

수평형 지열원 히트펌프 시스템에 관한 연구

박용정[†] · 김경훈*

금오공과대학교 대학원 기계공학과, *금오공과대학교 기계공학과

(2006년 4월 28일 접수, 2006년 6월 20일 채택)

A Study on Horizontal Ground Source Heat Pump Systems

Yongjung Park[†] and Kyounghoon Kim*

Dept. of Mech. Eng., Grad. School, Kumoh Nat'l Univ. of Tech., Kumi 730-701, Korea

*School of Mech. Eng., Kumoh Nat'l Univ. of Tech., Kumi 730-701, Korea

(Received 28 April 2006, Accepted 20 June 2006)

요 약

지열원 히트펌프 시스템은 난방과 냉방부분에서 두드러진 관심을 보이고 있다. 국내에 설치된 지열원 히트펌프 시스템의 대부분은 수직형 방식으로 연구대상 또한 수직형이 주류이다. 본 연구에서는 수평형 지열원 시스템을 시설하우스에 설치하여 성능을 조사하였다. 연구결과, 히트펌프만 고려한 난방성능계수는 3.64이고 지열순환펌프를 포함한 성능계수는 3.31로 나타났다. 응축기 제거열에 대한 순환펌프의 동력은 28.0 W/kW이고, 열교환기길이는 53.3 m/kW였다. 지중으로부터의 평균채열량은 14.58 W/m이고, 응축열에 대한 열교환기 매립된 트렌치길이는 27.7 m/kW였다.

주요어 : 지열원 히트펌프, 시설하우스, 성능계수

Abstract — Ground source heat pump (GSHP) or geothermal heat pump systems (GHPs) are recognized to be outstanding heating and cooling systems. Most of GSHP systems installed and studied in Korea are vertical GSHP systems. A horizontal GSHP system was installed in greenhouse and investigated for the performance characteristics. The results of the study showed that the heating coefficient of performance of the heat pump was 3.64 and the overall heating coefficient of performance of the system was 3.31. The pumping power was obtained as 28.0 W/kW and the required ground heat exchanger length was 53.3 m/kW of rejection heat of condenser. The heat extraction rate was, on average, 14.58 W/m of ground heat exchanger length and trench length is 27.7 m/kW of rejection heat of condenser.

Key words : Ground source heat pump, Geothermal heat pump, Greenhouse coefficient of performance

1. 서 론

태양복사에너지의 46%는 지중이나 해양에 흡수되어 있다가 우주로 방사되며 지구중심부의 방사성동위원소 붕괴시 발생하는 열이 지구표면을 통하여 방사된다. 이

와 같은 메커니즘에 의해 지구의 토양, 암석 등이 가지고 있는 에너지를 지열이라 한다. 연중 일정하게 저장되는 지열에너지는 청정에너지이면서 활용 가능성이 높은 에너지이다. 지표 아래 수 km에 있는 고온의 열을 직접 활용할 수도 있지만 일반적으로 쉽게 이용할 수 있는 방법은 지하에 지중 열교환기를 설치하고 열펌프 시스템을 통하여 열 이동을 수행하는 것으로서, 난방시에는 공조공간에 필요한 열을 지중으로부터 얻고, 냉방이 필요할 경우는 공조공간의 열을 지중으로 방출시킨다.

지열원 히트펌프 시스템의 장점은 공기열원 열펌프시

[†]To whom correspondence should be addressed.
Dept. of Mech. Eng., Grad. School, Kumoh Nat'l Univ. of Tech., Kumi 730-701, Korea
Tel: 054-975-6383
E-mail: yjpark@kongkankorea.com

시스템에 비해서 에너지 소비가 적고 열원이 안정적이며 외기온도저하에 따른 보조열원이 필요 없는 것이다. 또한 시스템이 간단하므로 유지보수비용이 저렴하다. 하지만 초기투자비용이 공기열원 열펌프 시스템에 비해서 높은 것이 단점으로 지적되는데 일단 설치되면 시스템수명에 걸쳐 유지비용이 적기 때문에 결과적으로 이득이 된다^[1].

Lund and Freeston^[2]은 지열원 히트펌프시스템이 1995년 이후 59%의 성장을 보였고 매년 9.8%씩 증가를 보여 왔으며, 2000년도 초까지 세계적으로 공급된 지열원 히트펌프 시스템은 약 50만 여대인 것으로 조사하였다. Lund^[3]는 2000년 현재 미국에 설치된 지열원 히트펌프는 45만 여대이고 매년 5만 여대씩 증가하며, 이중에서 밀폐수직형이 46%, 밀폐수평형이 38%, 15%가 개방형 시스템이라고 밝혔다. 그는 매년 10%씩 설치가 증가하여 2010년까지 미국에 보급되는 지열원 히트펌프시스템은 150만대로 추정하였다.

선진 외국은 지열이용에 대한 연구가 일찍부터 활성화되어 지열원 히트펌프 시스템의 설계에 대한 기준을 제시하였고, 많은 설치사례들에 대한 자료를 엔지니어들에게 보급함으로써 지열원 히트펌프 이용을 촉진시키고 있다^[4,5].

해외의 최근 연구 경향을 살펴보면, Zeng *et al.*^[6]은 수직형 지중 열교환기에 있어서 단일 U자관과 2중 U자관을 사용했을 때의 보어홀의 열전달을 해석하였고, Hepbasli *et al.*^[7]은 밀폐수직형 지열원 히트펌프의 실험적 연구를 수행하였다. Bi *et al.*^[8]은 지중 열교환기 주위의 온도분포를 이론과 실험을 통하여 해석하였으며, Inalli and Esen^[9]은 수평형 지열원 열펌프 시스템의 지중 열교환기 매립깊이를 다르게 했을 때의 열적 성능을 조사하였다.

국내의 경우 이^[10]는 지하의 열해석방법과 열교환기 매



Fig. 1. Greenhouse.

립형태에 따른 지중열교환기의 설계방법 등을 소개하였고, 신 등^[11]은 지열에너지를 효과적으로 이용할 수 있는 방안을 소개하였으며 최근에 김 등^[12]은 국내에 설치되어있는 지열원 히트펌프시스템의 난방성능을 조사하였다.

지금까지의 국내의 지열원 히트펌프 시스템 적용에 대한 연구는 주로 주거공간 건물을 대상으로 한 수직형 방식이 대부분이며 수평형에 대한 연구는 미약한 실정이다.

본 연구에서는 수평형 지열원 히트펌프시스템을 온실에 적용하였다. 일반적으로 시설하우스는 작물을 재배하기 위한 비교적 넓은 면적을 가지고 있고 대부분 비닐하우스나 유리하우스로 되어있는데 일반건물과는 달리 실내전체로 태양복사에너지가 용이하게 유입되도록 되어있다. 주간은 유입되는 태양복사는 내부의 토양표면을 먼저 가열시키고 그 다음에 실내공기가 가열되는데 실내의 토양표면온도는 외부의 토양보다 높게 유지된다. 즉, 외기에 노출된 토양보다 온실내부의 토양이 일사에너지 축적이 용이하다고 볼 수 있는데 이와 같은 열적 특성을 지열원 히트펌프에 이용하고자 토양에 매립되는 지중열교환기를 비교적 얇게 수평으로 매립하여 히트펌프의 성능을 알아보려 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험대상

본 연구는 비닐하우스 450평(18m×78m)을 대상으로 하였다. 내부는 150평씩 3연동으로 되어있고 2m 높이에서 다중보온덮개를 사용하여 보온을 할 수 있도록 되어있다. 재배작물은 가시오이이며, 재배에 필요한 실내 유지온도는 15°C 내외이다.

2-2. 실험장치 및 방법

2-2-1. 지중열교환기 설치

지중열교환기는 땅속에 매립되어 토양과 열전달을 수행한다. 본 연구에서 적용한 매립방식은 수평매립방식이다. 비닐하우스 내부에 50 cm 폭으로 트렌치 작업을 하고 PE(Poly Ethylene)파이프를 땅속에 설치하였다.

Fig. 1에 설치 비닐하우스의 모습을 나타내었으며 비

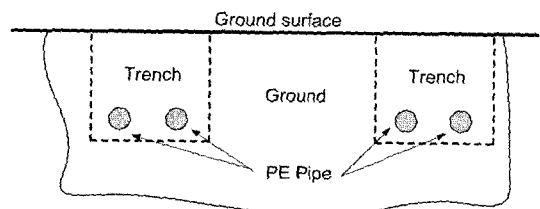


Fig. 2. Ground heat exchanger.

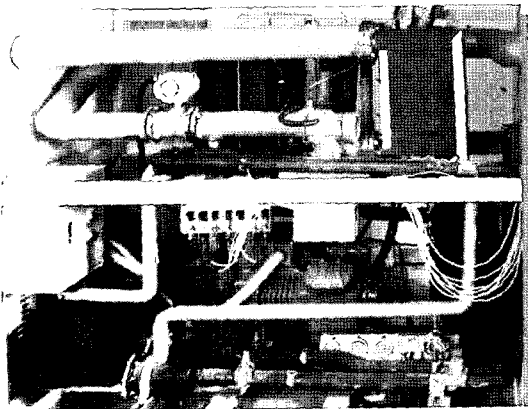
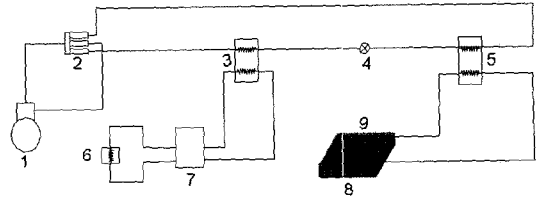


Fig. 3. Heat pump system.

닐하우스는 3개의 동으로 되어있다.

총 설치된 배관길이는 1608 m이며 트랜치 길이는 804 m이다. 매립된 지중 배관헤드와 펌프까지의 주배관길이는 무시하였다. 각 동에는 지중열교환기 입구측과 후단의 환수측에 배관헤드를 준비하여 각 동에 매립된 열교



- 1: Compressor
- 2: 4Way valve
- 3: Condenser
- 4: Expansion valve
- 5: Evaporator
- 6: Fan coil unit
- 7: Thermal storage tank
- 8: Ground
- 9: Ground heat exchanger

Fig. 4. Schematic of ground source heat pumps system.

환기를 연결하였다.

2-2-2. 히트펌프시스템의 구성

Fig. 3은 제작된 히트펌프의 모습이고, Fig. 4는 시스템 개략도이다.

시스템은 토양과 열교환을 하는 지중열교환부, 증기압 축사이클, 열을 저장하는 축열부, 공조 공간으로 열을 공급하는 장치로 나눌 수 있는데 실내로 열을 공급하는 장

Table 1. Specification of heat pump system.

Main circuit	Element	Specification
Ground coupling circuit	ground heat exchanger	material : polyethylene, diameter : ID=53 mm, length : 1608 m, circulation fluid : water
	circulation pump	range of volume matric flow rate : 5~22 m ³ /h pressure head of water column : 14~9 m power : 1.5 kW
Refrigerant circuit	compressor	type : Reciprocating power of electric motor : 20 HP refrigerant : R22 capacity : 61.25 kW (at evaporating/condensing temperatures of 7.2/54.4°C)
	heat exchanger (condenser for heating)	type : PHE plate material : sus 304 heat transfer area : 9.98 m ²
	heat exchanger (evaporator for heating)	type : PHE plate material : sus 304 heat transfer area: 15.10 m ²
	expansion device	type : TXV capacity : 20 ton
Fan coil circuit	condenser circulation pump	range of volume matric flow rate : 5~22 m ³ /h pressure head of water column : 14~9 m power : 1.5 kW
	fan coil unit	heating capacity : 6.7 kW (at hot water temperature of 60°C, air flow rate : 11.3 m ³ /min)
	circulation pump	range of volume matric flow rate : 5~22 m ³ /h pressure head of water column : 14~9 m power : 1.5 kW

치는 팬코일유닛(FCU)으로 하였다.

지중열교환기 순환유체는 동결기와 증발기 과냉에 의한 동파를 방지하기 위해서 일반적으로 부동액을 혼합하여 사용하지만 본 실험에서는 지중 열교환기내부의 유체가 누설이나 유지보수시 유출될 수 있는 점을 감안하여, 작물에 영향이 없는 물을 순환유체로 하였다.

히트펌프의 작동유체는 R-22를 사용하였고, 증발기 및 응축기는 판형 열교환기를 사용하였다. 순환펌프는 지중 열교환기, 축열조, FCU에 각각 1개씩 설치하였다. 열펌프 시스템의 사양을 Table 1에 나타냈다.

2-2-3. 측정장치

히트펌프의 흡수열과 방출열을 측정하기 위해서 증발기와 응축기에 물용유량계를 부착하고 각각 입출구에 온도센서를 설치하였다. 온도센서로는 T타입 열전대를 사용하였다. 축열조에는 데이터 측정용과 제어용 온도센서를 각각 설치하였다. 온실내부의 열부하에 의한 소모되는 난방열량을 측정하기 위해서 실내로 공급되는 온수 배관에 유량계와 온도센서를 설치하였다. 실내에는 공기 온도를 측정하기 위한 온도센서와 히트펌프시스템을 운전하기 위한 제어용온도센서를 각각 설치하였고, 히트펌프 장치에는 온도센서와 압력센서, 냉매유량계를 설치하여 실시간으로 작동상태를 확인할 수 있게 하였다. 압축기, 각각의 순환펌프, FCU에 소모되는 전력을 측정하였는데, 모든 측정 데이터는 AD board인 34970A와 GPIB를 통해서 PC에 저장된다. 측정 프로그램은 Labview를 사용하였다.

2-2-4. 실험방법

실내공기가 설정온도(15°C) 이하가 되면 난방이 필요한 것으로 하고 축열조의 온수를 실내에 설치된 FCU로 공급되게 하였다. 압축기는 축열조의 온도가 설정온도 미만이면 기동이 되게 하였다. 지중에서 열을 회수하여 증발기로 들어가는 지열수의 온도가 4°C 미만이면 압축기가 정지되고 지열수가 6°C 이상이 되면 압축기가 다시 기동된다. 축열조 온도가 설정온도에 도달하면 압축기 및 응축기측 순환펌프는 정지하는데, 지열측 순환펌프는 지열순환수온도를 측정하기 위해서 계속 운전되게 하였고 전체 시스템운전은 PLC로 제어하였다.

히트펌프시스템의 구동에너지는 전력인데 소요되는 값을 구하는 식은 다음과 같다.

$$W=V \times I \times \sqrt{3} \times PF \quad (3\text{상일경우}) \quad (1)$$

$$W=V \times I \times PF \quad (\text{단상일경우}) \quad (2)$$

지중열교환기가 토양에서 얻는 열은 히트펌프의 증발기를 통과하는 물의 유량과 입구 출구 온도를 측정하면, 다음 식을 사용하여 구할 수 있다.

$$Q_e = \dot{m}_{ew} C_{p,e} (T_{o,e} - T_{i,e}) \quad (3)$$

히트펌프에서 이용할 수 있는 난방열은 결국 응축기에서 제거하는 열인데, 아래와 같이 응축기가 물에 저장하는 열입을 알 수 있다

$$Q_c = \dot{m}_{cw} C_{p,c} (T_{o,c} - T_{i,c}) \quad (4)$$

Table 2. Measured parameters and experimental results in average.

Item	Value	Unit
Condensation pressure	1.79	MPa
Evaporation pressure	0.50	MPa
Volumetric flow rate of condenser water	18.9	m ³ /hr
Volumetric flow rate of evaporator water	18.6	m ³ /hr
Volumetric flow rate of fan coil unit circulation water	17.2	m ³ /hr
Mass flow rate of refrigeration	18.1	kg/min
Water temperature at condenser inlet	41.0	°C
Water temperature at condenser outlet	43.7	°C
Water temperature at evaporator inlet	5.0	°C
Water temperature at evaporator outlet	2.9	°C
Power input to the compressor	16.2	kW
Power input to the condenser water circulation pump	0.94	kW
Power input to the evaporator water circulation pump	1.65	kW
Rejection heat of the condenser	59.0	kW
Extraction heat from the evaporator	45.9	kW
Pumping power of the ground water circulator of rejection heat of condenser	28.0	W/kW
Average ground heat exchanger length of rejection heat of condenser	53.3	m/k
WAverage heat extraction rate of ground heat exchanger length	14.5	W/m
Heating coefficient of performance of the heat pump (COP_hp)	3.64	-
Overall heating coefficient of performance of the system (COP_sys)	3.31	-

히트펌프의 성능을 나타내는 성능계수(COP)는 입력에
 니지대한 출력에너지의 비로 표현되는데 다음과 같다.

$$COP_{hp} = Q_c / W_{comp} \quad (5)$$

$$COP_{sys} = Q_{load} / (W_{comp} + W_{Gpump}) \quad (6)$$

여기서, COP_{hp} 는 응축기 제거열과 압축기동력만을 고
 려한 것이고, COP_{sys} 는 실내로 공급한 열에 대해서 총 투
 입에너지(압축기, 지열펌프)를 고려한 것이다.

3. 실험결과 및 고찰

비닐하우스안에는 실제로 작물을 정식하고 히트펌프
 시스템을 가동하였으며, 자동난방운전이 되게 하면서 테
 이터를 취득하였다. 측정된 데이터와 결과는 Table 2에
 나타내었다. 수평식은 수직식에 비해서 열교환기 매립깊
 이가 매우 얇은데 열교환기가 매립된 위치의 지중온도
 는 동절기에는 수직식에 비해서 낮고 하절기에는 높게
 유지된다.

Fig. 5는 지열수가 열펌프의 증발기를 통과할 때 증
 발기 입구온도와 출구온도를 나타낸다. 평균 입구온도는
 5.0°C이고, 지열순환수온도가 6°C가 되면 기동하였다가
 4°C 이하로 내려가면 작동이 멈추게 되고 다시 지열수
 온도가 상승하게 되는데 이를 반복함으로써 주기적인 동
 작 그래프가 나타났음을 알 수 있다. 열펌프가 작동될
 때 지열수 입출구온도차는 2.1°C로 나타났다. 입출구온
 도가 점차 낮아지는 것은 히트펌프의 능력이 지중
 열교환기가 채열하는 양보다 크기 때문이다. 지열수와 응
 축기측 유량은 거의 일정하게 유지되었는데 응축기측 순
 환수 평균유량은 18.9 m³/h이고, 지열수의 평균유량은 18.6
 m³/h(4.88 gpm/ton)이었다. Fig. 6은 응축기제거열과 증
 발기 흡수열을 나타낸다. 응축기 제거열은 평균 59.0 kW

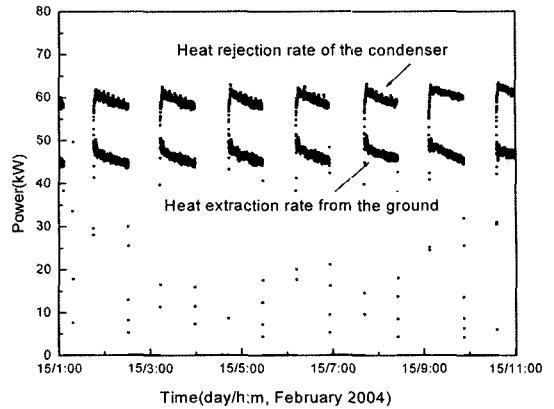


Fig. 6. Power of heat pump.

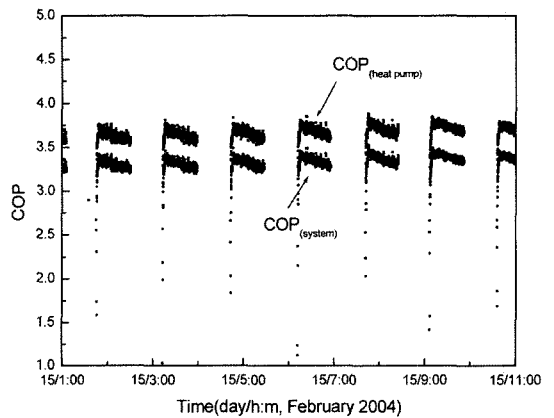


Fig. 7. Coefficient of performance.

이고 증발기 흡수열은 45.9 kW로 나타났으며 압축기소
 요동력은 16.2 kW로 나타났다. Fig. 7은 히트펌프시스
 템의 성능을 나타낸 것이다. 히트펌프자체의 성능계수(COP_{hp})
 는 3.64로 나타났고, 시스템의 성능계수(COP_{sys})는 3.31
 로 나타났다. 이는 Inalli^[9]가 실험한 수평형 시스템의 압
 축기와 지열순환수펌프의 동력만을 고려한 성능계수(COP_{sys})
 2.87보다 약간 높은 값인데 그가 채용한 지열원 히트펌
 프는 물대 공기방식이며, 증발압력이 0.17 MPa로써 비
 교적 낮다. 응축기 제거열량에 대한 지열순환수펌프의 동
 력은 28.0 W/kW이고 지열수 유량은 5.25 lpm/kW로 나
 타났는데, Kavanaugh^[10]는 양호한 설계의 펌프동력은
 11~16 W/kW이고 상한 값인 30 W/kW를 초과하지 않을
 것을 권장하였다. 또한 유량은 2.7~3.2 lpm/kW를 제시
 하였는데 이에 비해서 다소 높다. 펌프동력이 다소 높
 은 이유는 과도한 유량이 주원인으로 보여지며 그 외에
 지중열교환기와 히트펌프에 설치된 열교환기, 데이터측
 정을 위한 유량계, 엘보, 밸브 등이 추가적인 압력손실

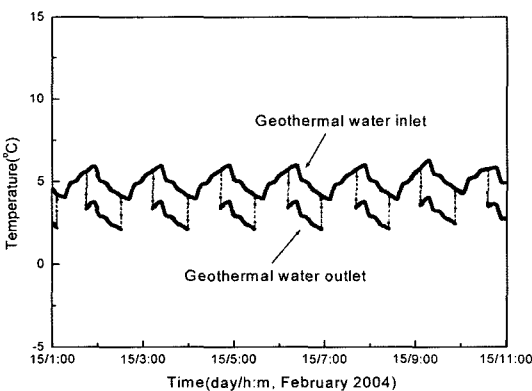


Fig. 5. Geothermal water temperature.

을 초래하여 펌프동력상승으로 나타난 것으로 보인다. 지중열교환기 평균 채열량은 14.5 W/m로 나타났는데 Inalli^[9]가 실험한 시스템의 7.12 W/m 보다 2배 정도 높은 값을 나타냈다. 이때 응축기제거 열량에 대한 지중열교환기 길이는 53.3 m/kW인데 Martin^[12]은 경제적으로 적절한 배관길이를 29~50 m/kW로 제시한바 있는데 그가 사용한 매립방법은 단일루프식으로 배관길이는 트랜치길이와 같다. 응축기 제거열에 대한 열교환기가 매립된 트랜치 길이는 27.7 m/kW로 나타났다.

4. 결 론

비닐하우스 온실에 수평식 지열원 히트펌프 시스템을 적용하여 난방실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 히트펌프 자체만 고려한 성능계수(COP_{hp})는 3.64 이고, 지열순환수펌프를 고려한 시스템 성능계수(COP_{sys})는 3.31로 나타났다.

(2) 응축기제거 열량에 대한 지열순환펌프의 소요동력은 28.0 W/kW으로 나타났고, 이때 지열수 유량은 5.25 lpm/kW이었다.

(3) 지중열교환기의 길이당 평균 채열량은 14.5 W/m으로 나타났다.

(4) 응축기 제거열량에 대한 지중열교환기 길이는 53.3 m/kW으로 나타났고, 트랜치 길이는 27.7 m/kW로 나타났다.

기호설명

W	: 동력[W]
V	: 전압[V]
I	: 전류[A]
PF	: 역률
Q	: 열량[W]
T	: 온도[°C]
\dot{m}_{fc}	: FCU를 지나는 물의 질량유량[kg/s]
\dot{m}_{ew}	: 증발기를 지나는 물의 질량유량[kg/s]
\dot{m}_{cw}	: 응축기를 지나는 물의 질량유량[kg/s]
C _p	: 비열[J/kgK]
COP	: 성능계수

참고문헌

1. Lund, J.W. Ground-source (geo-thermal) heat pumps, In: Lineau P.J., editor. Course on heating with

geothermal energy: conventional and new schemes. World Geothermal Congress 2000 Short Courses, 2000, 209-236.

2. Lund, J.W.; Freeston, D.H. World-wide direct use of geothermal energy 2000, Geothermics, 2001, 30, 29-68.
3. Lund, J.W. Direct-use of geothermal energy in the USA, Applied Energy, 2003, 74, 33-42.
4. Kavanaugh, S.P.; Rafferty, K. Ground-source heat pumps: design of geothermal systems for commercial and institutional buildings, ASHRAE, 1997.
5. Cane, D.; Morrison, A.; Christopher, J. Operating experiences with commercial ground-source heat pump systems, ASHRAE, 1998.
6. Zeng, H.; Diao, N.; Fang, Z. Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchangers, Int. J. Heat and Mass Transfer, 2003, 46, 4467-4481.
7. Hepbasli, A.; Akdemir, O.; Hancioglu, E. Experimental study of a closed loop vertical ground source heat pump systems, ASHRAE, 2003.
8. Bi, Y.; Chen, L.; Wu, C. Ground heat exchanger temperature distribution analysis and experimental verification, Applied Thermal Engineering, 2002, 22, 183-189.
9. Inalli, M.; Esen, H. Experimental thermal performance evaluation of a horizontal ground-source heat pump system, Applied Thermal Engineering, 2004, 24, 2219-2232.
10. Kavanaugh, S.P. Field test of a vertical ground-coupled heat pump in Alabama, ASHRAE Trans., 1992, 98(2), 607-616.
11. Kavanaugh, S.P. Ground source heat pumps, ASHRAE J., 1998, 40(10), 31-36.
12. Martin, S.D. A design and economic sensitivity study of single-pipe horizontal ground-coupled heat pump systems, ASHRAE Trans., 1990, 96(1), 634-642.
13. 이기우. "지열이용 히트펌프기술", 공기조화·냉동공학회, 1992, 21(4), 306-315.
14. 신현준; 안철홍; 조정식. "지열에너지의 유효이용을 위한 고찰", 공기조화·냉동공학회, 1995, 24(4), 409-419.
15. 김보철; 신현준; 조정식. "지열이용 공조시스템의 난방성능 측정 및 분석", 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, 2003, 1086-1093.