

시설원예를 위한 수평형 지열 히트펌프의 냉방성능 해석

유영선^{1*} · 강연구¹ · 강금춘¹ · 김영중¹ · 백이²

¹농업공학연구소 시설자원공학과, ²원예연구소 부산원예시험장 시설구조자재연구실

Cooling Performance of Horizontal Type Geothermal Heat Pump System for Protected Horticulture

Young Sun Ryou^{1*}, Youn Ku Kang¹, Geum Chun Kang¹, Young Joong Kim¹, and Yee Paek²

¹Agricultural Facilities and Resources Engineering Division, NIAE, RDA, Suwon 441-707, Korea

²Protected Horticulture Experiment Station, NHRI, RDA, Busan 618-800, Korea

Abstract. It has become a big matter of concerns that the skill and measures against reduction of energy and cost for heating a protected horticultural greenhouse were prepared. But in these days necessity of cooling a protected horticultural greenhouse is on the rise from partial high value added farm products. In this study, therefore, a horizontal type geothermal heat pump system with 10 RT scale to heat and cool a protected horticultural greenhouse and be considered to be cheaper than a vertical type geothermal heat pump system was installed in greenhouse with area of 240 m². And cooling performances of this system were analysed.

As condenser outlet temperature of heat transfer medium fluid rose from 40°C to 58°C, power consumption of the heat pump was an upturn from 11.5 kW to 15 kW and high pressure rose from 1,617 kPa to 2,450 kPa. Cooling COP had the trend that the higher the ground temperature at 1.75 m went, the lower the COP went. The COP was 2.7 at ground temperature at 1.75 m depth of 25.5°C and 2.0 at the temperature of 33.5°C and the heat extraction rate from the greenhouse were 28.8 kW, 26.5 kW respectively at the same ground temperature range. 8 hours after the heat pump was operated, the temperature of ground at 60 cm and 150 cm depth buried a geothermal heat exchanger rose 14.3°C, 15.3°C respectively, but the temperature of ground at the same depth not buried rose 2.4°C, 4.3°C respectively. The temperature of heat transfer medium fluid fell 7.5°C after the fluid passed through geothermal heat exchanger and the fluid rejected average 46 kW to the 1.5 m depth ground. It analyzed the geothermal heat exchanger rejected average 36.8 W/m of the geothermal heat exchanger. Fan coil units in the greenhouse extracted average 28.2 kW from the greenhouse air and the temperature of heat transfer medium fluid rose 4.2°C after the fluid passing through fan coil units. It was analyzed the accumulation energy of thermal storage tank was 321 MJ in 3 hours and the rejection energy of the tank was 313 MJ in 4 hours.

Key words : cooling COP, geothermal, greenhouse, heat pump, thermal storage tank

서 언

우리나라의 온실면적은 51,912ha(2006)에 달하고 있으며, 이중 가온면적은 약 1/4인 12,537ha 수준이다. 경영비중 난방비가 차지하는 비율은 오이 37%, 토마토 35%, 감귤 58%, 장미 45%로 높은 비중을 차지하고 있다(시설작물별 난방비 분석자료, 2007. 10., 농

촌진흥청). 이와 같이 난방비가 차지하는 비율이 높기 때문에 지금까지는 시설원예에 투입되는 난방에너지와 난방비를 절감하기 위한 기술 및 대책마련이 최대 관심사가 되어 왔다.

최근 일부 고부가가치 작물을 중심으로 냉방의 필요성이 대두되고 있으며, 단지 작물의 고사를 예방하는 차원을 넘어서 이제는 열적 스트레스를 방지함으로써 생장을 촉진하고, 상품율 및 상품수량을 증가시키기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Moon, 1999; Lee,

*Corresponding author: rys0418@rda.go.kr
Received November 26, 2007; accepted June 12, 2008

1994; Nam 등, 2000; Yu 등, 1999; Yu 등, 2006). 이와 같이 시설재배에 있어서 온도관리는 작물의 생육과 수확량을 좌우하는 중요한 환경요인 중 하나로 손꼽히고 있다. 그런데 시설원예농가가 작물의 냉각처리나 난방을 위해서는 난방기와 냉동기를 따로 구입하여야 하기 때문에 설비의 2중 투자가 야기되어 경제적 부담이 커질 수밖에 없다.

지열 히트펌프는 공기열원 열펌프에 비해 에너지 소비가 적고 열원이 안정적이며 외기온도 저하에 따른 보조열원이 필요 없다는 장점이 있다. 또한 냉난방이 가능하며 투입된 에너지에 비해 방출된 에너지의 비가 크다는 것이다. 하지만 초기 투자비용이 공기열원 히트펌프 및 타 냉난방기에 비해 높다는 것이 단점으로 지적되나 일단 설치되면 유지비용이 적게 들기 때문에 경제성을 확보할 수 있다. 또한 선진외국은 지열이용에 대한 연구가 일찍부터 활성화되어 지열 히트펌프의 설계에 대한 기준을 제시하였고, 많은 설치 사례들에 대한 자료를 엔지니어들에게 보급함으로써 지열 히트펌프 이용을 촉진시키고 있다(Cane 등, 1997; Kavanaugh와 Rafferty, 1997).

본 연구에서는 수직형에 비해 비교적 가격이 저렴하고 냉난방을 동시에 할 수 있는 농업시설에 적합한 수평형 지열 히트펌프 시스템을 온실에 설치하여, 이 시스템의 냉방성능을 분석하였다.

재료 및 방법

1. 실험장치

실험장치는 크게 지중에 열을 방출하는 지열교환시스템, 냉열을 생산하는 히트펌프시스템, 히트펌프에서 생산된 냉열을 방출하는 팬코일 유닛과 냉열을 저장할 수 있는 축열조로 구성하였다.

지열교환시스템은 외경 27mm, 내경 21mm인 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 소재의 파이프를 사용하여 slinky 타입으로 직경이 90cm 되도록 말아 1열당 250m가 되도록 구성하였다. 또한 총 5열을 지하부에 150cm 깊이로 수원 소재 농업공학연구소 구내 포장에 매설하고 지열교환시스템이 매설된 지상부에 피복재와 동일한 비닐보온커튼이 1겹 있는 폭 6m, 길이 40m, 동고 3m의 아치형 단동온실을 신축하였다. 지열교환시스템의 열간 간격은 열간섭 배제 거리(50cm)를 고려하여 80cm로 하였다. 지열교환시스템의 파이프 내는 열매체유(물+부동액)를 채워 흐르도록 하였으며 히트펌프시스템의 응축기에서 냉매의 온열을 열매체유가 전달받아 지열교환시스템을 통해 지중으로 방출하도록 하였다. Fig. 1은 지열교환시스템의 개략도와 매설상태 및 지중 센서 매설 위치를 나타낸다.

냉방인 경우 일반적인 에어컨디셔너의 역할을 하게 되어 냉열을 생산하는 히트펌프시스템은 3상 380V의 전원을 사용하는 10RT용량의 고온용 스크롤식 압축기,

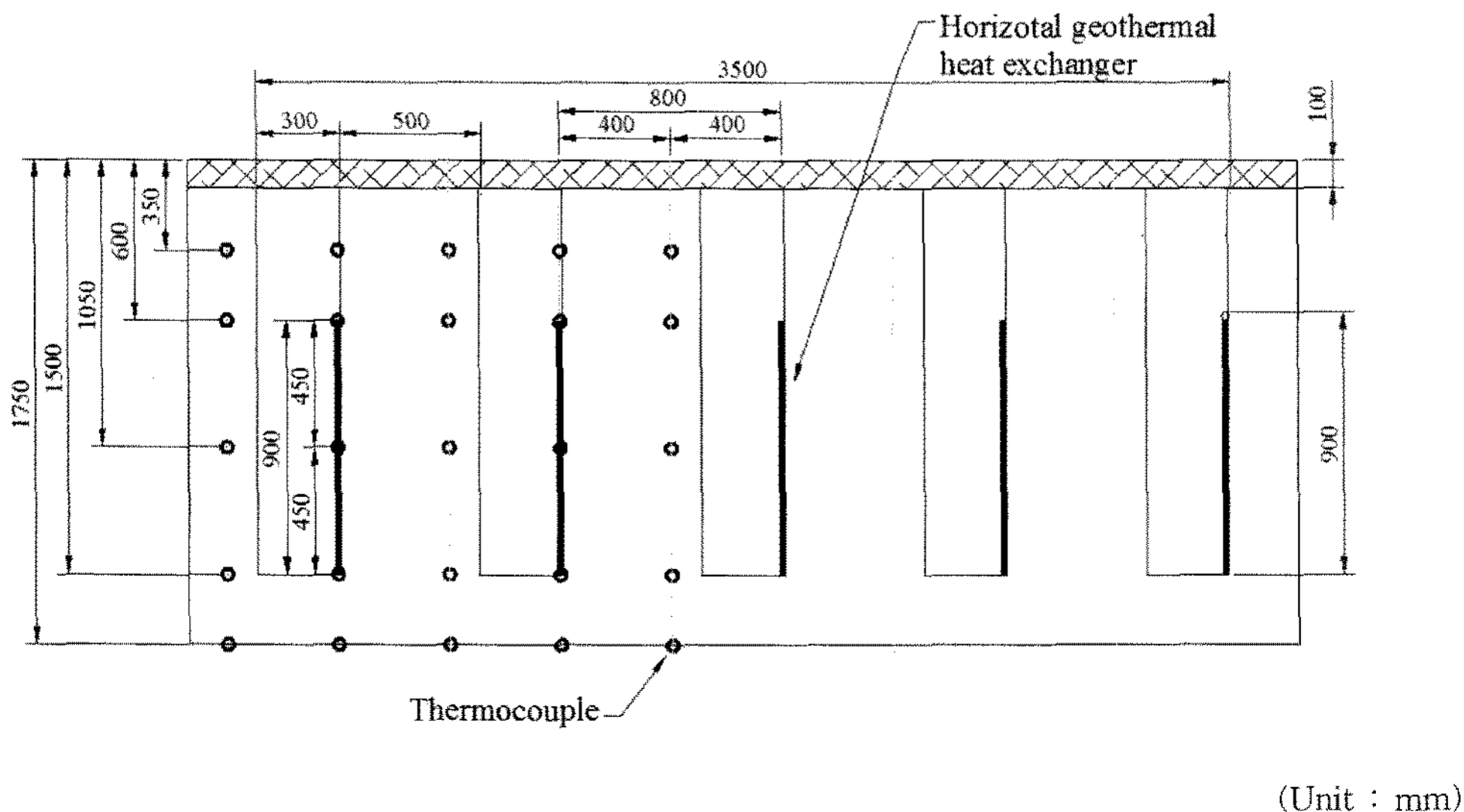


Fig. 1. View of horizontal type geothermal heat exchanger and sensor position.

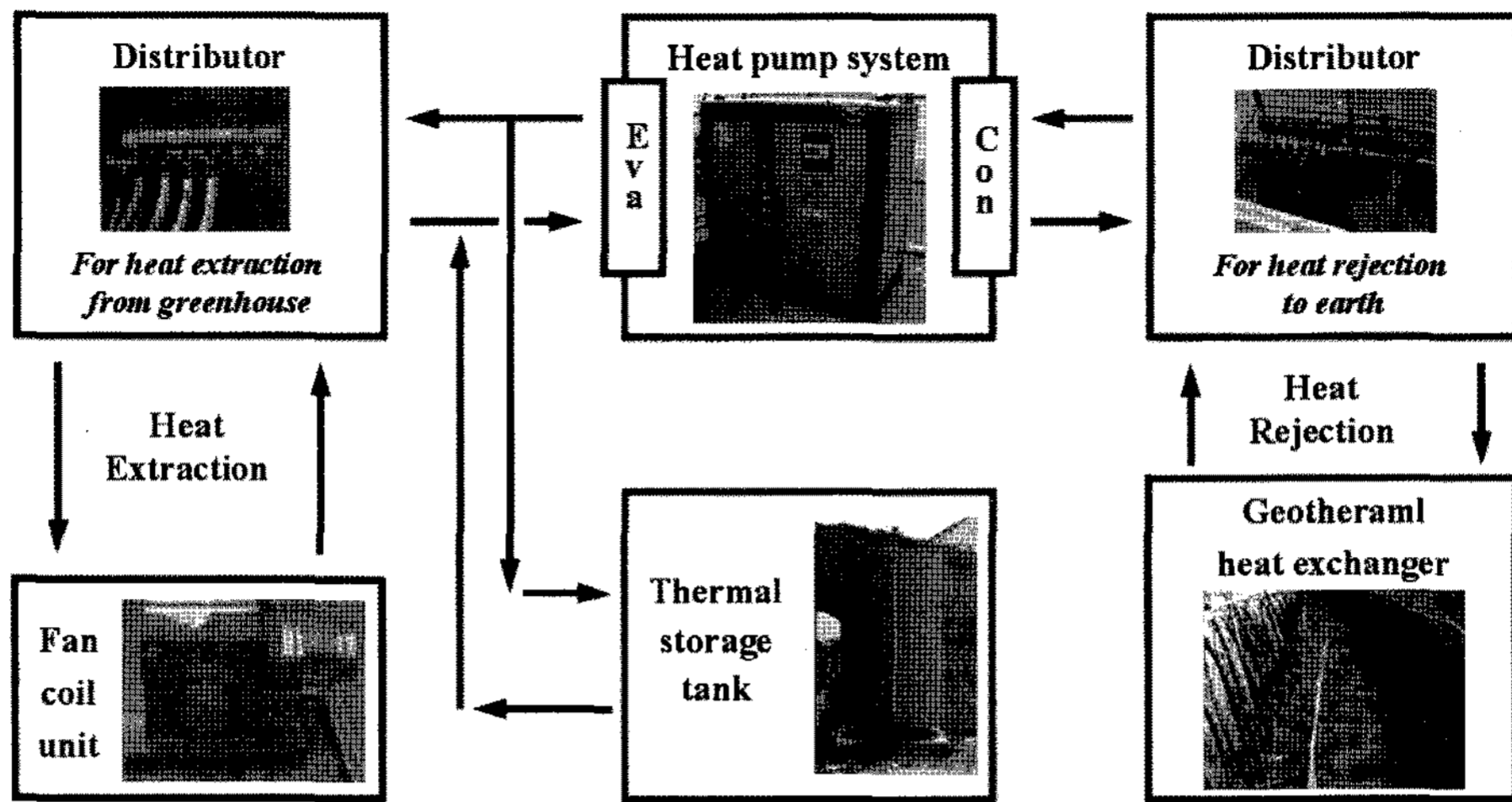


Fig. 2. Schematic diagram of geothermal heat pump system.

Table 1. Total specification of geothermal heat exchanger and heat pump system.

Items	Specification	
Geothermal heat exchange system	Type	Slinky
	Material	HDPE (high density polyethylene)
	Pipe diameter (mm)	Outside dia. : 27, inside dia : 21
	Total length of pipe (m)	1,250
	Coil diameter (mm)	900
	Heat transfer medium fluid	Water(70%) + Antifreeze(30%)
Heat pump system	Compressor	Type High temperature scroll type
		Capacity 10 RT
		Voltage 380 V, 3 Phase
	Condenser / Evaporator	Flat type heat exchanger
	Refrigerant	R22
Thermal storage tank	Diameter (mm)	1,430
	Height (mm)	2,000
	A remark	Diffuser for stratification

판형열교환기 형태의 증발기 및 응축기로 구성되며, 냉매는 R₂₂를 사용하였다.

팬코일 유닛은 물대 공기형 열교환기로 히트펌프시스템내의 증발기에서 냉매의 냉열과 열교환한 열매체를 온실내 공기와 열교환하여 온실을 냉방하는 역할을 한다. 온실의 전후좌우에 총 4대의 팬코일 유닛을 설치하였다.

온실은 기계실과 난방공간으로 나누어 지열히트펌프시스템은 기계실에 팬코일 유닛은 난방공간에 위치하도록 하였으며, 축열조는 온실외부의 지상부에 설치하였다. Fig. 2는 지열히트펌프 시스템의 개략도이며 Table 1은 실험장치의 사양을 나타낸다.

2. 실험 방법

수평형 지열 히트펌프 시스템의 냉방 특성을 분석하기 위해 응축기와 증발기 입구와 출구에 T type 열전대를 설치하여 5분 간격으로 데이터로거(DR230, Yokogawa, Japan)를 통해 데이터를 수집하였다. 응축기와 증발기를 통과하는 열전달매체의 유량은 초음파 유량계(PT868, Panametrics, Norway)로, 소비전력은 전력량계(CW240, Yokogawa, Hioki, Japan)로 측정하여 열량과 식 (1)을 이용하여 냉방성능계수를 산출하였다. 지중 온도는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 지면으로부터 35, 60, 105, 150, 175cm에 PT100Ω flat type 열전대를, 축열조의 층간 온도 및 축열량은 지면으로부터 18, 43, 68, 93, 118, 143, 168, 193cm에

T type 열전대를 설치하여 측정하고 데이터로거를 통해 수집하였다.

$$COP_C = \frac{\rho_w \cdot V_w \cdot c_w \cdot (T_{w,o} - T_{w,i})}{P_{HP}} \quad (1)$$

여기서, COP_C : 냉방성능계수, P_{HP} : 열펌프의 소비전력(kW), ρ_w : 열전달매체의 밀도(kg/m³), V_w : 열전달매체의 체적 유량(m³/s), c_w : 열전달매체의 비열(kJ/kg·°C), $T_{w,i}$, $T_{w,o}$: 응축기 입·출구 열전달매체온도(°C)

결과 및 고찰

1. 열매체유의 응축기 출구온도에 따른 소모전력 및 고압의 변화

히트펌프가 냉방 모드로 가동되는 경우 히트펌프는 일반적인 에어컨다서너의 역할을 한다. 이 경우 응축기에서 발생하는 열을 최대한 방출하게 되면 고압의 상승을 억제할 수 있으며, 이에 따라 히트펌프의 소비전력도 감소하게 된다. 그러나 실제 연속가동에서는 응축기에서 발생한 열을 지중에 축적하는 결과가 되므로 지중의 온도상승에 따라 응축기의 출구 온도도 상승하게 된다. Fig. 3은 열매체유의 응축기 출구온도에 따른 소비전력 및 고압 변화를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 열매체유의 응축기 출구온도가 상승함에 따라 소비전력도 상승하게 되며 소비전력도 상승하는 경향을 나타내었다. 즉, 응축기 출구온도가 40°C에서 58°C로 상승함에 따라 소비전력은 0.221kW/°C, 고압은 51.4kPa/°C의 비율로 상승하였다. 또한 소비전력은 고압이 1,617kPa에서 2,450kPa로 변화함에 따라

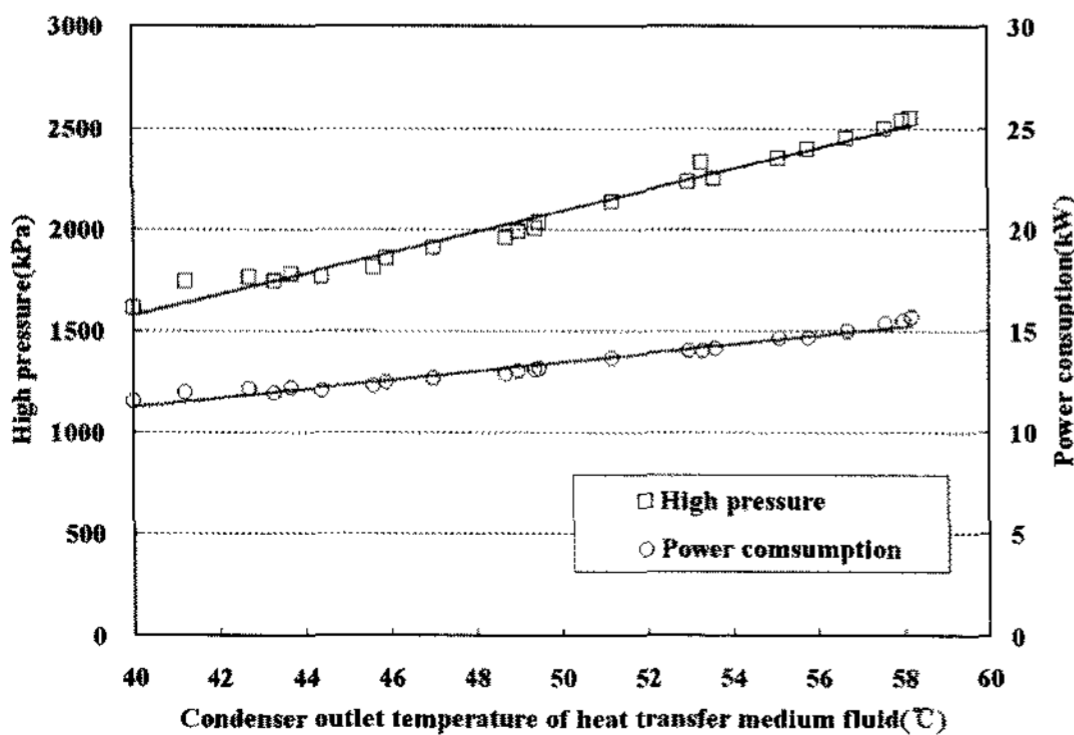


Fig. 3. Variation of power consumption and high pressure of heat pump changing condenser outlet temperature of heat transfer medium fluid.

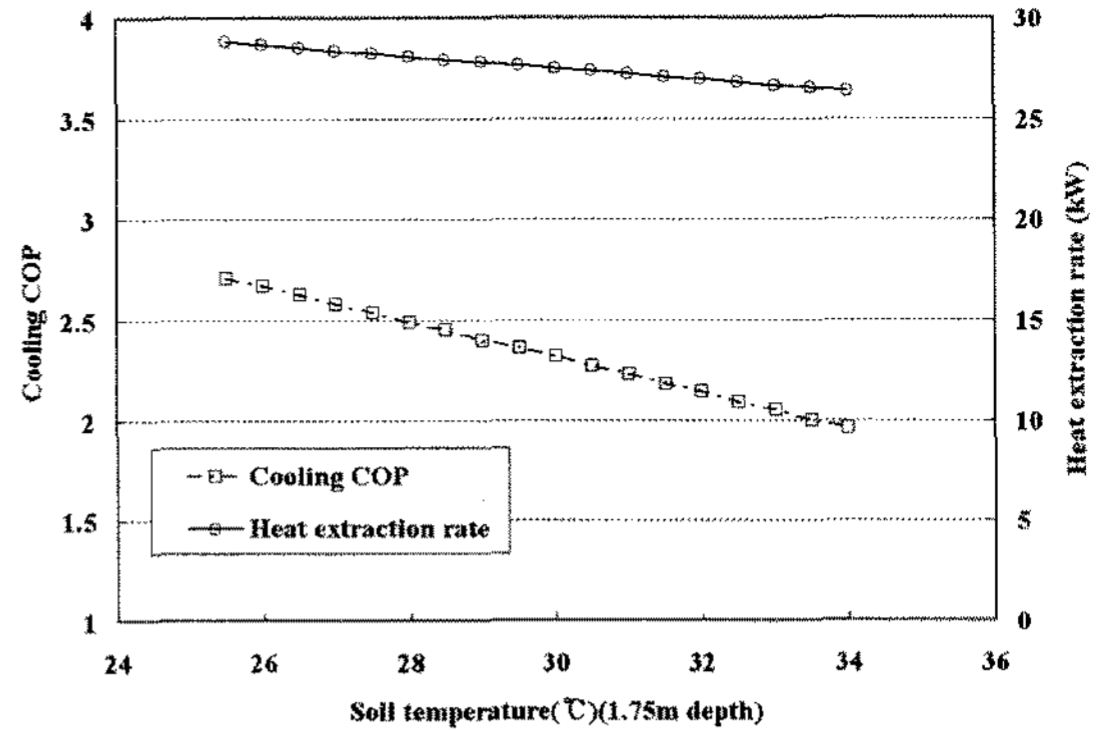


Fig. 4. Variation of cooling COP and heat extraction rate according to soil temperature change at depth 1.75m.

11.5kW에서 15kW로 상승하였다.

2. 지온변화에 따른 냉방성능계수 및 냉방열량

지중온도(깊이 1.75m) 변화에 따른 냉방성능계수 및 흡수열량(냉방열량)은 Fig. 4와 같이 나타났다. 그림에서 보는 바와 같이 냉방성능계수는 지중온도 25.5°C에서 2.7 수준이었으며 지온이 상승함에 따라 하강하여 33.5°C에서 2.0 수준이었다. 또한 온실 내부로부터 흡수하는 열량(냉방열량)은 같은 지중온도 수준에서 각각 28.8kW, 26.5kW이었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 냉방성능계수는 비교적 낮은 수준이었는데 이는 지온의 상승으로 인하여 응축기에서 발생한 열을 충분히 제거하지 못하게 되고, 또 이것은 히트펌프의 고압의 상승으로 이어져 소비전력이 상승하기 때문인 것으로 판단된다.

3. 냉방운전시 지온변화

밀폐식 지열히트펌프의 경우 지속적인 운전을 하게 되면 난방 시에는 지온의 감소가 냉방 시에는 지온의 상승이 일어난다. 이는 성능계수에 영향을 주게 되며, 지열히트펌프를 계속해서 운전할 수 없도록 하는 원인이 된다. 그러므로 직립정형(standing column well) 히트펌프의 경우 일정량의 물을 밖으로 분출시켜 지중과 관정 내 물의 열분위기를 환기시키는 작업을 하는데 이를 블리딩(bleeding)이라 한다. 그러나 밀폐식 지열히트펌프의 경우는 이와 같은 작업을 수행할 수 없다.

Fig. 5는 냉방운전시 지열교환기가 매립된 곳과 매립되지 않은 곳의 지온변화를 비교한 것이며 지중 60cm와 150cm는 지열교환기의 상, 하층 지온을 나타

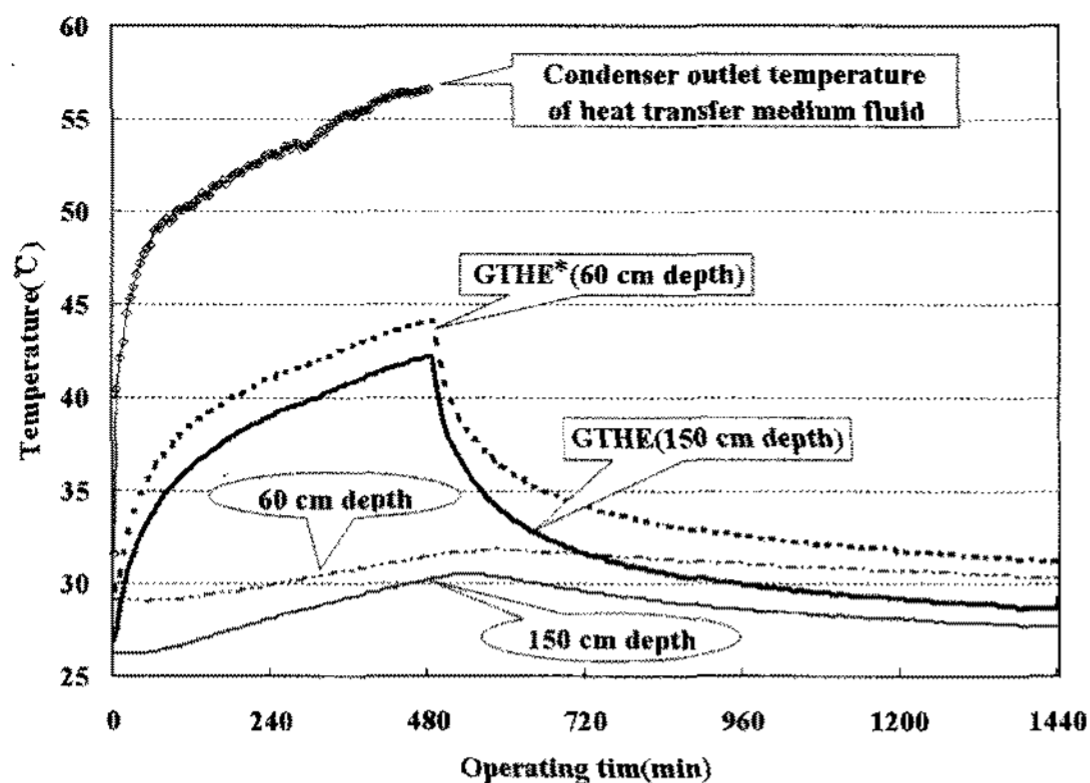


Fig. 5. Variation of soil temperature of points buried and not buried geothermal heat exchanger and condenser outlet temperature of heat transfer medium fluid.

* GTHE : GeoThermal Heat Exchanger.

Mark ∇ means point not buried geothermal heat exchanger.

낸다(Fig 1). 그림에서 보는 바와 같이 가동 8시간 후 지열교환기가 설치된 60cm 깊이의 지온은 29.8°C에서 44.1°C까지 14.3°C가 상승하였으며 150cm는 26.9°C에서 42.2°C까지 15.3°C가 상승하였다. 반면 지열교환기가 매설되지 않은 60cm 깊이는 2.4, 150cm 깊이는 4.3°C의 지온상승을 보였다. 또한 열매체유의 응축기 출구온도는 56.6°C까지 상승하였고, 이에 따라 소비전력이 커지면서 성능계수가 낮아지는 것으로 생각된다. 이를 해결하기 위해서는 응축기 출구와 지중 입구 사이에 또 다른 냉각용 열교환기를 설치하여 열매체유와 공기를 열교환시켜 열매체유의 온도를 하강시킨 후 지중에 투입하는 방법을 사용하는 것도 좋을 것으로 판단된다. 이 방법은 지열교환기로 들어가는 관로의 길이를 증가시키는 결과가 되며, 이에 따라 물펌프의 소비전력이 증가할 것으로 판단된다. 또한 공기와 열매체유의 열교환을 일으키기 위한 팬을 부착하게 되므로 이에 따른 소비전력 증가로 전체 시스템의 소비전력이 증가하게 됨은 자명하다. 그러나 지열히트펌프가 소비하는 전체 전력의 대부분을 압축기가 소비하며 이에 비해 물펌프와 팬이 소비하는 전력은 미미하기 때문에 시스템의 전체 소비전력을 감소시키거나 운전시간을 증가시킬 수 있는 방법일 것으로 판단된다.

4. 지열교환기 및 팬코일 유닛의 입·출구 온도차 및 흡·방열량

Fig. 6은 히트펌프 가동시 지열교환기 및 팬코일 유

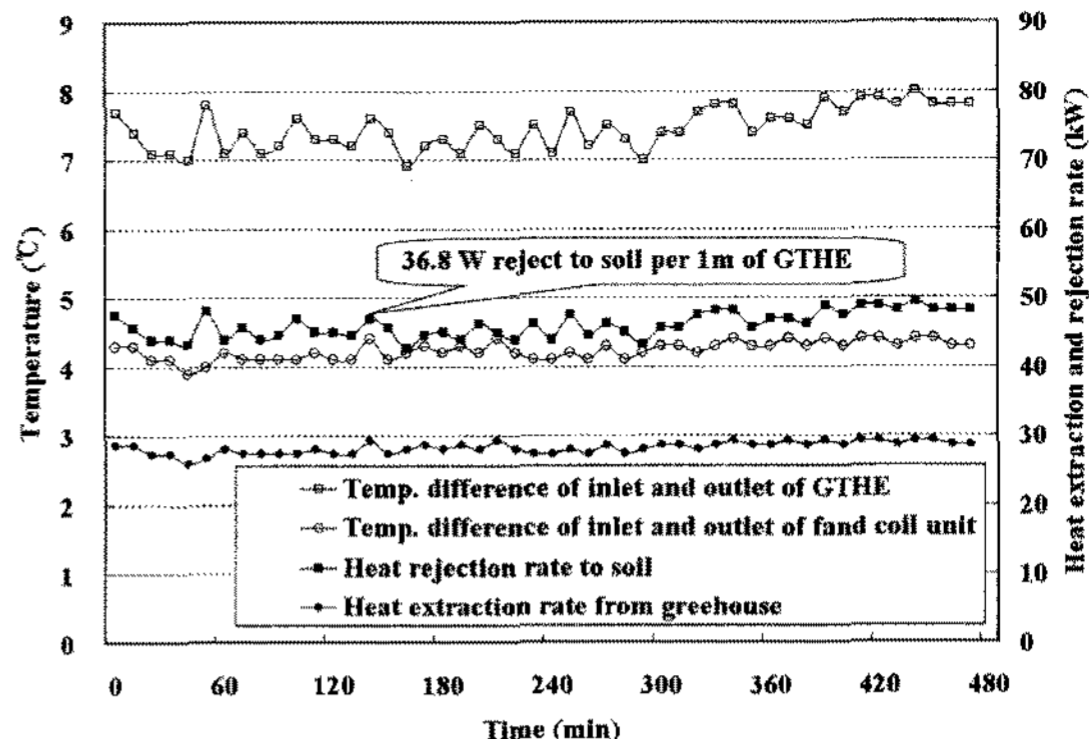


Fig. 6. Temperature difference of inlet and outlet of geothermal heat exchanger and fan coil unit and heat extraction and rejection rate.

닛에서의 열매체유 온도차 및 흡·방열량을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 열매체유가 지열교환기를 통과한 후 평균 7.5°C의 온도차가 하강하였으며, 그 편차는 1°C 수준으로 히트펌프를 가동하는 동안 거의 고른 편차를 보였다. 또한 175cm 깊이의 토양온도가 평균 27.5°C 수준에서 토양으로 방출하는 열량은 평균 46kW로 지중열교환기의 단위 길이 당 약 36.8W의 열량을 방출하는 것으로 분석되었다. 온실로부터 팬코일 유닛이 흡수하는 열량 즉, 냉방열량은 평균 28.2kW이었으며, 팬코일 유닛을 통과한 후 열매체유의 온도는 4.2°C 상승하였다. 이때 외기온은 25.4°C~31.0°C이었다.

5. 축열조의 축열량 및 방열량

Fig. 7은 냉방시 축열조의 축·방열 특성을 보여준다.

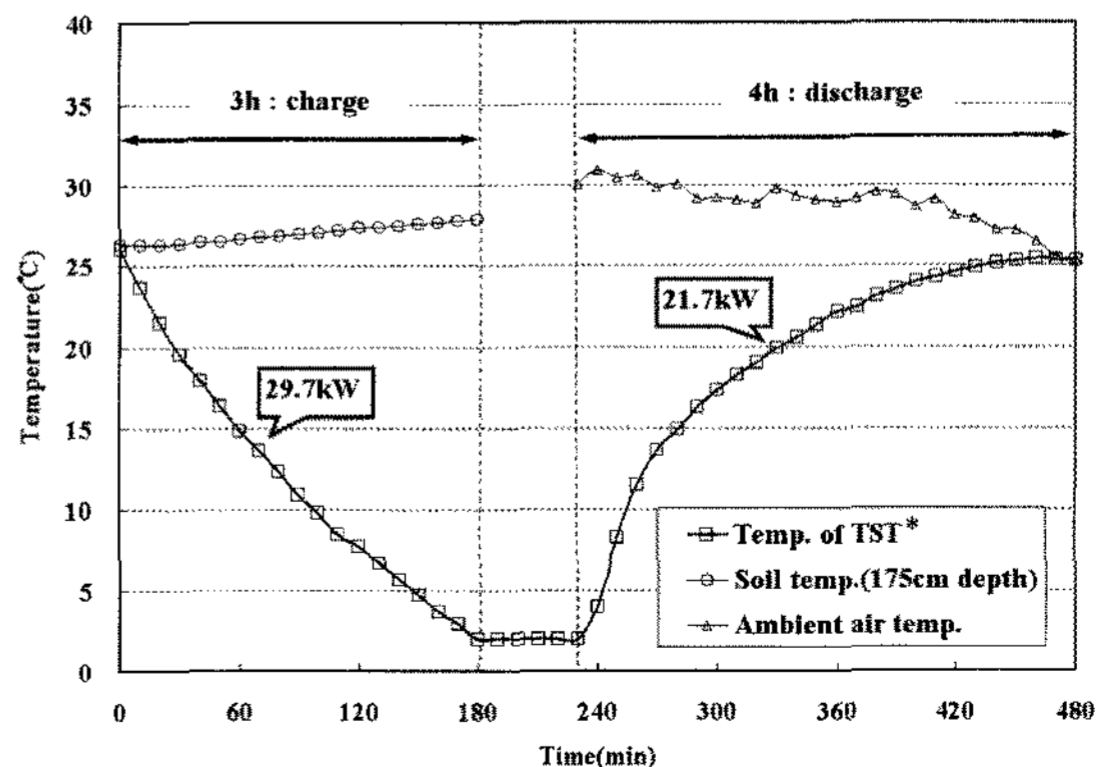


Fig. 7. Characteristics of thermal charge and discharge of thermal storage tank.

* TST : Thermal Storage Tank.

그림에 나타난 바와 같이 지열히트펌프시스템에 의해 축열조내 열전달매체유의 온도가 26.0°C에서 2.0°C까지 하강하는데 3시간이 소요되었으며, 거의 같은 온도 비율로 하강하였다. 이때의 평균 축열율은 29.7kW, 총 축열량은 321MJ이었다. 또한 축열조에 냉열을 축열하는 동안 깊이 1.75m의 지온은 26.3°C에서 27.9°C로 1.6°C 상승하였으며, 축열율 1kW당 지온은 0.06°C 상승하는 것으로 나타났다. 그리고 축열기간중의 평균 지온은 약 27.1°C로, Fig. 1에서와 비슷한 지온일 때의 축열량 28.3kW와 잘 일치한다.

2.0°C까지 냉열을 축열한 후 25.4°C까지 방열되는 시간은 외기온이 평균 28.5°C일 때 4시간이었으며, 방열중 총 313.0MJ의 에너지가 방열되었으며 평균 방열율은 21.7kW로 나타났다.

적 요

수직형에 비해 비교적 가격이 저렴하고 냉난방을 동시에 할 수 있는 농업시설에 적합한 10RT 규모의 수평형 지열히트펌프 시스템을 240m² 면적의 온실에 설치하고, 이 시스템의 냉방성능을 분석하였다.

응축기 출구온도가 40°C에서 58°C로 상승함에 따라 소비전력은 11.5kW에서 15kW로 상승하였으며, 고압이 1,617kPa에서 2,450kPa로 변화하였다. 냉방성능계수는 지중온도 25.5°C에서 2.7 수준이었으며 지온이 상승함에 따라 하강하여 33.5°C에서 2.0 수준이었다. 또한 온실 내부로부터 흡수하는 열량(냉방열량)은 같은 지중온도 수준에서 각각 28.8kW, 26.5kW이었다. 가동 8시간 후 지열교환기가 설치된 60cm 깊이의 지온은 14.3°C가 상승하였으며 150cm는 15.3°C가 상승하였다. 반면 지열교환기가 매설되지 않은 60cm 깊이는 2.4, 150cm 깊이는 4.3°C의 지온상승을 보였다. 열매체유가 지열교환기를 통과한 후 평균 7.5°C의 온도가 하강하였으며, 토양온도가 평균 27.5°C 수준에서 토양으로 방출하는 열량은 평균 46kW로 지중열교환기의 단위 길이 당 약 36.8W의 열량을 방출하는 것으로 분석되었다. 팬코일 유닛이 온실로부터 흡수하는 냉방열량은 평균 28.2kW이었으며, 열매체유의 온도는

4.2°C 상승하였다. 축열조내 열전달매체유의 온도가 26.0°C에서 2.0°C까지 하강하는데 3시간이 소요되었으며, 평균 축열율은 29.7kW, 총 축열량은 321MJ이었다. 또한 2.0°C까지 냉열을 축열한 후 25.4°C까지 방열되는 시간은 외기온이 평균 28.5°C일 때 4시간이었고, 총 313.0MJ의 에너지가 방열되었으며, 이때 평균 방열율은 21.7kW인 것으로 분석되었다.

주제어 : 냉방 성능 계수, 지열, 축열조, 온실히트펌프

인 용 문 헌

1. Cane, D., A. Morrison and K. Christopher. 1998. Operating experiences with commercial ground-source heat pump systems. ASHRAE.
2. Kavanaugh, S.P. and K. Rafferty. 1997. Ground-source heat pumps: Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings, ASHRAE.
3. Lee J.H., Y.B. Lee, J.K. Kwon, N.J. Kang, H.J. Kim, Y.H. Choi, J.M. Park, and H.C. Rhee. 2006. Effect of Greenhouse Cooling and Transplant Quality Using Geothermal Heat Pump System. Journal of Bio-Environment control 15(3):211-216 (In Korean).
4. Lee J.W. 1994. Effect of root zone warming by hot water in winter season on rhizosphere environment, growth and yield of greenhouse-grown cucumber (*cucumis sativus* L.). PhD diss., Kyungpook Nat'l Univ.:51-55 (In Korean).
5. Moon J.H., S.K. Lee, and D.K. Ko. 1999. Effect of root zone cooling in summer season on yield and quality. Report of national horticultural research institute:45-48 (In Korean).
6. Nam Y.I. 2000. Automatic system of hydroponic culture and production facility. Teaching material of R.D.A. 2000:10-15 (In Korean).
7. Ryu Y.S., J.T. Chang, Y.J. Kim, K.J. Lee, and J.H. Yun. 1999. Performance test of heat pump system for low temperature treatment of phalaenopsis. Conference of the Korean society of Bio-Environment Control 99:95-99 (In Korean).
8. Yu I.H., Y.I. Nam, T.Y. Kim, M.Y. Roh, and M.W. Cho. 2006. Effect of Newly Developed Fan and Mist Evaporative Cooling System on Greenhouse Cooling and Growth of Cucumber. Journal of Bio-Environment control 15(1):91-97 (In Korean).