

## 개방형 지열 히트펌프 시스템의 운전 특성

임 효 재<sup>†</sup>, 공 형 진<sup>\*</sup>, 송 윤 석<sup>\*\*</sup>, 박 성 구<sup>\*\*</sup>

호서대학교 기계공학과, <sup>\*</sup>호서대학교 대학원 기계공학과, <sup>\*\*</sup>(주)지오테크

### Operation Characteristics of Open Type Geothermal Heat Pump

Hyo Jae Lim<sup>†</sup>, Hyoung Jin Kong<sup>\*</sup>, Yoon Seok Song<sup>\*\*</sup> and Seong Koo Park<sup>\*\*</sup>

<sup>†</sup>Department of Mechanical Engineering, Hoseo University, Asan 336-795, Korea

<sup>\*</sup>Department of Mechanical Engineering Graduate School, Hoseo University, Asan 336-795, Korea

<sup>\*\*</sup>Geotech Inc., Seongnam 463-420, Korea

**ABSTRACT:** Groundwater heat pump systems are the oldest of the ground-source systems and it has various type. Standing column well type are must be located in hard rock geology site and produce sufficient water for the conventional open loop system. These system are indirect type(the building circulating loop and ground water are intercept). Existence of the exchanger the foundation protect water quality to use of open loop. The design of open loop system are concern on the power requirements. An experimental study was analysis the extremely heating operation COP of ground water heat pump system. Operation efficiency of the 50RT systems shows that, COP 2.9~5.0 in heating operation. And generally it shows 3.4

**Key words:** Ground water heat pump(지하수 열원 히트 펌프), Two well(복수정), Static water level(정적 수위), Pumping water level(펌프 수위), COP(성능계수)

#### 기 호 설 명

- A : 단면적 [m<sup>2</sup>]
- H : 수위차 [cm]
- K : 투수계수 [cm/sec]
- L : 투수시험구간 길이 [cm]
- Q : 열 부하 [kcal/h]
- R : 시추공 반경 [cm]
- t : 시간 [sec]

#### 1. 서론

지열원 열펌프 시스템은 사용되는 열원에 따라 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 지중 열교환기를 지중에 설치하여 순환유체를 파이프내부로 순환시키는 폐회로 방식과 지표수나 지하수를 이용하는 개회로 방식이 있다.

지하수를 열원으로 이용하는 시스템은 기타 지열원 열펌프 시스템 중에서 가장 오래된 방법<sup>(1)</sup>이지만 최근까지 객관적인 설계 기준없이 이용되어져 왔다.

지열의 열원중 지하수는 열용량이 가장 크며 연중 온도가 15±0.5℃로 거의 일정하여 열펌프시스템의 열원으로 이용하여 난방 및 온수를 생산할 때의 열원(heat source)으로 활용될 뿐만 아니

<sup>†</sup>Corresponding author

Tel.: +82-41-540-5802; fax: +82-41-540-5808

E-mail address: hylim@office.hoseo.ac.kr

라 냉방 및 냉수를 생산할 때의 히트싱크로도 활용할 수 있는 특징을 지니고 있어 연중 높은 효율로서 운전이 가능하고 에너지의 소비량을 절감할 수 있는 특징을 지니고 있다.

지하수 이용 시스템은 크게 직립정 방식과 (Standing Column Well, SCW) 복수정(two well) 방식으로 나뉠 수 있다.

직립정 방식은 하나의 관정에서 지하수의 공급과 배수를 동시에 취급하는 방식이고, 복수정 방식은 취수정과 배수정을 굴착하여 냉/난방에 이용하는 것이다.

지하수 이용 열펌프 시스템은 수질이 양호하고 양이 풍부하여야 한다. 비교적 간단한 시스템처럼 보일지라도 관정의 설계, 지하수량, 열교환기 등을 적절히 선택하여야 한다.

본 논문에서는 충북 진천에 복수정 시스템을 직접 설치하여 이용중인 지하수 이용 열펌프 시스템의 난방 시스템을 평가하였다.

## 2. 개방형 시스템 설계 이론

개방형 시스템 설계시 수중펌프, 순환펌프 히트펌프에 대한 정보를 수집하고 분석하여 전 시스템의 에너지 효율비(Energy Efficiency Ratio, EER), 성능계수(Coefficient of Performance, COP)에 설계 목표<sup>(1)</sup>를 두어야 한다.

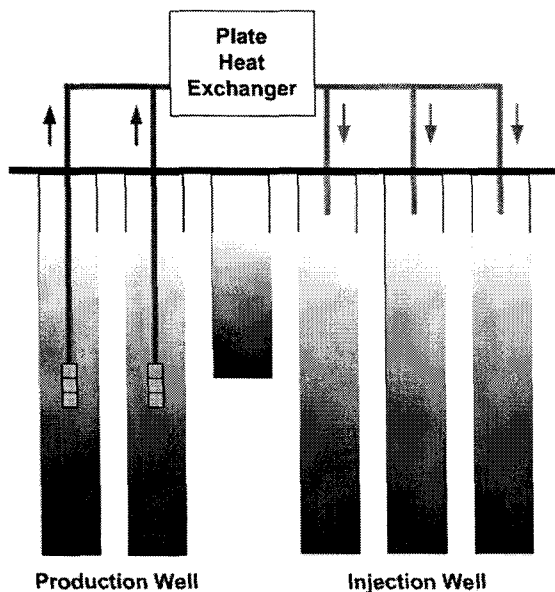


Fig. 1 Schematic of two well type.

Fig. 1은 충북 진천에 설치된 복수정 시스템을 간단히 나타낸 것이다. 두 곳의 취수정에서 지하수를 양수하여 판형 열교환기를 거쳐 세 곳의 배수정으로 내보내는 방식이다.

지열원 열펌프 시스템의 구성은 열펌프 운전과 지하수 유량을 포함하여 설계하는 것이 유리하다

일반적으로 시스템에서 지하수 유량이 증가한다면 수중펌프의 전력량이 상승하지만 시스템 에너지 효율비와 성능계수가 어느 지점까지 증가하지만 수중펌프의 전력량도 동시에 상승하여 점차적으로 수중펌프의 높은 전력량으로 인하여 전체 시스템 효율이 감소한다.

이에 따라 전체 시스템의 최대 성능을 유지하기 위하여 필요한 최적 지하수유량을 평가하여야 한다. 이에 고려해야 할 사항으로 수중펌프 동력, 순환펌프 동력 그리고 히트펌프 동력을 이용<sup>(2)</sup>하여 아래의 식 (2.1)을 이용하여 평가한다.

$$\text{system EER} = \frac{\text{load (Kcal/h)}}{\text{well pump} + \text{loop pump} + \text{heat pump}} \quad (2.1)$$

지하수 이용 히트펌프 시스템의 설계순서는 다음과 같다. 먼저 적용 건축물의 부하를 계산하여 필요 지하수 양수량을 산정하고 안정적으로 이용 가능한 양수량을 결정한다. 그리고 시험용 우물을 설치하여 지하수위 시험을 실시한 후 적절한 펌프용량을 선정한다.

일반적인 설계 방법은 지하수 유량의 범위를 산정하여 수중펌프에 필요한 전력량에 따라 각 지하수 범위에서의 열펌프 성능을 감안한 설계 방법이다.

펌프의 전력량과 열펌프의 성능치 그리고 일반 조건에서 정밀하게 수중펌프가 제어될 때 시스템 효율 등을 고려하여 최적의 조건을 제시하여야 한다. 그리고 시스템 내에서 압력강하, 온도, 히트펌프와 열교환기의 재질 등을 감안하여 설계한다. 또한 1차 열교환기 입·출구 평균온도를 설계기준<sup>(3)</sup>으로 삼아야 한다.

### 2.1 우물 설치

수위는 일반적인 대수층이나 수압에 의해 분출한 우물의 대수층 그리고 일반적인 정적수위를

보여준다.

펌프가 작동하게 되면 수위가 내려가게 되며, 어느 일정한 수준까지 수위가 내려가면 더 이상 수위는 하락하지 않는다. 이를 저수위층이나 펌프수위(Pumping water level)라 할 수 있다.

지중에 형성된 대수층에 의하여 우물의 상태를 알 수 있다. 지하수 손실수두가 2.1 l/s m일 때는 우물의 상태가 “양호”이고, 지하수 손실수두가 0.1 l/s m일 때는 “불량”<sup>(1)</sup>이라 할 수 있다..

우물을 설치후에는 지표와 우물의 상부를 분리시켜야 한다. 우물의 상부와 대기중 공기와 만나게 되면 우선 지하수원의 오염을 일으킬 수 있으며, 산소가 지하수에 녹아들어 물속에서 이산화탄소가 생성이 되어 철분과 산화하여 열교환기에 퇴적되는 결과를 낳는다.

개방형 시스템에 적용되는 우물의 경우 지중에 암반층이 충분히 분포되어 있어야 하며, 암반 도달층 까지 케이싱 처리를 한다. 케이싱과 공벽사이 혹은 내부케이싱과 외부케이싱 사이의 공간에 그라우팅을 함으로써 오염물질로부터 대수층을 보호하고, 공내 지하수와 접촉하는 케이싱을 보호하며, 선택된 지역을 밀봉하기 위하여 실시한다.

그리고 우물 하부의 경우 퇴적물 침전을 방지하며, 지하수 유동을 가로 막지 않을 정도의 침투성이 좋은 자갈층이나 가는 입자의 모래로 이루어진 스크린이 조성되어야 한다.

## 2.2 판형 열교환기

지하수 이용 열펌프 시스템은 지하수를 열펌프로 직접 인입시키지 않고 중간 판형 열교환기를 거쳐게 된다.

열교환기의 주요능력은 히트펌프와 지하수간의 직접적인 접촉을 막아 지하수를 사용함에 있어 수질오염 등으로 야기되는 문제를 미연에 방지하는 것을 목적으로 한다.

이에 따라 판형 열교환기는 부식에 강한 재료로 구성되어 있으며, 분해 조립이 간단하여 누구나 유지보수를 할 수 있도록 하였다.

판형 열교환기의 세부적인 지하수 열원 히트펌프 시스템에 사용할 판형 열교환기 규격을 결정하기 위해 사용되는 열교환기 면적을 구하는 식은 Lim et. al.<sup>(1,5)</sup>에 자세히 소개하였다.

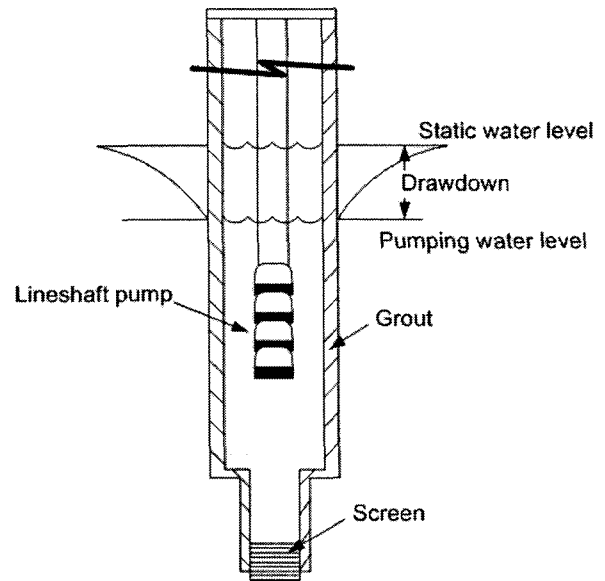


Fig. 2 Water well terminology.

## 2.3 현장 투수시험

지중의 투수성은 지하수위 하부 지반에 미치는 양압력을 알고, 우물 등을 설계, 시공하기 위하여 필요하다. 투수성은 투수계수의 대소로 나타내며, 투수계수를 구하는 방법에는 실험실에서 행하는 투수시험과 현장투수시험법이 있다. 여기에서는 현장에 설치될 우물의 지중 지반의 투수성을 확인하기 위하여 현장투수시험법을 적용하였다.

투수시험에는 정수위 투수시험과 변수위 투수시험이 있다. 일반적으로 우물의 투수계수를 측정하기 위해서는 변수위 투수시험을 시행한다. 변수위법은 시추공을 이용하여 시험구간의 상단까지 케이싱을 삽입하고 케이싱의 상부에서 물을 주입하여 경과한 시간에 대한 공내의 수위변화를 측정하여 투수계수를 산출하는 방법이다. 따라서 수위하강법(falling head method)을 적용하여 현장투수시험을 수행한다.

$$K = \frac{R^2}{2L(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{L}{R}\right) \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right) \quad (2.2)$$

$K$ 는 투수계수이고  $L$ 은 투수시험구간의 길이 즉 수위하락구간을 말하며,  $R$ 은 시추공의 반경,  $H_1, H_2$ 는  $t_1, t_2$  때의 초기상태의 수위와 최종 우물 수위를 말한다.

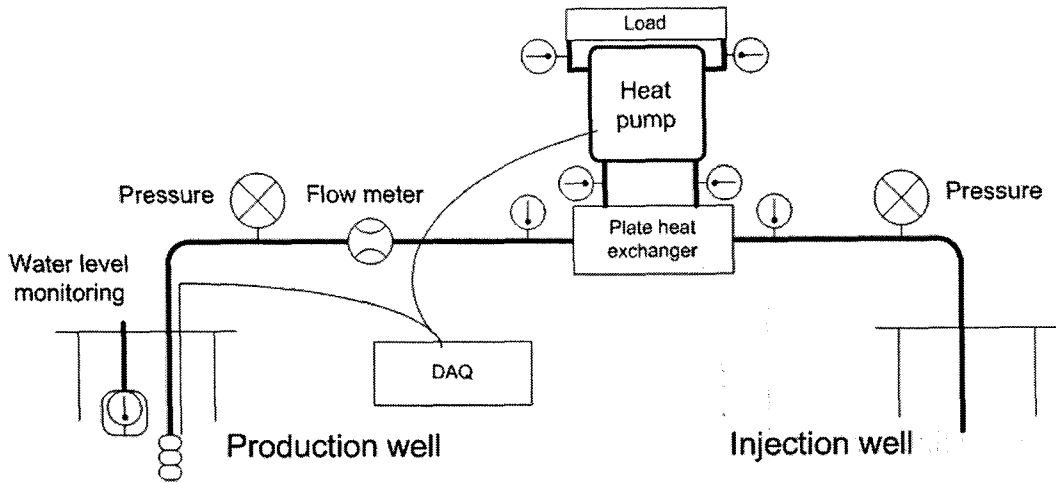


Fig. 3 Schematic diagram of typical apparatus for DAQ system.

### 3. 실험 방법

본 연구의 대상 건물은 충북 진천군에 위치한 화장품 공장건물이다. 본 건물의 냉난방을 위해 총 120RT 용량의 지열원 열펌프 시스템이 가동되고 있으며, 지하수 이용 열펌프 시스템은 전체 50RT로 구성되어 있다.

아래의 Table 1에 대상건물의 개요와 부하조건 등을 정리하였다.

취수정은 300m 깊이로 2개가 설치되어 있으며, 배수정 역시 300m 깊이로 3개가 설치되어 있고, 또한 150m 깊이의 관측정이 시추되어 있다.

세화 P&C 진천공장은 화장품 제조공장으로서 지하 1층 지상 2층으로 제조동과 분류동으로 나뉘어져 있다.

성능연구를 위하여, 설치 완료된 지하수 냉난방 시스템의 소비전력을 디지털 파워미터로 측정

하였으며, 지하수 및 부하측 입·출구 온도와 유량은 k-type 열전대와 터빈유량계를 이용하였다. 데이터 획득 시스템은 NI SCXI-1000을 사용하였다.

시스템 최종 설치는 11월에 완료하였으며 실험 site 내에서 조사 및 측정은 11월 중순부터 본격적인 데이터 수집을 시작하였다.

Fig. 3은 실험 site내 데이터 측정을 간단히 나타낸 것이다. 취수정 공내에 지하수위 측정 센서를 설치하여 지속적인 수위 변화량을 측정하였고, 지하수 및 1차측 관형 열교환기 그리고 부하측 입·출구 온도를 DAQ로 저장하였다.

### 4. 실험 결과 및 분석

시스템 성능평가를 위하여 실내 F.C.U와 모든 배관, 그리고 히트펌프를 작동시켜 자동 운전으로 수행하였다. 1차 운전은 수직형 지열원 열펌프 시스템이 작동하고, 그 용량을 벗어나는 부하에 대해서는 지하수 이용 열펌프 시스템이 운전을 시작한다.

본 실험에서는 기계실에 설치된 관형 열교환기 입·출구 온도, 응축기 입·출구 온도와 증발기 입·출구 온도를 각각 측정하였다. 그리고 유량계를 우물에서 올라오는 배관에 설치하여 지하수 유량을 측정하였으며, 전체 시스템에 대해 8곳에서 각각의 온도를 측정하였다.

전력량측정은 수중펌프와 순환펌프를 포함한 전체 열펌프 전력량을 측정하였다.

식 (2.2)를 이용하여 우물에서의 투수시험결과

Table 1 Summary of the building

Categories	Contents
Total floor area	4,677 m <sup>2</sup>
Stories	B1 ~ 2F
Production well	300m × 2
Injection well	300m × 3
Heat pump	50 RT
Heat exchanger	9.3 m <sup>2</sup>
Well pump	5.5 kw × 2

평균 투수계수는  $2.6 \times 10^{-4}$  cm/sec로 계산되었다.

Fig. 4는 지하수 열펌프 시스템 작동시 취수정 4번 홀에서의 지하수위 및 온도를 나타낸 그래프이다. 시스템을 가동하기 시작한 11월부터 시작하여 3월 말까지 측정된 것으로서 4번 홀에서는 시스템 가동 후에도 수위가 급격히 강하되나 일정시간 경과 후에는 지상으로부터 40m로 펌프수위를 항상 유지하고 있으며, 지하수 온도는 대략 15°C 내외임을 알 수 있다.

지하수 펌프 정지시 2시간 이내 수위가 빠른 속도로 회복하며 대략 정적수위(SWL, Static Water Level)는 7m 임을 알 수가 있다. 지하수의 수위 회복률은 초기 지하수의 수위강하(draw down)와는 반대로 정적수위에 도달할수록 회복 속도가 늦어짐을 알 수 있다.

Fig. 5는 지하수 열펌프 시스템에 사용된 전체 시스템의 소비전력량을 일일평균값으로 나타낸 그래프이다. 그림에서 보듯이 GWHP 시스템은 난방부하가 가장 큰 12월, 1월에 최대 전력소모가 발생하였다.

Fig. 6는 전체 시스템 COP(Coefficient of Performance)를 나타낸 것이다. 본 연구에서의 COP는 열펌프에 공급되는 유량과 온도를 가지고 산출한 열량을 시스템의 전체소비전력량(순환펌프, 수증펌프 포함)으로 나눈 값으로 정의하였다.

1차측 열교환기를 통하여 지하수와 부하측 순환수 사이에 열교환을 한 후 건물내 난방 운전시 시스템의 입구온도는 대략 15°C내외이다.

Table. 3은 각 부분에서 측정된 온도의 변화량을 나타낸 것이다.

지하수에서 1차측 열교환기로 투입되는 온도는 평균 15.2°C로 열교환후에는 14°C의 온도로 배수정으로 버려진다. 또한 판형 열교환기를 거친 순환수는 열펌프로 16.5°C로 투입되고 15.9°C로 배출된다.

Table 3 Temperature variation of each part

Categories	Temp. measurement (°C)		
	In	Out	Variation
Ground water	14.0	15.2	1.2
Plate heat exchanger	15.9	16.5	0.6
Heat pump	39.5	41.5	2.0

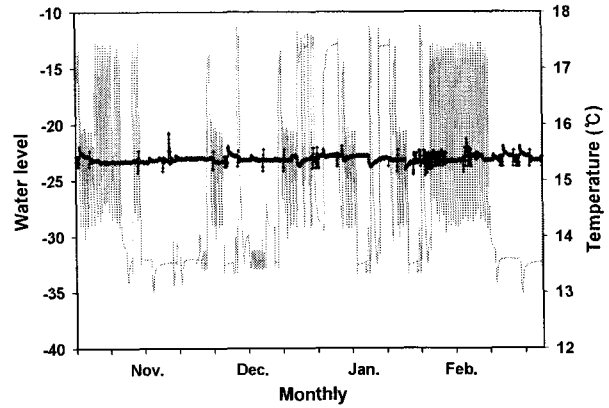


Fig. 4 Ground water level and temperature.

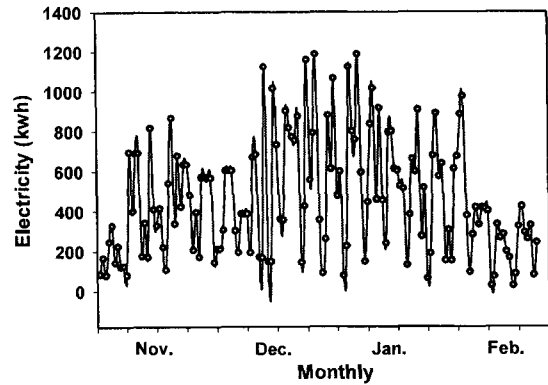


Fig. 5 Energy consumption of GWHP.

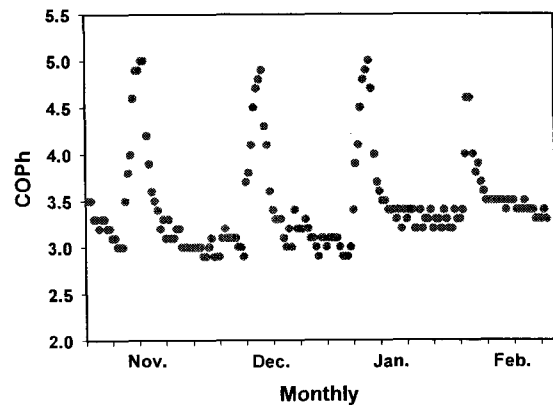


Fig. 6 Heating operation.

Table 2에서 일반적으로 정상적인 열펌프는 난방 공급온도가 50°C에 근접되어야 하나 본 site에서 측정된 열펌프는 부하측으로 취출되는 순환

수 출구온도가 41.5℃임을 알 수 있다. 이는 상대적으로 간헐 운전에서의 손실이 있을 수 있으며, 또한 열교환 능력의 저하로 그 능력이 초기 설계치에 미치지 못함을 알 수 있다. 이로 인하여 열펌프로 투입되는 유량에 비하여 온도차가 적어 열펌프 용량이 적게 형성되고 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

지하수 열펌프 시스템은 지중 조건에 많은 구애를 받지만 뛰어난 성능과 저렴한 초기 투자비로 인하여 많은 관심을 받고 있는 추세이다.

이에 본 연구는 최근 들어 관심도가 점차적으로 증가하는 지열원 열펌프 시스템중 지하수열원 열펌프 시스템의 복수정 방식의 국내 적용 가능성을 점검하였으며, 실증 site에서 성능 분석을 수행하였다. 이상의 과정을 통하여 다음과 같은 연구결과를 얻을 수 있었다.

지하수의 온도변화를 조사한 결과 외기에 비하여 온도가 일정하여 열원으로서 좋은 특성을 갖는다.

간헐적 운전에서의 손실과 열교환 성능의 저하로 열펌프 성능이 작게 형성되어 있음

50RT급 시스템 운전결과 2005년 11월 ~ 3월 중 난방 성능계수는 약 2.9 ~ 5.0의 분포를 보이며, 일반적으로 COP 3.4를 보이고 있다.

초기 정적수위는 7m에서 측정되나 시스템 가동 후 급격한 수위강하를 보이거나 펌프수위는 40m를 유지하고 있으며, 시스템이 작동을 멈추면 2시간이내에 초기수위의 80%이내를 회복한다.

지하수이용 열펌프 시스템의 내구성 및 신뢰성 검증을 위해서 좀더 장기간의 운전 데이터가 필요하며 향후 냉방 운전시에 추가적인 연구가 이루어져야 한다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 산하 에너지관리공단의 실증연구사업에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Rafferty, K., 2000, Design aspects of commercial open-loop heat pump systems, Geo-Heat Center, Oregon institute of Technology, Klamath Falls, OR, U.S.A.
2. Lienau, P. J., Lund, J. W., Rafferty, K., and Culver, G., 1994, Reference book on geothermal direct use, Geo-Heat Center, Oregon institute of Technology, Klamath Falls, OR, U.S.A.
3. Kavanaugh S. P. and Rafferty K., 1997, Ground source heat pumps - Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings, Proceedings of the ASHRAE, Atlanta Georgia, pp. 72-113.
4. Lim, H. J., Song, Y. S., Kong, H. J., Park, S. K., 2005, Efficiency research for ground water heat pump system, Proceedings of the SAREK 2005 Summer annual Conference, 2005-S-181, pp. 1119-1124.
5. Rafferty, K., 1998, Heat exchangers, Geothermal direct use engineering and design guidebook, 3rd Ed., Geo-Heat Center, Oregon institute of Technology, Klamath Falls, OR, U.S.A. pp. 261-277.