와 함께 도심부의 지하수 유효 이용수법이 요구되고 있는 상황 속에서, 건물 공조를 위한 지하수 이용의 최적 이용법에 관한 연구가 필요하게 되었다.

지하수 이용 공조 시스템은 지반 조건이나 지하수 조건에 의해 성능이 크게 변화하기 때문에 대상지역의 입지 조건에 적합한 이용 방법(시스템 설계 및 운전법)이 필요하다. 지하수를 건물의 냉난방에 이용한 연구는 수냉식 히트펌프의 보급과 함께 미국, 북유럽등에서 활발하게 진행되어 왔으며, 일본에서도 우메미야의 지하 대수층 축열법에 관한 연구(3), 나카무라의 지수벽을 이용한 대수층 축열 시스템에 관한 연구(4) 등, 대수층의 축열 효과나 지하 구조물을 이용하는 수법 등이 연구되어 왔다. 그러나 다양한 지반 조건 하에서 어떤 지하수 이용법을 사용하는 것이 최적성능을 발휘하는지 정량적으로 분석하는 연구는 이루어지지 않았으며, 그러한 최적 이용법의 정비가 필요하다 할 수 있다.

이에 본 연구에서는, 대상지역의 지반 및 지하수 조건에 적합한 시스템 설계법과 운전 방법의 개발을 위해, 실제 스케일의 실험 장치를 이용한 냉난방 성능실험과 함께 지하수·지하열 이동 시뮬레이션 수법을 이용한 비교 검토를 실시하였다.

2. 시스템 개요

본 시스템은, 동경대학 생산기술연구소 치바실협소(치바현 치바시 이나게 소재)에 있는 기존의 지열이용 공조시스템(7)(기초말뚝 이용방식, 2003년)을 이용하여, 2006년 8월에 구축된 지하수 직접이용 시스템이다. 그림 2는 실험 장치의 구성도와 양수 우물의 단면도를 나타내고 있다. 양수 우물은 깊이 20m, 내경 10cm의 경질염화비닐관을 사용하였으며 지하 9.2m이하는 슬 가공의 스크린을 설치하였다. 본 시스템은 하나의 양수 우물에서 지하수를 뽑아올려 열교환을 한 후, 환원 우물에 환수하는 시스템(Dual Point System)으로서, 남은 세계의 관측 우물에서는 지하수위 및 지중온도를 측정 하였다. 또한 향후 양수 및 환원 우물의 위치변경을 고려하기 위해 전체 우물부터 히트펌프까지의 배관(PE25)을 지



[그림 2] 실험 장치의 구성도 및 양수 우물의 단면도

하 0.5m 매설하여 설치하였다.

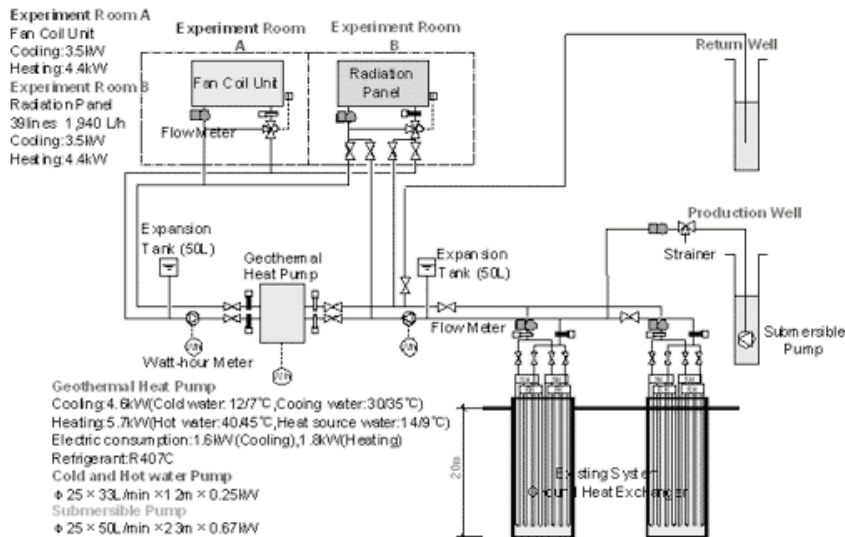
한편, 지하수를 직접이용하여 열교환을 행할 경우, 지하수 수질에 의해 열교환기나 배관의 스케일 및 부식이 발생할 우려가 있으므로, 실험 우물을 대상으로 지하수 수질 검사를 실시하였다. 표 1

〈표 1〉 지하수 수질분석 결과 (양수 우물)

분석 항목	분석결과
Ph(25℃)	6.9
전기전도율(25℃)($\mu\text{s}/\text{cm}$)	27.4
염화물이온 (mgCl ⁻ /L)	4.6
황산이온 (mgSO ₄ ²⁻ /L)	27.9
산소비량(pH4.8)(mgCaCO ₃ /L)	83.4
전경도(mgCaCO ₃ /L)	102
칼슘경도(mgCaCO ₃ /L)	47.9
이온상 실리카(mgSiO ₂ /L)	12.1
전철(mgFe/L)	0.03
동(mgCu/L)	0.01미만
황화물이온(mgS ²⁻ /L)	0.05미만
암모늄이온(mgNH ⁺ /L)	0.03미만
잔류염소(mgCl/L)	0.1미만
유리탄소(mgCO ₂ /L)	28
안정도지수	9.4

은 2006년 11월 29일 오후 4시에 실시한 양수 우물의 지하수 수질 분석 결과를 나타내고 있다. 지하수 수질의 검토에 있어서는 양수 우물의 수질이 JRA(사단법인 일본 냉동공조 공학회)에서 지정한 냉각수 기준에 적합한지, 환원시의 수질이 지하수 환경기준(금속 항목 및 유기체 탄소)을 만족하는지를 검토하였다. 그 결과로부터 별도의 열교환기를 설치하지 않고 직접 지하수와 열교환을 실시하는 방식의 시스템을 구축하였다.

그림 3은 실험 시설의 시스템도를 나타내고 있다. 본 연구에서는 기존 시설(지열 간접 이용)과의 운전 전환이 가능하도록 배관을 설치하여, 향후 지열 간접 이용과 직접 이용의 비교 검토가 가능하도록 하였다. 양수 우물에는 양정 23m, 소비 전력 600W의 수중펌프를 깊이 17m에 설치하여, 지상부의 배관에는 불순물 제거용의 U자형 스트레이너를 설치하였다. 또한 양수직후에는 지하수가 진흙상태가 되는 것을 고려하여 전동밸브를 설치하여 시스템 운전 전의 5분간 방류 후 송수하도록 하였다. 한편 수냉식 히트펌프(냉각능력 : 4.6kW, 가열능력 : 5.7kW), 실험실내의 FCU, 복사판넬등은 기존 시설을 이용하였다.



〔그림 1〕 지하수이용 공조 시스템의 개념도

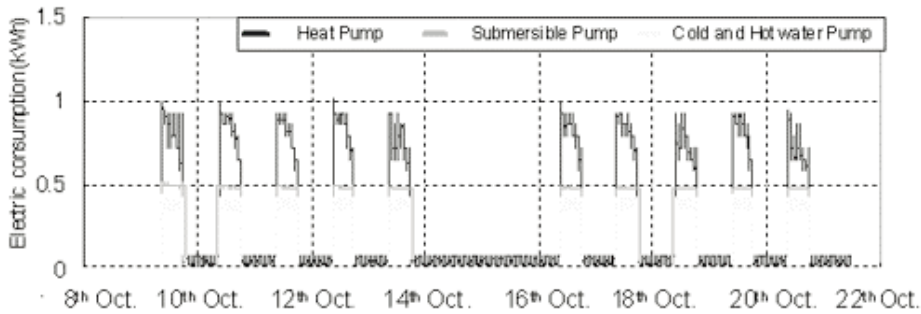
3. 실험 개요

본 연구에서는 도심지 천부 지하수 이용의 냉난방 성능을 검토하기 위해, 도심 오피스 빌딩을 상정한 냉난방 실험을 실시하였다. 냉방 실험은 2006년 10월 9일~10월 22일에 걸쳐 실시하였으며, 실험기간이 중간기이므로 모의 부하로서 룠 에어컨(가열 : 2.8kW)과 전기카펫(750W×2장)을 이용하였다. 한편, 난방 실험의 경우는 2006년 12월 4일~2007년 2월 12일까지의 운전을 실시하였다. 난방 실험에서는 양수량 변화시의 시스템 성능 검토와 함께 본 시스템이 지하 환경에 미치는 영향에 대해 검토하였다. 양수량의 변화는 3패턴으로 하여 양수 우물 지상부의 밸브를 조절해서 운전하였다. 또한 2006년 12월 25일~2007년 2월 12일의 운전에서는 난방부하대상인 실험

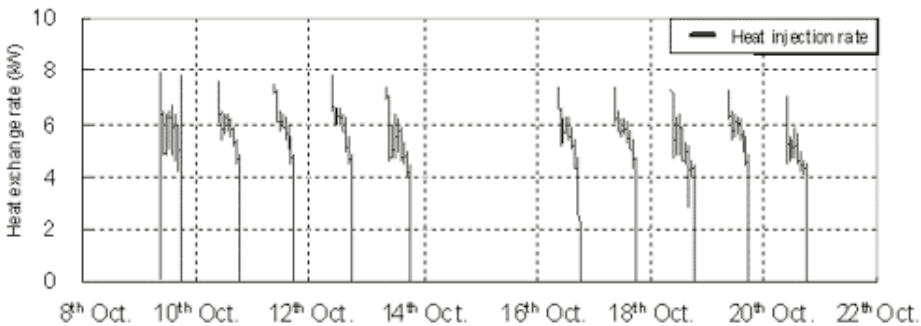
실의 창을 개방하여 난방부하를 증가시켜 운전하였다. 시스템 운전 스케줄은 통상의 오피스 빌딩을 상정하여 냉난방 모두 월~금요일, 오전 9시~오후 6시의 운전을 실시하였다. 본 실험에서는 시스템 성능 검토를 위해, 양수량, 양수/환원 온도, 히트펌프 송수/입수관 온도(1차측, 2차측) 및 각 기기의 소비전력을 측정하였다. 또한 본 시스템이 지하 환경에 미치는 영향을 검토하기 위해 T형 열전대를 이용한 지중 온도 측정과 마이크로펄스 수위계를 이용한 지하수위 측정을 실시하였다.

4. 실험 결과

지하수 양수 온도는 전체 실험기간 동안 일정하게 약 18℃를 유지하였다. 그림 4는 모의부하를 이용한 냉방실험의 결과로서 각 기기의 소비전력



(a) 소비전력량



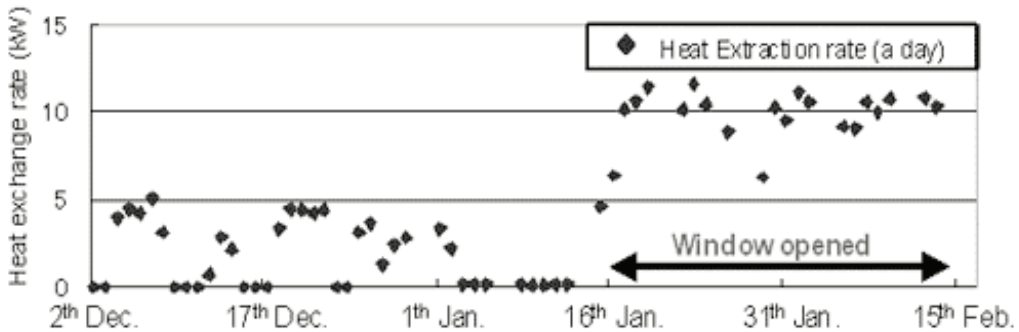
(b) 방열량

[그림 4] 냉방 실험 결과

(a) 및 지하 방열량(b)을 나타낸다. 여기서, 채/방열량은 히트펌프 출입구 온도차와 양수량에 의해 계산되었다. 모의 부하를 이용하여 실시한 냉방실험에서는, 약47 l/min(28.2m³/일)의 지하수를 양수하여 기간평균 5.5kW의 방열이 가능하였다. 그러나 지하 방열량은 운전 초기에 피크를 보이지만, 운전이 계속됨에 따라 실험실의 온도가 상승하면서 서서히 감소하는 현상을 볼 수 있다. 즉, 냉방부하의 증가를 통해 더 많은 방열량을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다. 한편, 그림 5는 12월 4일~2월 13일까지 실시한 난방실험 기간 중의 1일 평균 채열량을 나타낸다. 창문 개방을 통해 난방부하를 증가시킴으로서 10kW이상의 채열이 가능하였다.

표 2는 전체 실험의 결과이며, 양수량, 채·방열량, 소비전력(히트펌프, 양수펌프), COP(Coefficient of Performance) 등의 기간 평균치

을 나타내고 있다. 냉방 실험의 경우, 히트펌프 소비전력에 대한 방열량으로 산출한 히트펌프 COP는 6.6으로 본 시스템의 유효성을 확인할 수 있었다. 하지만, 양수 펌프 및 순환수 펌프의 소비전력을 가산해서 고려한 시스템COP는 3.2가 되어, 펌프 동력의 최적화가 필요하다는 결과가 나타났다. 한편, 12월 4일~24일까지의 난방운전에서는 양수량을 변화시키면서 채열량 및 소비전력을 검토하였다. 양수량을 감소시켰을 경우, 인버터 제어에 의해 양수펌프의 소비전력이 저감되는 것에도 불구하고, 소비전력은 상승하는 결과가 나타났다. 하지만, 12월 11일~17일의 실험에서는 2차측 순환수의 과열로 인한 수냉 히트펌프의 일시정지가 있었던 관계로 평균 채열량이 적게 나타났다. 또한 12월 25일~2월 13일까지 실시한 장기운전 결과에서는, 창문 개방으로 인한 난방부하의 증가에 의해6.2kW의 평균채열량을 얻을 수 있었다.



[그림 5] 난방 실험 결과 (1일 평균 채열량)

<표 2> 냉난방 실험 결과 (기간 평균)

실험 기간	운전조건	양수량 (l/min)	채/방열량 (kW)	소비전력(kW)		COP	
				HP	양수펌프	HP	S.COP
10월 9일~10월 22일	냉방	47	5.5	0.83	0.49	6.6	3.2
12월 4일~12월 10일	난방	46	4.2	1.01	0.48	4.2	2.3
12월 11일~12월 17일	난방	22	2.8	1.01	0.40	운전정지(과열)	
12월 18일~12월 24일	난방	9	5.3	1.10	0.34	4.8	3.0
12월 25일~2월 13일	난방	46	6.2	1.10	0.48	5.6	3.2

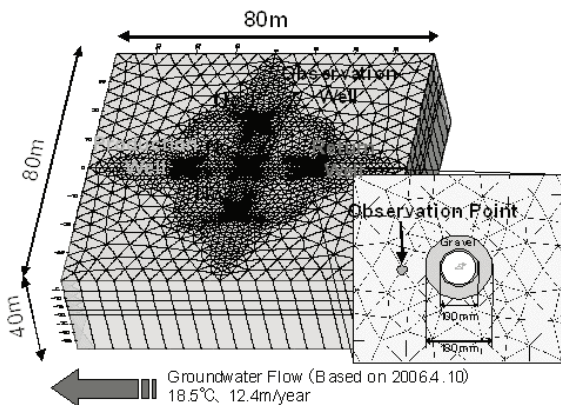
5. 수치해석에 의한 비교 검토

5.1 해석 개요

본 절에서는, 시스템 도입으로 인해 지하 환경에 미치는 영향을 평가하고 실험 결과와 비교 검토를 하기 위해, 저자가 연구한 3차원 지중열/지하수 이동 시뮬레이션 수법(8)에 의해 해석을 실시하였다. 해석모델은 독일WASY사의 FEFLOW(9)를 이용하였으며, 이 프로그램은 지하의 열이동 및 지하수 해석, 토양 오염의 해석에 널리 사용되는 해석코드다. 이 코드에서는 토양의 구성을 토입자, 액수, 기체의 3상으로 분류하여 각각의 상에 대해 질량보존, 운동량보존, 에너지보존의 법칙이 성립하는 것으로 구성되어 있다. 또한 해석 모델의 자유수면에 있어서의 지하수 침투류는 다음식과 같은 지배방정식으로 구성되어 있다.

$$-q_n = -\varepsilon v_i \cdot n_i = P_0 \cdot n_i + \varepsilon \frac{\partial B / \partial t}{|\partial x_i / \partial x_i|} \cdot n_i = \left(P_0 - \varepsilon_e \frac{\partial h}{\partial t} \right) n_i \quad (4)$$

- q_n : Darcy 플럭스
- ε_e : 유효간극율
- n_i : 유닛벡터
- P_0 : 지하수침투율
- x_1 : 표고($h=x_1$)



[그림 6] 해석 모델

v_i : 속도벡터

B : 대수층두께

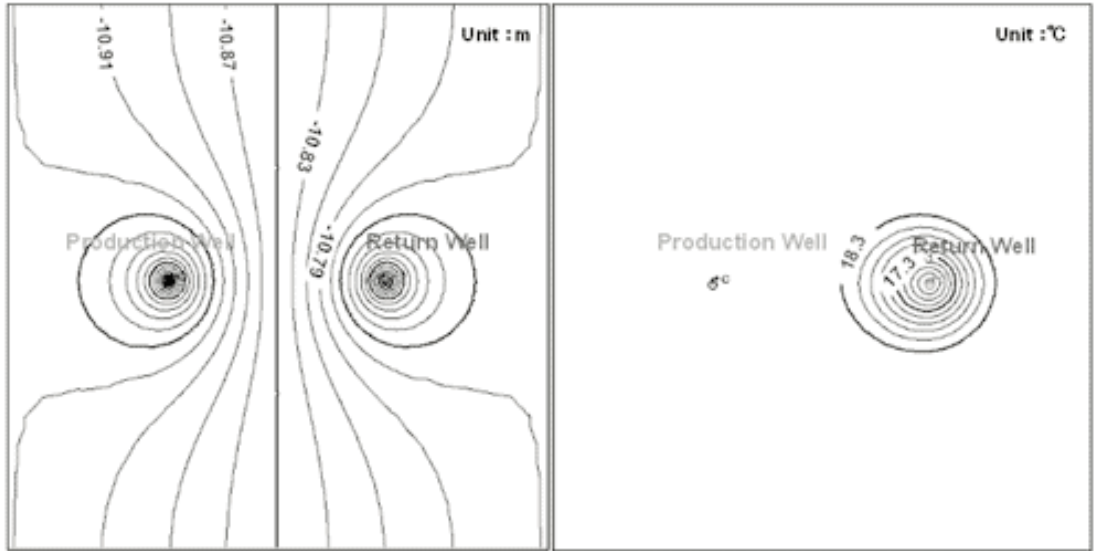
그림 6은 해석 모델을 나타내고 있다. 80m×80m×40m의 영역 중심에 실험용 우물을 상정한 5정의 우물모형을 작성하여, 양수 및 환원 우물에는 실험결과와 같은 값의 물질 이동 및 열이동 플럭스 조건을 주었다. 한편, 지하수위는 실험치로부터 G.L. -10.85m로 하고 Darcy법칙에 의해 계산한 지하수위 구배로 지하수 유속(12.4m/year)을 주었다. 또한 지반조건(표 3)는, 실험 사이트에서 실시한 지반조사 데이터로부터 추정된 토양 물성치를 이용하였다. 본 계산에서는, 12월 4일부터 난방 실험 스케줄에 맞추어 운전을 실시했으며, 실험중의 측정치와 시뮬레이션의 계산 결과 중 지하수위 및 지중 온도 변화를 대상으로 비교 검토하였다.

5.2 해석 결과

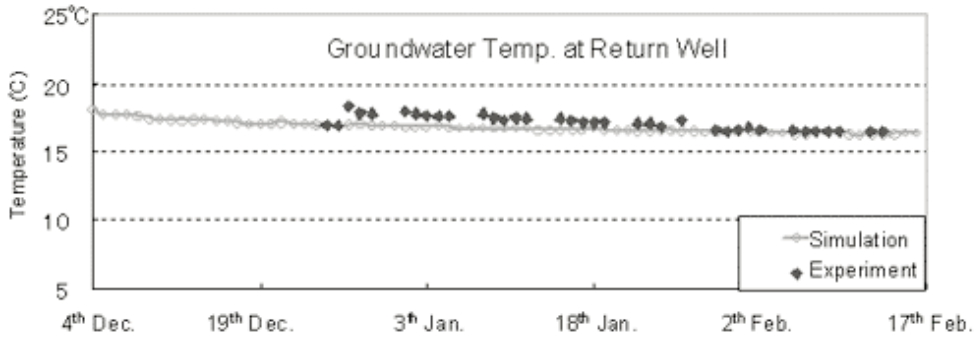
그림 7는 해석결과를 나타내고 있으며, 2007년 1월 30일 오후 3시 지하 -17m의 지하수 수두 분포(좌) 및 지중 온도 분포(우)를 나타내고 있다. 우물 주위의 지하수 흐름 및 열의 확산 범위를 파악할 수 있다. 한편, 그림 8(a)는 양수 우물의 지중온도 변화를 나타내는 그래프로 실험측치와 계산치를 비교하고 있다. 계산 결과는 실험측치(일평균)에 비해 약간 낮은 온도를 보이고 있지만, 난방시 채열에 의한 환원 우물의 온도저하를 재현하고 있다. 또한, 관측정(No.3)에서 측정된 지하수위의 변화를 그림 8(b)에 나타내고 있다. 관측정의 수위는 실험치, 계산치 모두 약 G.L. -10.85m정도로 나타나, 잘 재현하고 있는 것을 확인할 수 있다.

<표 3> 해석 조건 (토양의 열물성치)

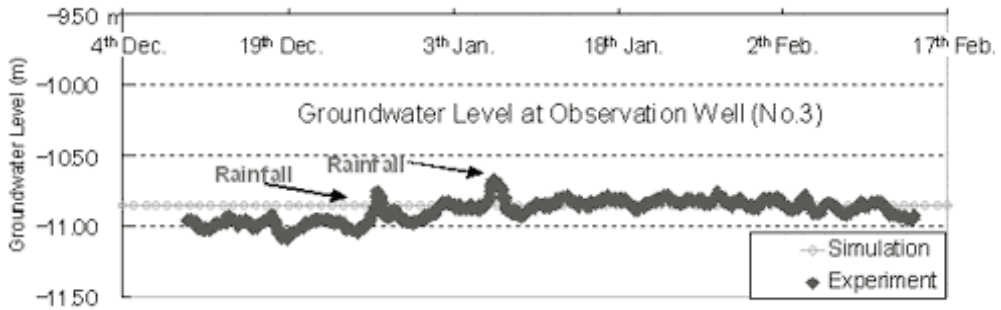
깊이 (m)	6	12	40	지갈층
공극율	0.8	0.4	0.35	0.3
투수계수(10^{-4} m/s)	0.1	1.3	2.1	100
고체부열전도율(W/mK)	1.7	2.4	2.7	2.7
고체부열용량(10^6 J/m ³ K)	3.9	3.0	2.9	2.9



[그림 7] 해석 결과 9우물 주위의 수두(좌) 및 온도 분포(우)



(a) 환원 우물의 지하수 온도



(b) 관측점의 수위 변화

[그림 8] 비교 검토 결과

6. 결론

본 연구에서는 지하수 이용 공조 시스템의 성능 검토를 위해, 실제 스케일의 실험장치를 이용한 냉난방 실험을 실시하였다. 냉난방 실험을 통해 지하수 이용 공조 시스템의 채·방열 성능과 향후 성능향상의 가능성을 확인할 수 있었다. 또한 3차원 지중열·지하수이동 수치해석 수법을 이용하여 비교 검토를 실시하였다. 그 결과, 시뮬레이션 결과는 실험치를 잘 재현하여 그 타당성을 확인하였다. 향후에는, 본 시스템의 장기 성능 확보를 위한 설계 및 운전 수법의 검토와 함께 최적 이용 수법의 개발에 관한 연구를 해 나갈 것이다.

참고 문헌

1. K.Rafferty, Water Chemistry Issues in Geothermal Heat Pump Systems, ASHRAE Transaction, 2004-8-3, pp.550-555
2. K.Rafferty, Dual Set Point Control of Open-Loop Heat Pump Systems, ASHRAE Transaction, 2001-8-2, pp.600-604
3. 梅宮弘道ら, 蓄熱地下水を熱源とした冷・暖房の研究, 日本機械學會論文集, 1992年12月, pp.3748~3753
4. 中村 愼ら, 都市部における劃水層蓄熱計關時の地盤調査法に?する?究, 日本建築學會計劃系論文集, 2002年10月, pp.23~30
5. 落藤 澄ら, 帶水層の蓄熱效果に關する長期測定とその考察, 空氣調和・衛生工學會論文集, 1992年10月, pp.53~61
6. 冷凍空調機器用水質ガイドライン, JRA-GL-02-1994, 日本冷凍空調工業?
7. 關根賢太郎ら, 場所打ち杭を用いた地中熱空調システムの普及・實用化に關する研究, 空氣調和・衛生工學會論文集, 2006年2月, pp.1~122.
8. Yu-Jin Nam, Ooka Ryoza, Suk-Ho Hwang, Kentaro Sekine, Yosuke Shimawaki, A Study on Development of a Ground-Source Heat Pump System Utilizing Pile Foundation of a Building(Part2), SAREK Annual Conference, KOREA, 2005.11.25
9. FEFLOW 5.1 Reference Manual, WASY Software 