

히트펌프를 이용한 양액베드 냉난방시스템의 가온성능 분석

Performance analysis of the nutrient solution bed heating and cooling by heat pump system

| | | | |
|------------|------------|-----------|---------|
| 강금춘* | 유영선* | 김영중* | 백 이* |
| 정회원 | 정회원 | 정회원 | 정회원 |
| G. C. Kang | Y. S. Ryou | Y. J. Kim | Y. Paek |

1. 서론

1992년 이후 우리나라 원예시설 면적은 매년 크게 증가하여 '99년말 현재 51,232ha에 이르고 있으며, 그중 양액재배 면적은 '92년에는 17.4ha에 불과하였으나 연평균 68%씩 증가하여 '99년에는 648ha에 이르렀다. 이들 양액재배 면적 중 채소류가 73%, 화훼류가 27%를 차지하고 있으며, 작물별로는 토마토가 29%로써 가장 많은 면적이 재배되고 있고, 그 다음으로 장미가 25%를 차지하고 있다. 또한 사용하는 배지별 양액재배 비율은 펄라이트 배지가 289ha로 전체면적의 50%를 차지하고 있으며, 암면배지가 39%를 차지하고 있다(농림부, 1999).

시설재배에 있어서 온도는 작물의 생육과 수량을 좌우하기 때문에 가장 중요한 환경요인 중 하나이며, 기온관리 뿐만 아니라 지온관리도 작물 뿌리의 신장, 뿌리군의 형성에 직접적인 영향을 미치며 양수분의 흡수에 관여하고 토양미생물의 활동에도 영향을 미치기 때문에 작물 재배관리상 매우 중요하다(남, 2000).

작물 뿌리부 가온에 따른 과채류의 증수효과는 무가온에 비하여 오이 41%, 피망 90%, 토마토 5%로 나타났으며(원예연, 1994), 오이의 경우 수량은 3~6월이 가장 많고 그 다음이 9~11월로서 여름과 겨울이 적는데 특히 7~8월에 가장 적다고 하였다. 이는 오이가 내서성이 약하여 기온 30℃ 이상에서는 꽃가루 형성불량, 단위결과율 저하, 착과장해를 보여 수량이 현저히 저하되기 때문이라고 한다(이, 1994, 이, 1996).

양액재배시 근권부를 냉각처리 함으로써 여름철에 오이의 수량을 온성백다다기의 경우 26%, 경성여름은 45% 증가시킬 수 있었으며 이때 근권부의 온도를 20℃ 내외로 유지시켜 주는 것이 좋다고 하였다(문, 2000).

따라서 본 연구에서는 자연에너지를 이용하여 저렴한 가격으로 작물 뿌리부의 냉난방을 할 수 있는 히트펌프식 양액베드 냉각 및 가온 시스템을 개발하고자 하였으며, 가온성능을 분석한 결과는 다음과 같다.

* 농촌진흥청 농업기계화연구소

2. 재료 및 방법

가. 양액베드 냉각 및 가온에 필요한 열량 산정

양액베드의 냉난방에 필요한 열량을 산정하기 위하여 열평형방정식을 세웠다. 열평형방정식에서는 그림 1에서와 같이 베드와 온실 지표면과의 전도에 의한 열손실은 단열재질의 베드를 사용할 경우 무시하고 베드 표면과 온실공간과의 대류와 온실 내부표면과의 복사 열전달만을 고려하였는데 각각의 식(1), (2), (3)과 같이 수식화 되었다.

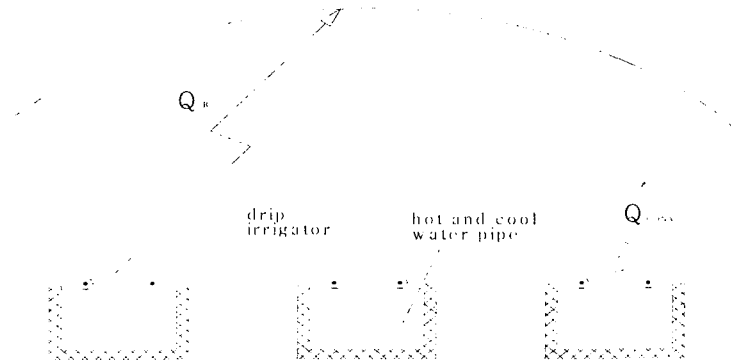


Fig 1. Heat transfer of the nutrient solution bed in greenhouse.

$$Q = Q_{conv} + Q_R \quad \text{-----(1)}$$

$$Q_{conv} = hA_b(T_b - T_i) \quad \text{-----(2)}$$

여기서 h : 대류열전달계수(kcal/m² · h · K)

A_b : 양액베드 상면적(m²)

T_b : 양액베드 표면온도(K)

T_i : 하우스 내부온도(K)

$$Q_R = \frac{\sigma (T_b^4 - T_c^4)}{\frac{1-\epsilon_b}{\epsilon_b A_b} + \frac{1}{A_b F_{b-c}} + \frac{1-\epsilon_c}{\epsilon_c A_c}} \quad \text{-----(3)}$$

여기서 σ : 스테판볼츠만상수(kcal/m² · hr · K)

ϵ_b : 양액베드 표면 방사율

ϵ_c : 하우스 내부표면 방사율

F_{b-c} : 양액베드 표면과 하우스 표면과의 형상계수

A_b : 양액베드 상면적(m²)

A_c : 하우스 표면적(m²)

T_b : 양액베드 표면온도(K)

T_c : 하우스 표면온도(K)

나. 히트펌프를 이용한 양액베드 냉각 및 가온 시스템 설계제작

그림 2는 공기-물방식의 히트펌프를 이용한 양액베드 냉각 및 가온시스템으로써 압축기, 증발기, 응축기, 팽창밸브, 사방밸브, 물탱크 및 펌프 등으로 구성되어 있으며, 압축기는 냉난방 부하를 고려하여 용량 5HP의 것을 사용하였다. 증발기는 셸-튜브형으로 Ø12.7mm의 구리 파이프를 병렬 연결하여 공기와 강제 열교환이 이루어지도록 하였으며, 응축기는 이중관형으로 Ø40mm의 스테인레스 파이프 내부에 Ø12.7mm의 구리 파이프가 삽입된 형태로 내부 파이프로 냉매가 흐를 때 외부파이프에는 물이 흘러 물이 열을 흡수하거나 방열하는 구조로 제작하였다. 사방밸브를 사용하여 냉·난방으로 전환하여 사용할 수 있도록 하였으며, 응축기에 설치된 물펌프 및 증발기에 설치된 팬의 정격소비전력은 각각 0.3kW, 0.7kW 이었다. 표 1은 히트펌프의 형식과 제원을 나타낸 것이다.

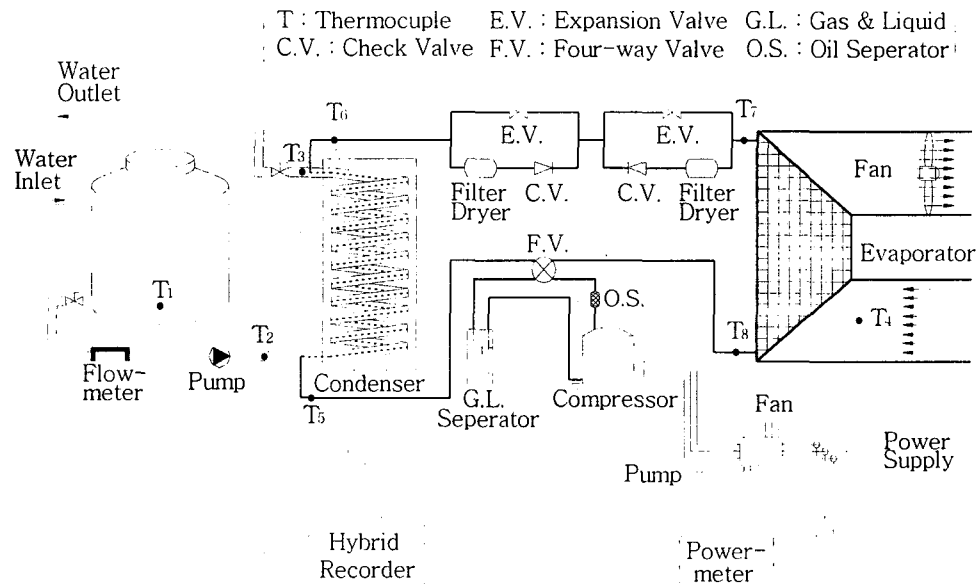


Fig 2. Nutrient solution bed heating and cooling by the heat pump system.

Table 1 Specifications of each component in the heat pump system

| component | | type and dimension |
|----------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| type | | air-water heating and cooling system |
| dimension(L × W × H) | | 1,500 × 650 × 1,200mm |
| refrigerant medium | | R22 |
| compressor | | 5HP |
| evaporator | type | shell-tube |
| | surface area of tube | 3.05m ² |
| | air flow rate of fan | 60m ³ /min |
| condenser | type | double tube |
| | surface area of tube | 0.6m ² |
| | water flow rate of pump | 25 l/min |

다. 히트펌프 냉난방 성능시험

히트펌프 시스템의 가온성능을 측정하기 위하여 그림 2에 나타난 바와 같이 물탱크와 응축기의 입·출구부 및 증발기 입·출구부에 온도센서(T-type thermocouple)를 설치하여 온도기록계(Hybrid recorder DR-230, YOKOGAWA, Japan)로 연속 측정하여 열회수량을 산출하였다. 응축기 내부로 흐르는 물의 유량은 초음파유량계(Flow meter PT868, PANAMETRIX, USA)를 이용하여 측정하였으며, 소비전력량은 전력량계(Clamp on power hitester 3166, HIOKI, Japan)를 이용하였다.

응축기 내부를 흐르는 물의 순환량은 유량조절 밸브에 의해 600~1,500 l/h의 범위에서 4 수준으로 설정하였으며, 겨울철 히트펌프를 온실내에서 사용하기 위한 조건을 고려하여 공기온도가 10, 15, 20℃ 일 때 가온성능을 시험하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 양액베드 냉각 및 가온에 필요한 열량

양액베드의 냉각 및 가온시 필요한 열량은 근권부 온도, 외기온 및 하우스의 온도조건이 표 1과 같을 때 냉각시 108 kcal/hr·m², 가온시 83 kcal/hr·m²로 산정되었으며, 냉각에 필요한 열량이 가온시 보다 약 30% 더 많게 나타났다.

Table 1 Temperature settings of the nutrient solution bed heating and cooling system

| condition | cooling | heating |
|-----------------------|---------|---------|
| root zone(℃) | 20 | 20 |
| ambient(℃) | 30 | -10 |
| greenhouse indoor(℃) | 40 | 10 |
| greenhouse surface(℃) | 35 | 0 |

나. 유량에 따른 응축기 방열량

공기온도가 10~20℃ 일 때 응축기를 순환하는 물의 유량에 따른 방열량은 그림 3에서 보는 바와 같다. 응축기를 흐르는 물의 유량이 증가함에 따라 방열량의 변화는 크지 않았으나, 공기온도가 10℃ 일 때는 약 14,000kcal/h 열량을 얻었고 20℃ 일 때는 약 16,000kcal/h 열량이 방열되어 공기온도가 높을수록 방열량이 많은 것으로 나타났다. 이는 증발기에서 냉매가 상변화하는 과정에서 공기와의 온도차가 클 수록 흡수되는 증발잠열이 커지기 때문인 것으로 판단된다.

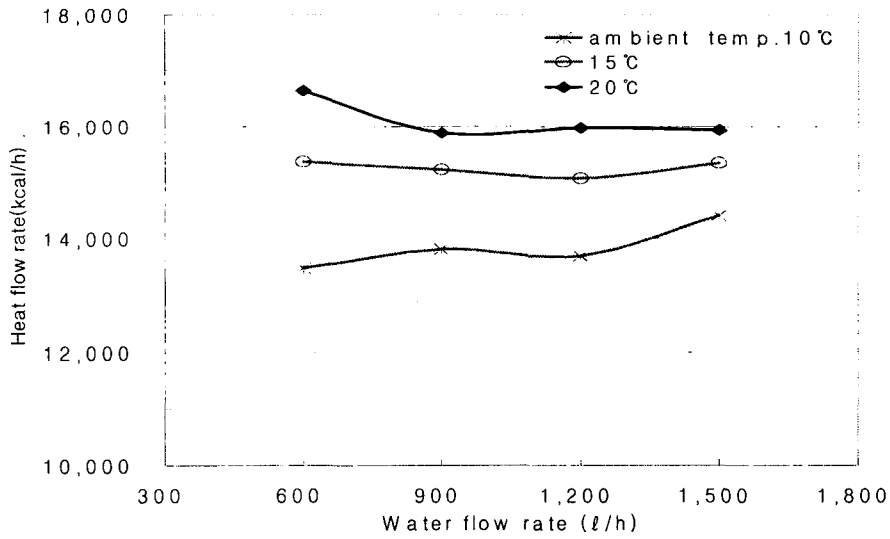


Fig 3. Heat transfer rates by the water flow rate.

다. 유량에 따른 히트펌프의 소비전력

그림 4는 공기온도가 10, 15, 20°C 일 때 응축기를 순환하는 물의 유량에 따른 히트펌프의 소비전력을 나타낸 것이다. 공기온도가 10°C이고 응축기를 흐르는 유량이 600 l/h일 때 물 펌프 및 팬을 포함한 히트펌프에 소비되는 총 전력은 약 5.9kW 이었으며, 1,500 l/h일 때는 약 5.4kW가 소비되어 유량이 클수록 전력이 적게 소비되는 것으로 나타났다. 공기온도가 15°C 및 20°C일 때도 같은 경향으로 나타났으며, 공기온도에 따른 소비전력은 공기온도가 높을수록 전력이 많이 소요되는 경향으로 나타났다.

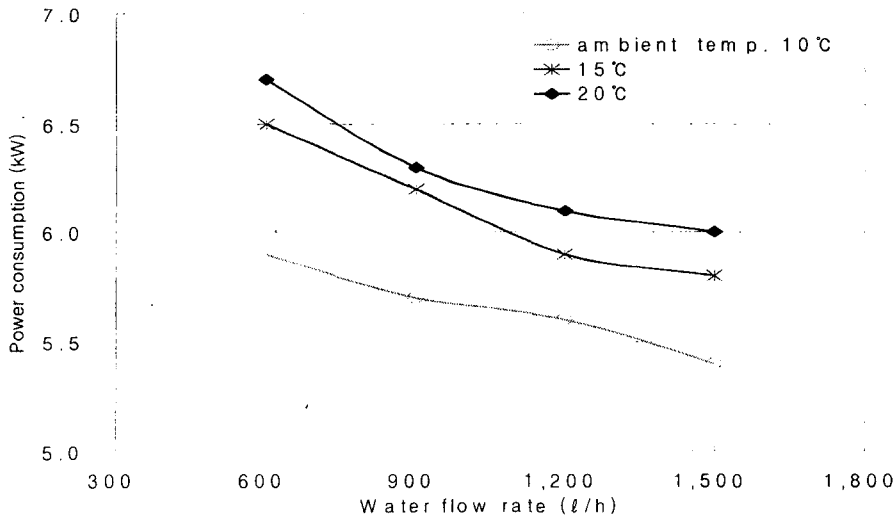


Fig 4. Variation of power consumption by the water flow rate.

라. 공기온도별 히트펌프의 가온성능

응축기를 통과하는 물의 순환유량이 600 l/hr에서 1,500 l/hr로 많아질 때 공기온도에 따른 히트펌프 전체의 가온 성능계수(COP)를 그림 5에 나타내었다. 공기온도가 20℃이고 유량이 600 l/hr 일 때 성능계수는 2.89로 나타났으나 유량이 1,500 l/hr로 증가함에 따라 성능계수는 3.12로 높아졌다. 공기온도가 15℃ 및 10℃에서도 같은 경향으로 유량이 증가할수록 성능계수도 높게 나타났다. 한편, 공기온도가 10℃에서 20℃의 범위에서는 공기온도가 낮을수록 가온 성능계수도 낮아지는 경향으로 나타났다.

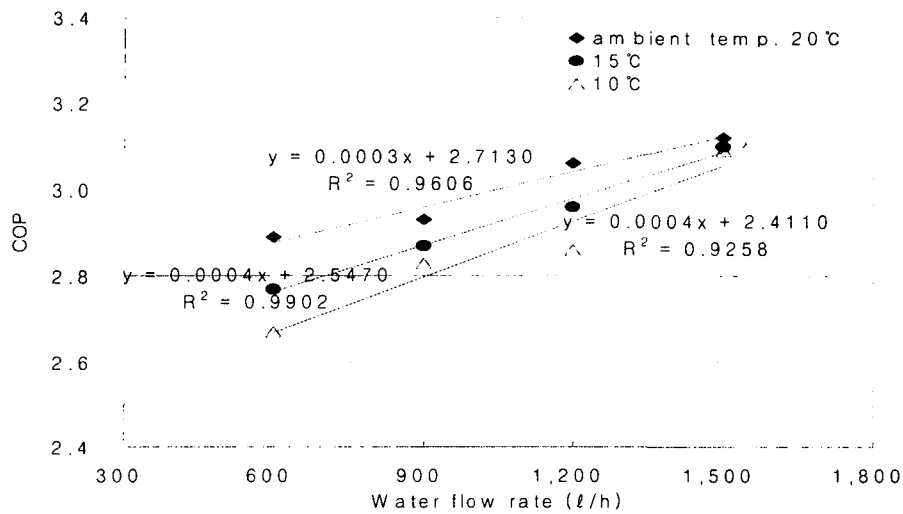


Fig 5. COP variation of the heat pump by the ambient temperature.

4. 요약 및 결론

양액재배 작물의 근권부 온도를 적정온도로 유지시켜 주기 위하여 공기-물방식의 히트펌프를 이용한 양액베드의 냉각 및 가온시스템을 개발하여 가온성능을 시험한 결과는 다음과 같다.

가. 양액베드 냉각 및 가온에 필요한 열량 산정을 위하여 지배방정식을 정립하였으며, 산정한 결과 냉각시는 108kcal/hr · m², 가온시는 83kcal/hr · m²의 열량이 각각 요구되었다.

나. 양액베드의 냉각 및 가온을 위하여 5HP 용량의 공기-물방식 히트펌프를 설계 제작하였으며 냉매는 R22를 사용하였다.

다. 응축기를 흐르는 유량이 증가함에 따라 방열량의 변화는 크지 않았으나, 공기온도가 10℃일 때는 약 14,000kcal/h, 20℃일 때는 약 16,000kcal/h 열량이 방열되어 공기온도가 높을수록 방열량이 많은 것으로 나타났다.

라. 히트펌프에 소비되는 총 전력은 공기온도가 10℃이고 유량이 600 l/hr 일 때 5.9kW, 1,500 l/hr일 때는 약 5.4kW가 소비되어 유량이 클수록 전력이 적게 소비되는 것으로 나타났으며, 공기온도에 따른 소비전력은 공기온도가 높을수록 전력이 많이 소요되는 것으로 나타났다.

마. 공기온도가 20℃이고 유량이 600 l/hr일 때 가온 성능계수는 2.89로 나타났으며, 유량이 1,500 l/hr로 증가함에 따라 성능계수는 3.12로 높아졌다.

5. 참고문헌

1. 문지혜, 이상규, 고관달. 1999. 하계 오이재배시 근권 냉각처리가 수량 및 품질에 미치는 영향. 원예연구소 농사시험사업연구보고서
2. 손정익. 1999. NFT, DFT 및 고품배지 시스템의 근권부 위치별 온도변화 분석. 한국원예학회지. 40(1) pp.4-8.
3. 이재한, 권오근, 최영하, 박동금, 권준국. 1999. 고온기 근권 냉방방식에 따른 냉방효율과 토마토 생육에 미치는 영향. 한국생물환경조절학회지 8(2) pp. 130-133.
4. 岡野利明. 1999. 農業におけるヒートポンプと蓄熱利用の實際. 社団法人 農業電化協會.