

지열을 이용한 온실용 냉난방시스템 개발

이 용범¹⁾, 조 성인²⁾, 이재한³⁾, 김 태원⁴⁾

Development of a Cooling and Heating System for Greenhouse using Geothermal Energy

Yongbeom Lee, Seongin Cho, Jaehan Lee, Taewon Kim

Key words : Geothermal(지열), Greenhouse(온실), Heat pump(열펌프), Heat exchange system(열교환시스템), Computational fluid dynamics(전산유체해석)

Abstract : Importance of substitute energy has been increasing due to environmental issues and lack of fossil fuels. In addition, heating cost that occupies from 30 to 40% of the total production cost in Korean protected cultivation needs to be reduced for profitability and global competition. But, studying on substitute energy to solve these problems has not been activated for Korean protected cultivation. Therefore, this study was conducted to develop a geothermal heat pump system for cooling and heating of greenhouses at a lower cost than conventional hot air heater and air conditioner. Fundamental test of heat transfer characteristics in soil was conducted by computer simulation and controlled tests for its verification.

Based on the results of the theoretical and empirical investigations, an optimum heat pump system was developed and the performance was evaluated for practical use in a greenhouse at the Pusan Horticultural Experiment Station. The system was compared with a conventional hot air heating system through a cucumber growing test and economic feasibility analysis.

Results of the application test of the geothermal heat pump showed that with an initial setting of 15°C the inside temperature of the greenhouse could be maintained between 15 and 17°C. Results of the cucumber growing test showed that there were no significant differences in average height, leaf length, leaf width, number of nodes, leaf area, dry weight and yield between the plots with the geothermal heat pump system and a conventional hot air heater. Economic feasibility analysis indicated that the variable cost of the hot air heater could be saved 81.2% using the geothermal heat pump system. It was concluded that the geothermal heat pump system might be a pertinent heating and cooling system for greenhouses because of the low operating cost and the use of environment-friendly geothermal energy.

Nomenclature

A_g : surface area of greenhouse, m²
 A_s : floor area of greenhouse, m²
 h_f : heat transfer coefficient of greenhouse film, kcal/m² · hr · °C
 h_v : ventilation heat transfer coefficient, kcal/m² · hr °C
 T_o : Temperature in outside, °C
 T_i : Temperature in greenhouse, °C
 f_w : Wind velocity correction factor
 f_r : Energy saving rate by thermal curtain, %
 q_{soil} : Heat transfer quantity into soil, kcal/m² · hr

subscript

DMRT : duncan's multiple range test

1. 서론

지열은 농업분야에서 실용화가 가장 유망한 대체에너지 자원으로 평가되고 있다. 즉 이는 땅 속에 있는 열을 끌어내어 온실 등 농업용 시설의

- 1) 농촌진흥청 농업공학연구소
E-mail : beom@rda.go.kr
Tel : (031)290-1898 Fax : (031)290-1930
- 2) 서울대학교 농업생명과학대학
E-mail : sichoi@snu.ac.kr
Tel : (02)880-4616 Fax : (02)873-2285
- 3) 원예연구소 시설원예시험장
E-mail : lejank@rda.go.kr
Tel : (051)602-2132 Fax : (02)971-2024
- 4) TEN(주)
E-mail : pwkim@ten-i.com
Tel : (032)260-1261 Fax : (032)260-1260

냉난방 에너지로 이용하는 것으로 태양열, 풍력 등 다른 대체에너지에 비하여 초기투자비가 적게 들고 소규모 이용이 가능하며, 땅속에 매설되는 열교환시스템의 수명이 40~50년으로 반영구적이며 계절에 따라 변화가 적은 지속가능한 에너지라는 장점 때문이다. 그러나 이에 대한 체계적인 연구는 부족한 실정이며 금후 국제유가의 불안정과 화석에너지의 고갈에 대비한 대체에너지 개발 차원에서 이러한 연구는 앞으로는 가속화 될 것으로 판단된다.

그동안 부분적으로 수행되어 온 국내외의 유사연구를 살펴보면 일본의 高倉(6) 등은 지열을 이용하기 위한 파이프의 매설위치는 깊이 50 cm, 파이프간격 50~60 cm가 좋다고 제안하였으며, Puri(7,8)는 유한요소법을 이용 이론적으로 지열을 해석하여 단속운전시의 성능분석을 수행하였고 단속운전을 하면 열 재충전시간이 있기 때문에 유리하다고 하였다.

열교환시스템의 파이프 매설간격에 따른 열전달 특성에 대해 김홍제(3) 등은 경계밀착좌표계를 이용한 수치해석 결과 파이프의 매설간격이 좁을수록 지표면을 통한 열손실이 증가하여 지중 열교환 효율이 저하되므로 매설간격이 중요하다고 강조하였으며, 김영복(1,2) 등은 지중매설관을 통한 토양공기의 열교환을 통하여 열교환량, 열교환효율, 성능계수, 매설관적적경길이 등을 검토분석 하였다. 본 연구는 지속이용이 가능하고 환경친화적인 지열을 이용, 히트펌프를 구동하여 온실의 냉난방을 실시하는 시스템을 개발하고자 수행하였다. 먼저 지중토양의 열유동 기초 시험을 실시하여 열전과 특성과 토양의 온도변화 특성, 그리고 미가동사 토양온도 복원정도 등을 분석하여 최적 열교환시스템을 개발하고 이를 히트펌프와 연계하여 난방적용시험을 실시하였다. 본 지에서는 개발시스템을 온실에 직접 적용시험한 결과를 중심으로 기술하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 시험장소 및 매설토양의 상태

부산 소재 원예연구소 시설원예시험장 구내포장에 시스템을 설치하였다. 시험장소의 토성은 미사질 양토로 토성이 부드럽고 지하수위가 2.5m 여서 水源 또한 풍부하여 효율적인 열유동 효과를 기대할 수 있는 토양이었다. 토양의 함수율 및 토양성분의 분포는 표 1과 같다.

Table 1 State of the tested soil

Item	Depth 1m	2m	3m
Composition	sand 79%	sand 37%	sand 10%
	slit 18%	slit 54%	slit 72%
	clay 3%	clay 9%	clay 18%
Moisture(%)	38	51	63

2.2 시험온실

농가보급형 온실로 5.0m×6.0m의 90평형이며 작물은 오이를 대상으로 하였다. 먼저 온실이 설치될 자리에 열교환 시스템을 매설하고 그 위에 온실을 신축하였다.

대조구는 동일한 크기 및 규격으로 온풍기 가온구로 하였다. 그리고 냉난방 부하량은 난방의 경우 90평형 보온터널온실을 대상으로, 그리고 냉방은 동일온실에서 육묘베드상 재배를 대상으로 하여 낮에는 차광막 설치 및 환기로 냉방관리 하고 야간에만 지열 히트펌프 냉방을 실시하는 것으로 하였다. 부하량은 아래식을 이용, 난방 23,458kcal/h, 냉방19,278kcal/h로 산출하여 적용하였다.

$$Q_h = A_s \times [(h_s(1-f_s) + h_r)(T_i - T_o) + \frac{q_{soil}}{A_s}] \times f_w \quad [\text{kcal/h}] \quad (1)$$

2.3 지열-히트펌프시스템

시험장치는 그림 1에서 보는 바와 같이 먼저 지열을 받아들일 열교환시스템과 지열로 동작할 히트펌프, 저장탱크, 관련 배관시설 및 계측기기, 그리고 난방을 실시할 보온터널 온실 등으로 구성하였으며 전체 시스템의 주요 제원은 표 2와 같다.

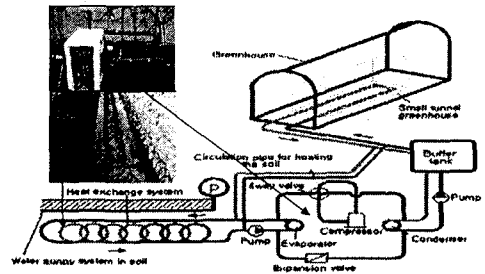


Fig. 1 Schematic of a geothermal heat pump system for cooling and heating of greenhouse

Table 2 Total specification of geothermal heat pump system

Item		Specification
Heat exchange system	Type	slinky + spiral
	Material	HDPE (high density PE)
	Pipe diameter	outside 27mm, inside 21
	Pipe Length	1,500m (slinky 1,000, spiral 500)
Heat pump	Compressor	7.5HP (Screw type)
	Condensor and Evaporator	0.051m ² /p, 66ea, total area 3,366m ² size 112 x 68.4 x 526mm
	Refrigerant	R22

3. 결과 및 고찰

3.1 지중 순환매체유의 입출구 온도

그림 2는 한달간 지속적인 난방시험을 실시한 결과 순환매체유의 입출구온도 변화를 나타낸 것이다. 한달간 외기온이 영하로 떨어지는 3.3~3.9일 사이의 날씨에서는 난방부하량이 증대하여 입출구 온도가 다소 낮게 형성되어 입구측 온도는 -1~3℃, 출구측 온도는 2~6℃로 나타났다. 하지만 3.10일 이후 최저기온이 영상권에서 머물렀던 시기에는 입구온도는 3~7℃, 출구온도는 6~10℃로 나타났다. 지중 순환매체유의 입출구의 온도는 외기온에 따라 온실의 난방 부하량에 영향을 받으므로 등락은 있지만 입구와 출구의 온도차 즉, 지열로부터 획득한 온도차는 3.2~3.4℃정도로 비교적 일정하게 유지되어 시스템을 안정적으로 운전할 수 있었다.

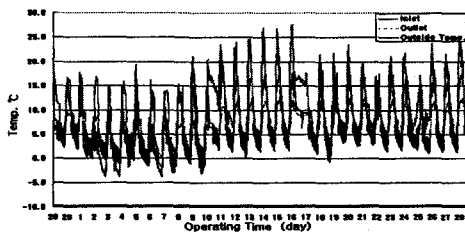


Fig.2 Temperature difference of between inlet and outlet pipe in soil

3.2 히트펌프 증발기에서의 입출구 온도 및 난방성능계수

그림 3은 증발기에서의 입출구 온도를 나타낸 것이다. 증발기의 입출구온도는 외기온에 따라 등락은 있었지만 입출구 온도차는 약 3.2℃전후로 비교적 일정하게 유지되어 시스템의 안정성에는 문제가 없었다.

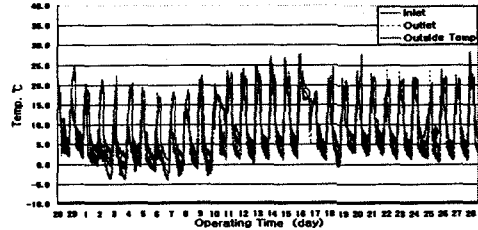


Fig.3 Temperature difference of between inlet and outlet of evaporator

이때의 열량을 기준으로 나프로(L'afnor)가 정의한 식에 의거 난방성능계수(COP_h)를 산정하였다. 그 결과 그림 4와 같이 성능계수는 지중토양의 온도에 따라 미소하게 변화하였다. 즉 3m깊이의 지중 토양온도가 5.6~7.3℃로 변화할 때 COP_h는 3.4~3.6으로 변화함을 알 수 있다. 따라서 난방성능계수를 향상시키기 위해서는 응축기에서 많은 열량을 확보할 수 있도록 충분한 지열의 확보가 필요하며 이는 연속가동에 따른 토양온도 강하를 방지함으로써 가능할 것이다.

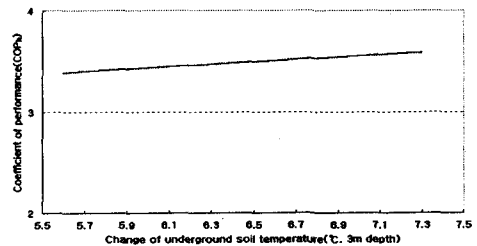


Fig.4 Comparison of the COPh and underground soil temperature

Table 3 Yield per plant (* DMRT 0.05)

Item	average weight (g)	marketable yield per plant		unmarketable yield per plant		total yield (g/plant)	marketable rate(%)
		number(ea)	weight(g)	number(ea)	weight(g)		
Geothermal heat pump	198a	8.1a	1,607a	1.4b	287b	1,894a	85.9
Hot air heater	194a	7.9a	1,525a	1.9a	363a	1,888a	80.7

3.3 터널온실의 내부온도

터널온실 내부의 온도를 15℃로 설정하고 시험한 결과 내부온도는 12~16℃ 정도로 유지됨을 알 수 있다. 외기온이 영하로 떨어지는 3.3~3.9 일중 3.3~3.6일에만 12~13℃까지 떨어지는 경우가 나타났으며 나머지 기간중에는 15~16℃를 유지하였다. 이는 터널 내부온도가 15℃이하로 떨어지면 히트펌프가 가동되어 난방순환유를 40℃까지 올라가 이 난방순환유가 순환하여 터널온도를 15℃로 유지하게 되는데 시간이 소요되어 초기 작동상태에서는 15℃보다 다소 낮게 나타난 것이다. 따라서, 3.7일 이후에는 난방설정 온도를 17℃로 설정하였으며 그 후에는 15~18℃로 비교적 높게 유지되었다.

3.4 작물의 생육

오이 정식 후 40일차에 고온성 작물인 오이를 대상으로 생육상황을 조사한 결과 초장, 엽장, 엽폭 마디수, 엽면적, 생체중, 건물중 등에서 가온방법간에 통계적인 유의성은 나타나지 않았다. 그리고 주당 수량이 있어서도 표 3과 같이 상품과 및 총수량은 가온방법간 통계적인 유의성은 나타나지 않았다. 다만 주당 비상품수량에 있어서는 과수 및 과중에서 지열 히트펌프시스템에서는 1.4개, 287g으로 나타난 반면 온풍 난방구에서는 1.9개, 363g으로 나타나 유의성이 인정되었다.

3.5 난방비용 비교

본 시스템의 경제성 분석을 1차적으로 난방만을 대상으로 그 경향을 분석하였다. 먼저 3.2~3.28일까지 27일간 비교 실측된 유동비를 비교 분석한 결과는 표 4와 같이 나타났다. 이는 유동비 절감 측면에서 81.2% 정도의 에너지 절감 효과가 나타난 것이다.

Table 4 Comparison of variable cost in heating

Item	energy consuming quantity		cost (won)
	electricity (kwh)	fuel (ℓ)	
Hot air heater	327	908	390,493
Geothermal	2,001	-	73,429

그리고 이를 근거로 300평 온실 기준으로 환산하고 초기투자비 등 고정비를 고려하여 경제성 분석을 실시한 결과(폭 21m, 길이 48m, 3연동) 온풍기 난방이 10,255천원/년, 지열히트펌프가 9,042천원으로 나타나 지열히트펌프가 11.8% 더 경제적인 것으로 나타났다. 그러나 난방가동시간은 지역 및 작목에 따라 달라지므로 연간 가동

시간을 기준으로 분석한 결과 그림 5와같이 연간 가동시간이 927시간 이상 사용하면 지열 히트펌프가 난방기보다 더 경제적인 것으로 나타났다.

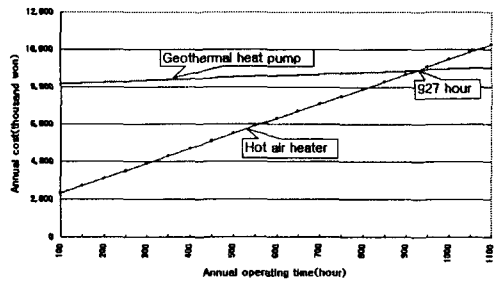


Fig.5 Cost comparison in geothermal heat pump and hot air heater

그러나 이는 본 지열 히트펌프 시스템을 냉방에 이용하는 것을 고려치 않은 것이므로 본 시스템을 냉방까지 이용할 경우 경제성은 훨씬 더 부각 될 것으로 판단된다. 또한 온풍기와 지열시스템의 초기투자비 차액과 누적운전비 차액을 기준으로 초기투자 회수기간을 산정한 결과 매년 투입되는 누적운전비의 차액은 7.6년 후부터는 초기투자비 차액을 초과하는 것으로 나타났다. 누적운전비는 유동비에 연간 자동적으로 투입되는 이자, 수리비, 감가상각비를 합산하여 산정하였다. 즉 8년이상 시설재배를 지속할 경우에는 지열 히트펌프시스템이 유리할 것으로 판단되었다.

4. 결론

본 연구는 개발한 지열히트시스템을 원예연구소 시설원예시험장의 작물재배온실에 직접 설치하여 성능 및 작물의 생육과 난방비용 등을 분석한 결과로 그 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 난방성능계수(COPh)는 지중 토양온도가 증가할수록 증가하여 지중온도가 5.6~7.3℃로 변화할 때 COPh는 3.4~3.6으로 나타났으며 히트펌프의 안정적인 에너지공급원으로서 지열이 적절한 것으로 판단되었다.

2. 보온터널 온실의 내부온도를 15℃로 유지하도록 설정하고 한달간 난방시험을 수행한 결과 15~17℃로 유지할 수 있어 난방시스템으로 아무런 문제가 없었다.

3. 고온성 작물인 오이를 대상으로 생육시험을 수행한 결과 초장, 엽장, 엽폭, 마디수, 엽면적, 생체중, 건물중 및 수량 등에서 온풍가온으로 재배한 시험구와의 통계적인 유의성은 나타나지 않았다.

4. 온풍기 가온구와의 난방유동비용에서는 81.2% 정도의 난방비용 절감효과가 있었으며 이를 기준으로 경제성 분석(300평 온실)을 한 결과

11.8%의 난방비 절감효과가 나타났다. 또 가동시간별로는 927시간/년 이상, 초기투자비를 기준으로 한 분석에서는 사용년수 7.6년 이후에는 경제성이 있는 것으로 나타났다.

References

[1] 김영복, 백이, 지중매설관 열교환장치의 성능분석(I). 한국농업기계학회지 1996;21(4):436-448
 [2] 김영복. 1996. 환경보전형 지열이용 시스템에 의한 생물생산 환경제어기술. NICEM 해외훈련결과보고서.
 [3] 김홍제, 이진국, 백남춘. 지중 열교환시스템의 파이프 매설 간격 변화에 따른 열전달 특성. 에너지연구 1990;12(3).

[4] 이재한. 2000. 지중열 교환시설의 실용화연구. 영남농업시험장 연구보고서.
 [5] 山本雄二郎, 青木清, 岡野利用. 1981. 地中熱交換ハウス基本設計. 電力中央研究所 研究報告
 [6] 高倉, 山川健一. 地中熱交換方式の暖房効果と運用上の問題點. 農業施設 1991;12: 41-47.
 [7] Puri, V. M. Feasibility and performance curves for intermittent earth-tube heat exchangers. Trans. of the ASAE 1986;29(2): 525-532.
 [8] Puri, V. M. Earth-tube heat exchanger performance correlation using boundary element method. Trans. of the ASAE 1987;30(2):514-520.