

# 지반·지하수 조건을 고려한 최적의 지하수 이용 공조 시스템 선정에 관한 연구

남 유 진<sup>†</sup>, 오오카 료쥬<sup>\*</sup>, 황 석 호

동경대학 대학원, \*동경대학 생산기술연구소

## Study on Optimization of Design and Operation for Groundwater Heat Pump System Considering Ground and Groundwater Condition

Yu-Jin Nam<sup>†</sup>, Ooka Ryojo<sup>\*</sup>, Suck-Ho Hwang

**ABSTRACT:** Groundwater heat pump (GWHP) system has been expected to achieve the higher coefficient of performance (COP) and more energy-saving than the conventional air-source heat pump (ASHP) system. Its performance significantly depends on the characteristics of groundwater and the underground thermal properties. Furthermore, there is a large difference of COP in utilizing groundwater between as a heat resource and as a thermal storage medium. For properties of groundwater there is suitable utilizing system. However, many of GWHP systems have not been considered sufficiently such properties. This research describes optimization of GWHP system according to the properties of groundwater based on 3D numerical heat and water transport simulation.

**Key words:** Groundwater(지하수), Heat pump system(히트펌프 시스템), Optimazation design(최적 설계), Numerical simulation model(수치해석모델), Groundwater flow(지하수 흐름)

### 1. 서론

지하수 이용 공조 시스템은 지하수의 막대한 축열 능력을 건물의 공조 시스템에 이용하는 시스템으로 일본이나 구미에서도 꽤나 오랜 시대부터 실용화가 되고 있다(1-3). 그 잠재적인 에너지 소비 저감 효과가 기대되고 있으나, 도시부에 있어서의 지하수 양수 규제 등의 요인으로 인해 보급이 진행되지 않고 있는 실정이다. 또한, 이러한 도입물건수가 적은 것의 영향으로 적절한 지하수 이용 공조 시스템의 설계수법이 정비되어 있다고

는 말하기 어렵다. 예를 들어, 단순히 지하수를 이용하는 공조 시스템이라고 해도 계절간 축열을 전제로 한 대수층 축열과, 축열을 고려하지 않고 지하수를 열원만으로 취급하는 수법으로 크게 구별된다. 이러한 이용 방법들 중에서 어느 쪽을 선택하느냐 하는 것, 또는 어떤 채열 및 방열 형태를 취할 것인가는 도입 부지의 지반 조건, 지하수 조건(지하수위, 지하수층의 두께, 지하수 유속, 지하수 온도)뿐만 아니라 상부의 건물이 필요로 하는 열적 조건에 의해 크게 좌우된다. 그럼에도 불구하고 이러한 조건을 전체적으로 고려한 최적의 지하수 이용 공조시스템의 설계 수법은 아직 확립되어 있지 않다. 이러한 배경으로부터 본 연구에서는 WASY사의 FEFLOW를 기본으로 하는 지하열·지하수 이동 시뮬레이션을 이용하여 다양한 채열 및 방열 조건들이 지하수·지반은

<sup>†</sup>Corresponding author

Tel.: +81-3-5452-6434; Fax: +81-3-5452-6432

E-mail address: namyujin@iis.u-tokyo.ac.jp

도 및 시스템의 성능계수 등에 미치는 영향에 대해 검토를 하고 최적의 지하수 이용 공조 시스템의 설계 수법에 대해 고찰한다.

## 2. 해석 개요

### 2.1 해석 대상

본 연구에서는 동경 도심부에 있는 오피스 빌딩(연면적 23,000 m<sup>2</sup>, 연간 냉방부하 4503 GJ, 연간 난방부하 2230 GJ)을 상정하여(Fig. 1) 건물 부지 내에 지하수 이용을 위한 양수(주입) 우물을 8개소 설치했다. 냉방운전에서는 냉수원 우물에서 지하수를 퍼 올려 히트펌프를 통해 열 교환을 하고 온수원 우물에 주입하는 순환을, 난방운전에서는 온수원 우물에서 양수하는 순환을 가정하였다. 본 모델에서는 8개소의 우물 중 2개소의 우물을 설계대상으로 하여 나머지 6개소의 우물과의 열 간섭과 수위변화는 이번 계산에서는 상정하지 않기로 하였다. Fig. 2는 해석대상을 나타내고 있다. 60 m × 40 m × 40 m의 영역 안에 20 m의 거리를 두고 우물 2개를 설치하여 각각 양수 우물 및 주입 우물로서 공조 운전을 행한다고 가정하였다. 운전시간은 통상 오피스 빌딩의 공조운전을 고려하여 냉방운전(6월~9월), 난방운전(12월~2월) 모두 월~금요일, 아침8시~저녁18시의 운전으로 하였다. 난방운전에서는 우물A에서 양수하여 우물B에 주입하고, 냉방운전에서는 우물B에서 양수하여 우물A에 주입하는 순환을 실시하였다.

### 2.2 해석 모델

해석 모델은 WASY사의 FEFLOW를 이용하였다. FEFLOW는 지하의 열, 지하수 이동 및 토양 내 물질이동을 해석하는 시뮬레이션 코드로서 토 입자, 액수, 기체 각층에 대해 각각의 열 이동 및 물질 이동 방정식으로 구성되어 있다(4). 토양오염이나 지하수 유동해석 등의 분야에서는 널리 사용되고 있다.

### 2.3 해석 조건 및 해석 케이스

Table 1은 본 해석에서 이용한 지반의 열물성

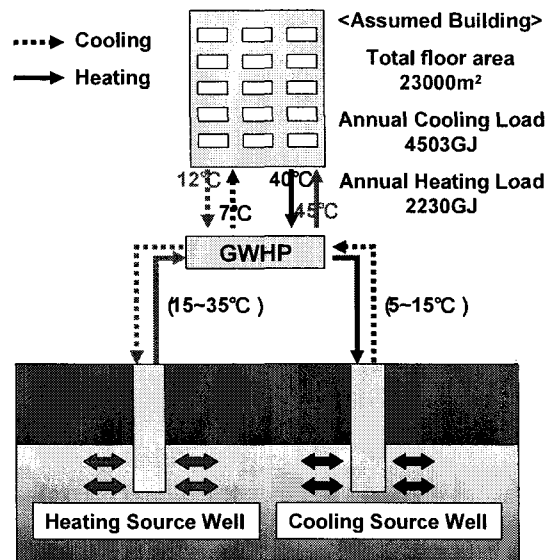


Fig. 1 Groundwater Heat Pump System.

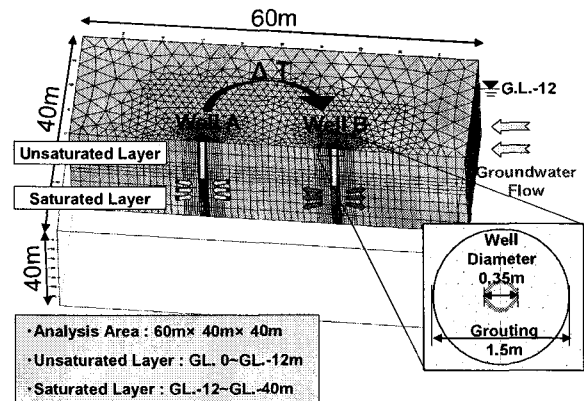


Fig. 2 Analysis Model.

Table 1. The properties of Soil

Depth(m)	6	12	40
porosity	0.8	0.4	0.35
Hydro Conductivity(10 <sup>-4</sup> m/s)	0.1	1.3	2.1
Thermal Conductivity (W/mK)	1.7	2.4	2.7
Thermal Capacity (10 <sup>6</sup> J/m <sup>3</sup> K)	3.9	3.0	2.9

치를 나타낸다. 지반의 열물성치는 동경대학 치바 실험소의 지반 조사에서 얻은 데이터로부터 추정된 값들이다. 지하수위는 지하 12 m로 하고 지표면에서 지하 12 m까지는 불포화수층, 그 이하는 포화수층으로 했다. 지하수 유속은 Darcy류

로 산출한 수위차를 이용하여 구배를 입력하였다. 또한 지하 20 m~30 m에 스크린을 설치하고, 양수한 지하수량과 같은 양이 주입 우물로 환원 가능하다고 상정하여 지하수 플럭스를 주었다. 채열 및 방열 플럭스는 양수 우물에서 양수한 지하수 온도로부터 상정 냉난방 부하를 고려하여 산출한 값을, 환원 우물에 온도 플럭스를 이용하여 입력하였고 지하의 초기온도는 15℃로 하였다.

각 파라미터에 대해 양수 온도와 주입 온도의 온도차를 5℃, 10(20)℃로 나누어, 지하수를 열원으로서 이용하는 운전방법과 대수층 축열 효과를 최대한 활용하는 운전방법을 비교 검토하였다. Table 2는 본 계산 각 케이스의 조건을 나타내고 있다. Case A~Case C는 도입 부지의 지하수 유속 조건에 따라 분류하여, 지하수 흐름이 없을 때를 Case A, 지하수 유속이 22 m/year일 때를 Case B, 지하수 유속이 44 m/year일 때를 Case C로 하였다. 그 조건에 대해 운전 방법을 네 가지 패턴으로 상정하여 계산을 행하였다. 패턴 1, 2는 지하수 이용 공조 시스템과 공랭식 시스템(COP 6.0)을 병용하여 이용하는 방법으로, 양수 온도와 주입 온도의 온도차를 각각 5℃와 10℃로 하여 냉방시 부족분을 공랭식 시스템으로 부담하는 것으로 가정했다. 또한 패턴 3, 4는 본 시스템이 상정 건물의 냉난방 부하량을 전부 부담하

는 경우로서 양수 온도와 주입 온도의 온도차를 각각 5℃와 10(20)℃로 하여 계산하였다. 한편, 우물의 설치 방향이 시스템 성능에 미치는 영향을 검토하기 위해 Case D와 Case E의 계산을 행하였다. Case D는 지하수류의 방향에 대해 두 우물을 연결하는 직선이 직교하고 있는 경우이고, Case E는 지하수류가 Case C의 흐름과 반대 방향으로 흐르고 있을 때를 가정하여 상정한 케이스이다. 각각의 케이스에 대해 3년간의 계산을 행하여 열원이 되는 양수온도의 변화에 의한 시스템의 성능변화를 검토하였다.

### 3. 해석결과

#### 3.1 지하수류가 없는 경우

Fig. 3은 Case A-1, Case A-2의 결과로서 우물A, B의 양수 온도 변화를 나타내고 있다. Case A-1은 지하수를 열원으로서 이용하는 방법으로 양수 온도와 주입 온도의 온도차  $\Delta T$ 를 5℃하여 계산한 결과이고 Case A-2는 지하수의 축열 효과를 최대한 이용하는 운전방법으로  $\Delta T$ 를 10℃로 한 결과이다. 두 케이스 모두 지하수류가 없는 조건이므로 난방운전에서 냉각한 냉열원, 냉방운전에서 배열한 온열원이 잘 축열되어 있는 것을 보여주고 있다. Case A-1의 경우, 냉방운전

Table 2 Cases of Analysis

Case	Groundwater velocity(m/year)	$\Delta T$	Amount of pumping (m <sup>3</sup> /day)	Amount of heat exchanging (m <sup>3</sup> /day)	Groundwater condition
A-1	0	5	295	2230	No Groundwater Flow
A-2	0	10	147.5	2230	
A-3	0	5	295(641)	2230(4503)	
A-4	0	10(20)	147.5(160.25)	2230(4503)	
B-1	22	5	295	2230	Groundwater Flow 22m/year
B-2	22	10	147.5	2230	
B-3	22	5	295(641)	2230(4503)	
B-4	22	10(20)	147.5(160.25)	2230(4503)	
C-1	44	5	295	2230	Groundwater Flow 44m/year
C-2	44	10	147.5	2230	
C-3	44	5	295(641)	2230(4503)	
C-4	44	10(20)	147.5(160.25)	2230(4503)	
D-1	44	5	295	2230	Vertical direction
D-2	44	10	147.5	2230	
E-1	44	5	295	2230	Reverse direction
E-2	44	10	147.5	2230	

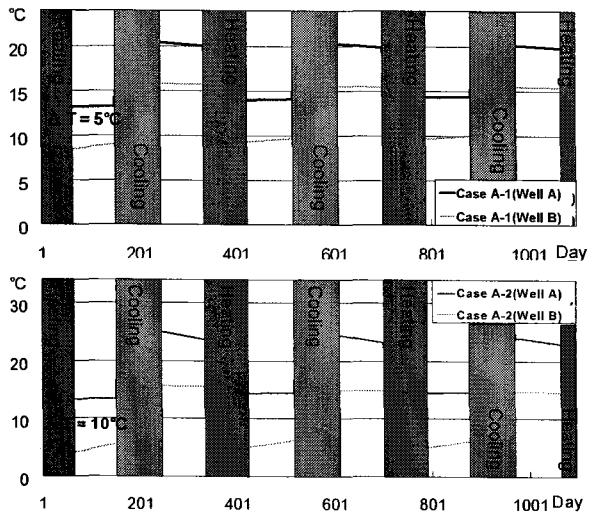


Fig. 3 Fluctuation of pumping and injecting water temperature (No groundwater flow).

에서 우물B로부터 9.8~15.6°C의 냉열원수를, 난방운전에서 우물A로부터 14.3~20.0°C의 온열원수를 얻을 수 있었다. 또한 축열 효과를 활용한 Case A-2의 경우는 6.4~15.0°C의 냉방 냉열원수, 14.4~23.7°C의 난방 온열원을 얻을 수 있었다.

### 3.2 지하수류가 있는 경우

Case B-1~Case B-4와 Case C-1~Case C-4는 지하수류가 있는 경우의 계산 케이스로서, 지하수 유속이 각각 22 m/year, 44 m/year인 조건에서 계산하였다. Fig. 4는 계산 개시로부터 213.63일 경과한 8월 1일 3시경 지하 25 m의 우물 주변 온도 분포를 나타낸다. 자연 지하수 유속이 44 m/year인 Case C-1(아래)은 자연 지하수류가 없는 Case A-1(위)에 비해 열이 수위 구배의 하류부로 퍼져가는 것을 파악할 수 있다. Fig. 5는 Case B-1, Case B-2(위)와 Case C-1, Case C-2의 계산 결과로서 양수 및 주입 온도의 온도 변화를 나타낸다. 통상, 지하수류가 빠를수록 지하수의 이류에 의해, 가열 또는 냉각된 토양 온도가 빠르게 회복되는 현상을 볼 수 있으나, 상대적으로 하류 쪽에 있는 우물A의 경우, 난방 운전시 상류 쪽에서 냉각된 지하수의 이동으로 인해, 난방운전정지후의 온도 회복이 비교적 늦어지고 있는 결과가 나타났다. 이러한 현상은 지하수류가 비교적 빠른 Case C-1과 Case C-2에서 더욱

현저하게 나타났다.

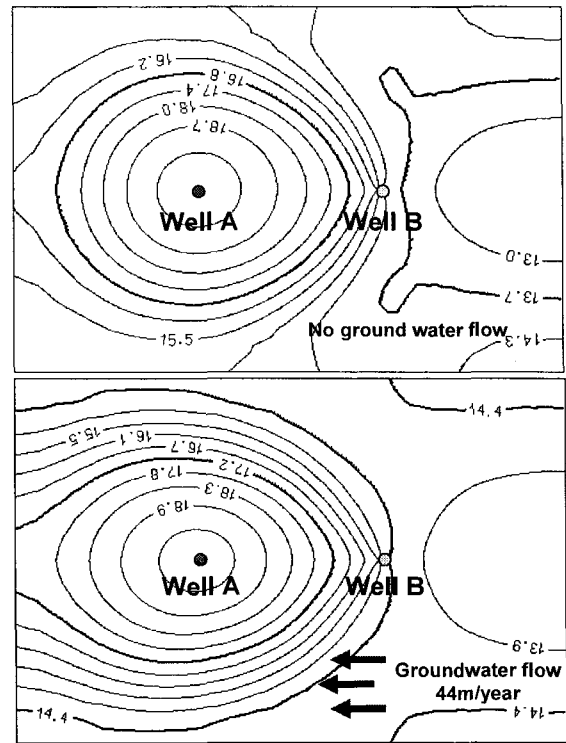


Fig. 4 Ground temperature distribution around well.

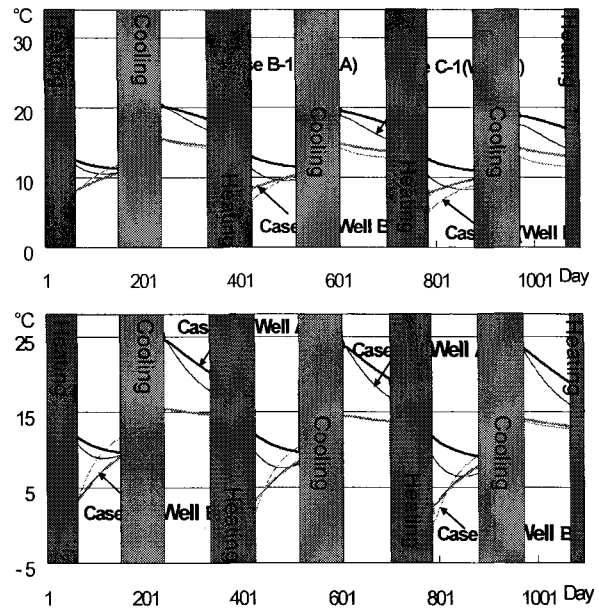


Fig. 5 Fluctuation of pumping and injecting water temperature(existence of groundwater flow)..

### 3.3 우물 위치의 변경했을 경우

Fig. 6은 우물의 위치를 변경했을 때의 양수

및 주입 온도의 변화를 나타내고 있다. 지하수류 방향과 양 우물을 연결하는 방향이 직교하는 경우인 Case D-1의 경우는 지하수류에 의한 온도 회복으로 인해 운전 기간 중의 온도 변화가 비교적 적고 안정적인 양수 온도가 얻어졌다. 반면, 지하수류의 방향이 Case C-1과 반대방향으로 흐를 경우인 Case E-1의 경우는, 냉방시 방열했던 상류 지하수의 영향으로 냉방 운전 중지 후에도 우물B의 양수 온도가 서서히 상승하고 있는 현상이 나타났다. 이 결과로부터 지하수류의 방향과 양수 및 주입 우물의 위치 관계에 의한 우물 간 동수구배가 양수온도의 회복에 큰 영향을 미치는 것을 파악 할 수 있었다.

### 3.4 히트펌프 COP 및 시스템 COP의 산출

Table 3은 각 케이스에 있어서의 양수 온도 범위와 히트펌프의 성적계수 COP (Coefficient of performance)를 나타내고 있다. 여기서 히트펌프의 COP는 2차측 순환수 온도를 냉방 7~12℃, 난방 40~45℃로 했을 때의 히트펌프 성능곡선을 참고로 하여 토양 온도가 어느 정도 안정된 2년 차 운전의 기간 평균치로 산출하였다. 본 계산에서 사용된 히트펌프 성능곡선은 일본의 히트 펌프 회사인 GENERAL HEAT PUMP사의 제품 성능 곡선을 이용하여 작성하였다. 이 결과와 함

Table 3 Analysis Result

Case	Pumping Temp. during cooling(℃)	Pumping Temp. during heating(℃)	Cooling COP	Heating COP	System COP
A-1	9.8~15.6	14.3~20.0	7.70	3.56	2.66
A-2	6.4~15.0	14.4~23.7	7.53	3.44	3.48
A-3	13.3~18.9	16.7~22.2	6.42	3.75	2.06
A-4	11.8~22.1	18.9~35.9	3.78	4.28	2.49
B-1	10.7~14.6	12.5~18.3	7.72	3.42	2.64
B-2	9.5~14.5	11.6~20.4	6.94	3.21	3.35
B-3	12.5~17.4	14.7~20.6	6.82	3.60	2.07
B-4	11.0~17.7	15.0~27.5	4.18	3.63	2.51
C-1	10.6~14.0	10.7~16.9	7.87	3.30	2.62
C-2	10.8~14.5	9.3~17.8	6.68	3.04	3.27
C-3	11.9~16.3	12.6~18.5	7.13	3.42	2.06
C-4	11.0~16.1	11.1~21.3	4.32	3.22	2.47
D-1	12.9~16.5	13.5~17.3	6.91	3.42	2.60
D-2	12.4~16.2	14.0~17.9	6.08	3.20	3.27
E-1	14.5~19.8	15.5~18.8	6.08	3.56	2.58
E-2	13.7~21.4	15.4~19.2	5.15	3.30	3.20

께, 양수펌프의 소비전력과 공랭식 시스템의

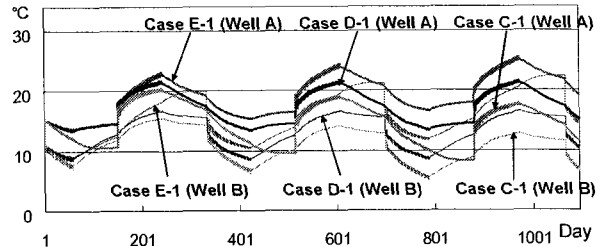


Fig. 6 Fluctuation of pumping and injecting water temperature (change of well position).

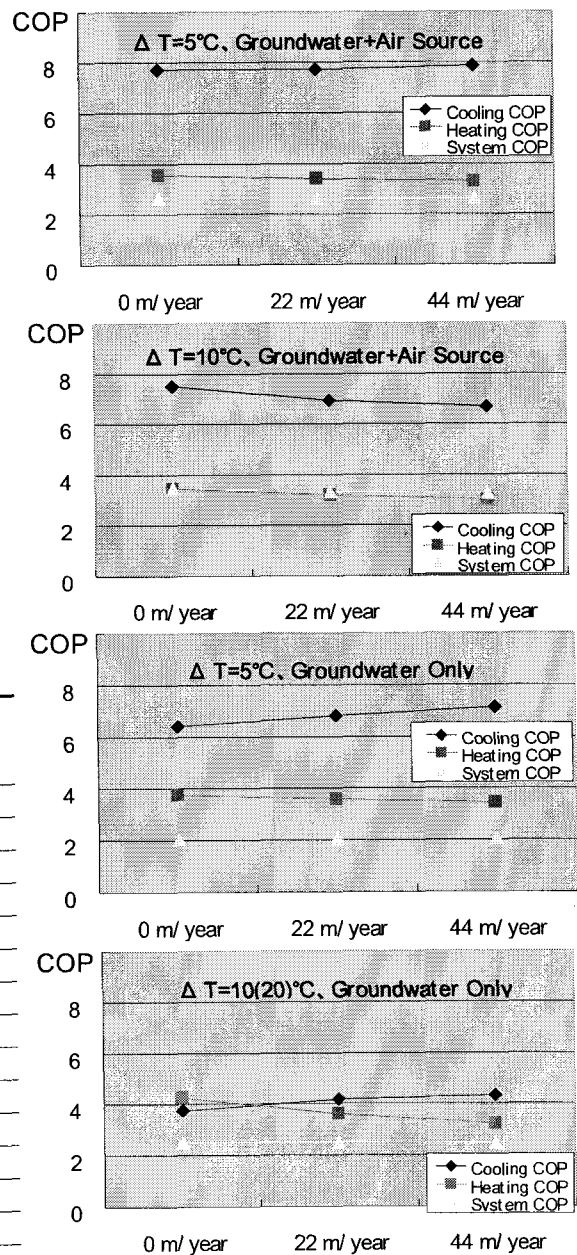


Fig. 7 Fluctuation of heat pump COP according to groundwater flow.

소비전력을 산출하여 개략적인 시스템 COP를 계산하였다. Fig. 7은 각 조건에 따른 히트펌프의 냉난방 COP의 변화를 나타내고 있다. 난방운전시의 히트펌프 COP는 지하수의 흐름이 빠를수록 감소하는 결과가 나왔다. 일반적으로, 지하수 흐름이 빠를수록 우물의 온도 회복이 빨라지므로, 열원 이용의 경우 지하수 흐름이 빠를수록 COP가 상승한다고 할 수 있으나, 본 계산에서는 상대적으로 하류층에 있는 온열원 우물이 냉방시에 냉각되었던 상류층의 지하수에 영향을 받아 지하수 흐름이 빠를수록 온도회복이 늦어지는 현상이 나타났다. 한편, 냉방 운전시의 히트펌프 COP에서는, 운전중의 온도회복 효과가 지배적으로 나타나, 지하수 흐름이 빠를수록 COP가 상승하는 결과가 나왔다. 단, 패턴2의 운전의 경우에는 지하수류에 의한 온도 회복보다 지하수류에 의한 축열 효과의 저하가 현저하게 나타나 반대의 결과가 보여 졌다.

Fig. 8은 시스템 COP의 산출 결과를 나타내고 있다. 본 계산에서는 양수량이 적은 축열 이용 방식이 유리한 결과가 나왔으며, 공랭식 시스템의 COP를 6.0로 높게 평가한 점으로부터 지하수 이용 공조 시스템과 공랭식 시스템을 병용한 운전 방식이 가장 좋은 시스템 COP를 발휘한다는 결과가 나왔다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 지반 및 지하수 조건이 지하수 이용 공조 시스템의 성능에 미치는 영향을 검토하기 위해 지하열 및 지하수 이동 시뮬레이션 틀을 이용하여 해석을 하였다. 그 결과로부터 지하수류가 양수 온도 변화 및 히트펌프 COP, 시스템 COP에 미치는 영향을 파악하였다. 이를 바탕으로, 다음 연구에서는 건축 조건 및 지반 특성, 기상 조건 등을 고려한 본 시스템의 최적 운전 수법 개발에 관해 연구를 진행해 갈 것이다.

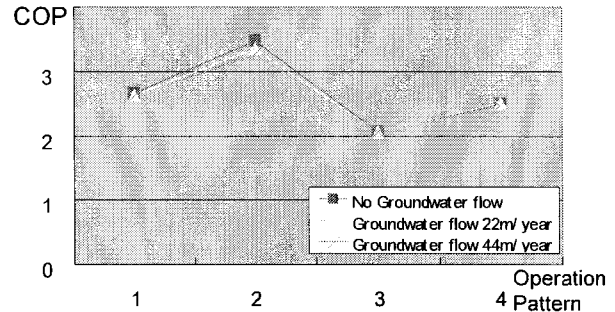


Fig. 8 Fluctuation of heat pump COP according to operation pattern.

#### 참고문헌

- Ochifuji K. et al., 1992, Investigation of the Long Term Heat Storage in the Aquifer, Transaction of SHASE of Japan, No. 50, pp. 53-61
- Umemiya H. and Aoyagi T., 1991-10, Basic Study of Aquifer Thermal Energy Storage, Journal of Japan Society of Mechanical Engineers, No. 91, pp. 3543-3350
- Umemiya H. and Gunji S., 1993, Aquifer Thermal Energy Storage Method, Journal of Japan Society of Mechanical Engineers, No. 93, pp. 3945-3950
- FEFLOW 5.1 Reference Manual, WASY Software
- Nakamura M. et al., 2002, Study on Thermal Energy Storage System Utilizing Finite Aquifer (Part 2), J. Archi. Plann. Environ. Eng., AIJ, No. 554, pp. 41-46
- Nakamura M. et al., 1997-8, Experimental Study on Aquifer Thermal Energy Storage (Part2), JAPAN SHASE, pp. 669-672