

열펌프를 이용한 양액베드 냉난방시스템 개발

Development of Heating and Cooling System with Heat Pump for Nutrient Solution Bed in Greenhouse

강금춘	김영중	유영선	백 이
정희원	정희원	정희원	정희원
G. C. Kang	Y. J. Kim	Y. S. Ryou	Y. Paek

ABSTRACT

In order to control the root-zone temperature of greenhouse crops in the hydroponics at hot and cold season, heat pump system for cooling and heating was built and tested in this work.

The system was air-to-water type and vapour compression type. The heating and cooling mode was selected by the four way valve. Capacity of the compressor was 3.75kW and heat transfer area of the evaporator and the condenser were 3.05m² and 0.6m², respectively.

According to the performance test, it could supply heat of 42,360 to 64,372kJ/h depending on the water circulation rate of 600 to 1,500 l/h, respectively, when indoor air temperature was 10~20°C. COP of heat pump system was 3.0 to 4.0 in the heating mode. But, COP of the cooling mode was 1.3 to 2.1 at indoor temperature of 20~35°C.

The feasibility test in the greenhouse the developed heating and cooling system was installed, showed that the heating cost of the developed system was only about 13% of that of the conventional heating system. The heating cost of the developed system was 367won/day(electric consumption 9.75kWh/day), while that of the conventional system was 2,803won/day(oil consumption 7.7 l/day) at the same heating mode.

Keywords : Greenhouse, Hydroponics, Heating & cooling of bed, Heat pump.

1. 서 론

1992년 이후 우리 나라 시설원예 면적은 매년 크게 증가하여 2000년말 현재 48,853ha에 이르고 있으며(농림부, 2001), 그중 양액재배 면적은 '92년에는 13.2ha에 불과하였으나 연평균 64%씩 증가하여 2000년에는 700ha에 이르렀다. 이들 양액재배

면적 중 채소류가 70%, 화훼류가 30%를 차지하고 있으며, 작물별로는 토마토가 37%로써 가장 많은 면적이 재배되고 있고, 그 다음으로 장미가 25%를 차지하고 있다. 또한 사용하는 배지별 양액재배 비율은 펠라이트 배지가 319ha로 전체면적의 46%를 차지하고 있으며, 압면배지가 26%, 혼합배지가 17%를 차지하고 있다(농촌진흥청, 2001).

This article was submitted for publication in June 2002; reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in August 2002. The authors are G. C. Kang, Y. J. Kim, Y. S. Ryou, Y. Paek, Researcher, National Agricultural Mechanization Research Institute, Rural Development Administration, Suwon, Korea.

The corresponding author is G. C. Kang, Researcher, Div. of Fundamental Engineering and Technology, National Agricultural Mechanization Research Institute, 441-100, Suwon, Korea. Fax: +82-31-290-1890. E-mail: <kanggch@rda.go.kr>.

시설재배에 있어서 온도관리는 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 가운데 따른 과채류의 증수효과는 무가온에 비하여 오이 41%, 피망 90%, 토마토 5%로 나타났으며, 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, 단위결과를 저하, 착과장해를 보여 수량이 현저히 저하되기 때문이라고 한다(이, 1994).

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

따라서 본 연구에서는 자연에너지를 이용하여 저렴한 가격으로 작물 뿌리부의 냉난방을 동시에 할 수 있는 열펌프식 양액베드 냉난방 시스템을 개발하고자 하였으며, 냉난방성능을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

가. 양액베드 냉난방에 필요한 열량 산정

플라이트를 양액배지로 이용하는 양액베드의 냉난방에 필요한 열량을 산정하기 위하여 대류 및 복사열전달 평형방정식을 이용하였다(서, 1990). 열평형 방정식에서는 그림 1에서 보는 바와 같이 베드와 온실 지표면과의 전도에 의한 열손실은 단열재질 베드의 사용으로 무시하고 베드 표면과 온실공간과의 대류와 온실 내부표면과의 복사 열전달만을 고려하였으며, 각각 식(1), (2), (3)과 같다.

여기서 농촌진흥청 1-2W형 모델의 온실을 기준으로 표 2의 온도조건을 고려하여 계산하였으며, 피복 내표면과 온실상면 사이의 자연대류로 인한 대류열전달계수는 $12.6\text{kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{℃}$, 방사율은 0.9

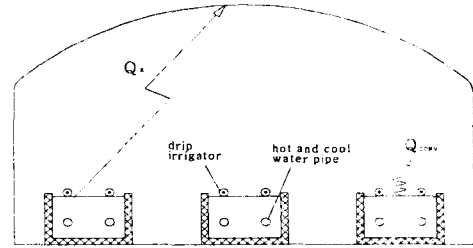


Fig. 1 Heat transfer of the nutrient solution bed in greenhouse.

$$Q = Q_{conv} + Q_R \dots\dots\dots (1)$$

$$Q_{conv} = h A_b (T_b - T_i) \dots\dots\dots (2)$$

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

여기서

- Q : heating load(kJ/h)
- Q_{conv} : heat loss by convection heat transfer(kJ/h)
- Q_R : heat loss by radiation heat transfer(kJ/h)
- h : convection heat transfer coefficient
($\text{kJ} / \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{℃}$)
- A_b : bed upside area(m^2)
- A_c : greenhouse surface area(m^2)
- T_b : bed surface temperature(K)
- T_i : greenhouse inner temperature(K)
- T_c : greenhouse surface temperature(K)
- σ : Stefan-Boltzmann constant($\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4$)
- ϵ_b : bed surface emissivity
- ϵ_c : greenhouse inner surface emissivity
- F_{b-c} : radiation shape factor of between the bed and greenhouse

를 사용하였고 복사 형태계수는 온실상면적에 대한 온실표면적의 비인 보온비를 계산하여 산출한 0.7을 사용하였다(송 등, 1993).

나. 열펌프를 이용한 양액베드 냉난방시스템 설계제작

그림 2는 공기-물방식의 열펌프를 이용한 양액베드 냉난방시스템으로써 압축기, 증발기, 응축기,

열펌프를 이용한 양액베드 냉난방시스템 개발

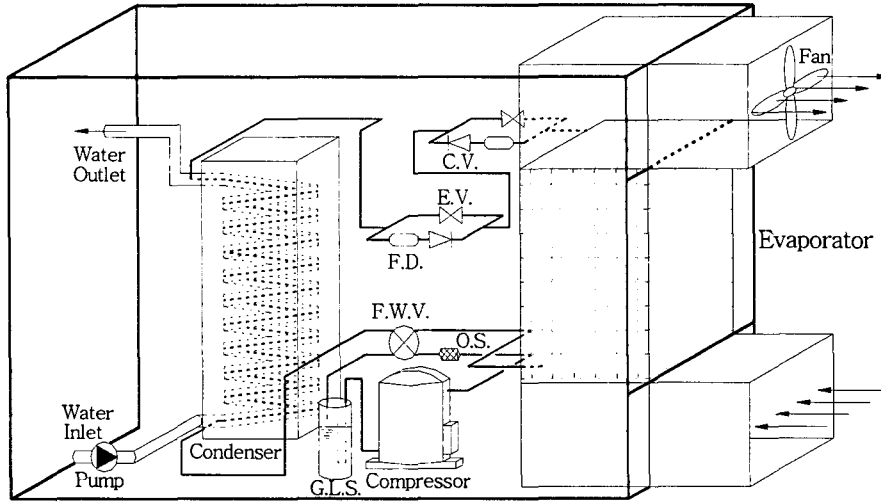


Fig. 2 Nutrient solution bed heating and cooling system by the heat pump.

팽창밸브, 사방밸브, 물탱크 및 펌프 등으로 구성 되어 있다. 식(1)에 의하여 산출된 냉방부하를 50m²의 베드에 적용하면 총 소요에너지는 22,550 kJ/h가 되며, 3.75kW 압축기를 사용하면 열펌프의 COP를 2라 할 때 열펌프의 냉방출력은 27,090kJ/h로서 냉방부하를 초과하므로 적절한 용량이라고 판단되었다. 증발기는 셸-튜브형으로 ϕ 12.7mm의 구리 파이프를 병렬 연결하여 공기와 강제 열교환이 이루어지도록 하였으며, 응축기는 이중관형으

로 ϕ 40mm의 스테인레스 파이프 내부에 ϕ 12.7 mm의 구리 파이프가 삽입된 형태로 내부 파이프 로 냉매가 흐를 때 외부파이프에는 물이 흘러 물 이 열을 흡수하거나 방열하는 구조로 제작하였다. 사방밸브를 사용하여 냉·난방으로 전환하여 사용 할 수 있도록 하였으며, 응축기에 설치된 물펌프 및 증발기에 설치된 팬의 정격소비전력은 각각 0.3kW, 0.7kW 이었다. 표 1은 열펌프의 형식과 제 원을 나타낸 것이다.

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		R ₂₂
compressor		3.75kW
evaporator	type	shell-tube
	surface area of tube	3.05m ²
	air flow rate of fan	3,600m ³ /h
condenser	type	double tube
	surface area of tube	0.6m ²
	water flow rate of pump	1,500 ℓ/h

다. 열펌프 냉난방 성능시험

열펌프 시스템의 냉난방성능을 측정하기 위하여 그림 3에 나타낸 바와 같이 물탱크와 응축기의 입·출구부 및 증발기 입·출구부에 각각 온도센서(T-type thermocouple)를 설치하였으며, 온도기록계(Hybrid recorder DR-230, YOKOGAWA, Japan)를 이용 1분 간격으로 연속 측정하여 열회수량을 산출하였다. 응축기 내부로 흐르는 물의 유량은 초음파유량계(Flow meter PT868, PANAMETRIX, USA)를 이용하였고, 소비전력은 전력량계(Clamp on power hitester 3166, HIOKI, Japan)를 이용하여 측정하였다.

응축기 내부로 흐르는 물의 순환량은 유량조절 밸브에 의해 600~1,500 l/h의 범위에서 4수준으로 설정하였으며, 온실 내에서의 사용온도 조건을 고려하여 난방시험은 공기온도 10~20℃ 범위의 3수준으로, 냉방시험은 20~35℃ 범위의 4수준으로 하여 수행하였다.

열회수량은 응축기 입출구에서의 물의 온도차와 순환량을 가지고 식 (4)와 같이 계산할 수 있으며 (靑木, 1993), 열펌프의 냉난방 성능계수는 응축기에

서 토출되는 물이 잃거나 얻은 열량과 압축기에서 소비한 전력의 비로서 식 (5)로 표시할 수 있다.

$$Q_w = \dot{m}_w \times c_{pw} \times \Delta T_w \dots\dots\dots (4)$$

$$COP = \frac{Q_w}{L \times 860 \times 4.2} \dots\dots\dots (5)$$

여기서

COP : coefficient of performance

Q_w : heat gain from the water condenser(kJ/h)

L : power consumption(kW)

\dot{m}_w : water mass flow rate(kg/h)

c_{pw} : specific heat of water(kJ/kg · °C)

ΔT_w : temperature gained and loss by water in the condenser(°C)

라. 현장적응 시험

본 연구에서 개발한 열펌프를 이용한 양액베드 냉난방시스템의 현장 적응성을 평가하기 위하여 냉방시험은 2001년 8월 31일, 난방시험은 2002년 1월 28일부터 2월 1일까지 충남 부여의 상면적

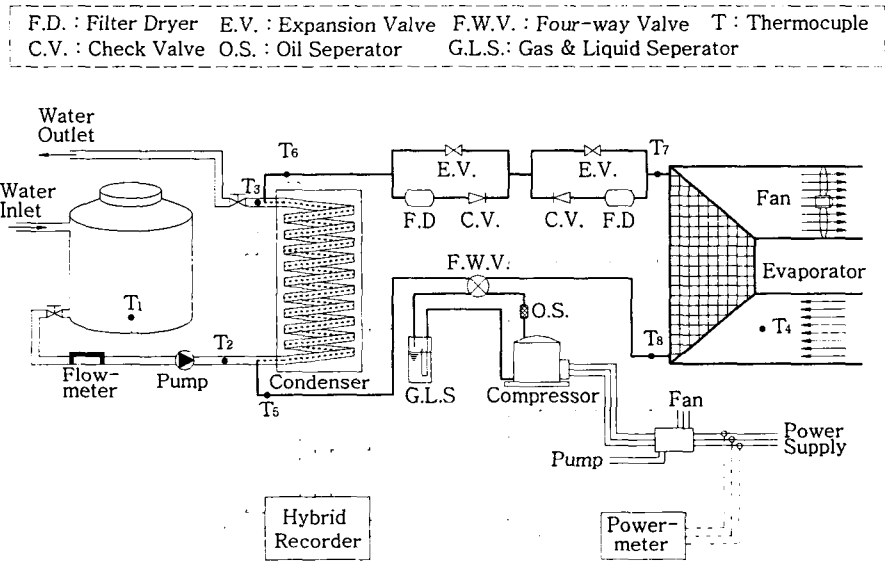


Fig. 3 Measuring points of temperature and water flow rate in the test set-up.

323m²인 유리온실에서 수행하였다. 공시온실은 철골조 양지붕형 유리온실로서 내부에 501,600kJ/h 용량의 온풍기와 50,106kJ/h 용량의 양액베드 난방용 온수보일러 및 양액자동공급장치가 설치되어 있었으며, 필라이트 배지를 이용하여 하계에는 메론, 동계에는 고추를 양액재배 하였다.

온실내부에 열펌프를 설치하고 토출수 배관을 양액베드 난방용 배관과 연결하였으며, 열펌프의 온도감지용 센서를 베드 깊이 2/3 지점에 매설하여 설정온도와의 온도차에 의하여 열펌프가 ON, OFF 되도록 하였다. 열펌프가 가동될 때 토출되는 냉수 또는 온수는 펌프에 의해 양액베드 하단의 배관 내부를 순환하여 양액베드가 냉방 또는 난방이 되도록 하였다.

온실 외기온에 따른 실내기온, 베드온도, 열펌프 응축기 입·출구에서의 물온도 경시변화 및 소비전력을 측정하였으며, 동계 난방에너지 비교시험을 위하여 동일면적 온실의 양액베드용 온수보일러 연료공급 파이프에 미소유량계(FMT86, Flow-metrics, USA)를 설치하여 1일 연료소모량 및 소비전력을 비교 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 양액베드 냉난방에 필요한 열량

필라이트를 양액배지로 이용하는 양액베드의 냉난방에 필요한 열량은 근권부 온도, 외기온 및 하우스의 온도조건이 표 2와 같을 때 냉방시 451 kJ/h · m², 난방시 347kJ/h · m²로 산정되어 냉방시

Table 2 Temperature conditions for the nutrient solution bed heating and cooling system

Condition	Cooling	Heating
Root zone(°C)	20	20
Ambient(°C)	30	-10
Greenhouse indoor(°C)	40	10
Greenhouse surface(°C)	35	0

필요한 열량이 난방시에 비하여 약 1.3배 더 많은 것으로 나타났으며, 이는 근권부 온도와 온실내의 온도차가 여름철이 겨울철에 비하여 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단되었다.

나. 열펌프 냉난방 성능시험

(1) 유량에 따른 외기온별 열펌프의 난방 COP 변화

응축기를 흐르는 열전달 매체인 물의 순환유량이 600~1,500 l/h로 증가함에 따라 외기온 변화가 열펌프 난방 COP에 미치는 영향을 그림 4에 나타내었다. 유량이 600~1,500 l/h로 변할 때 COP는 3.0~4.0 수준으로 변하고 있음을 보여주고 있으며, 같은 외기온에서는 대부분 유량이 많을수록 COP가 높게 됨을 알 수 있었다. 이때 압축기에 투입된 전기에너지는 12,122~17,974kJ/h 이었고 응축기에서 방출되는 방열량은 42,360~64,372kJ/h 로서 외기온 20°C 일 때 최대로 나타났으며, 이는 증발기에서 냉매가 상변화하는 과정에서 외기온과의 온도차가 커서 열 흡수율이 증가하기 때문인 것으로 판단되었다.

(2) 유량에 따른 외기온별 열펌프의 냉방 COP 변화

그림 5는 응축기를 흐르는 열전달매체인 물의 순환유량과 외기온 변화가 열펌프 냉방 COP에 미치는 영향을 나타낸 것으로서 유량이 600~1,500

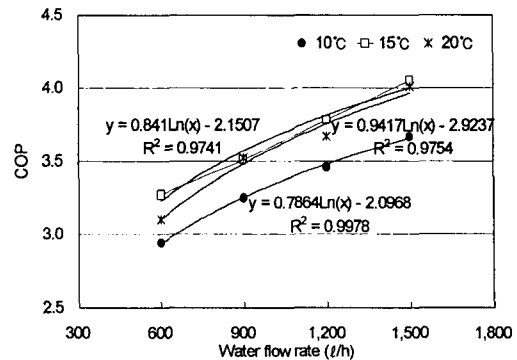


Fig. 4 Effect of ambient temperature on the COP with the water flow rate.

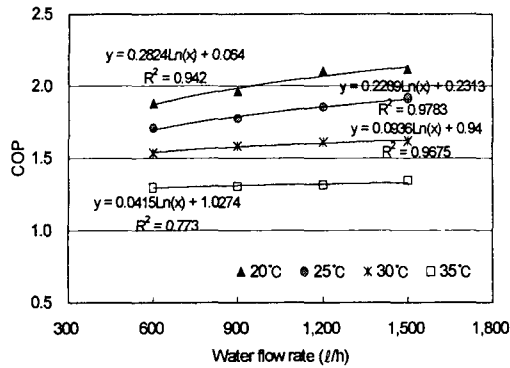


Fig. 5 Effect of ambient temperature on the COP with the water flow rate.

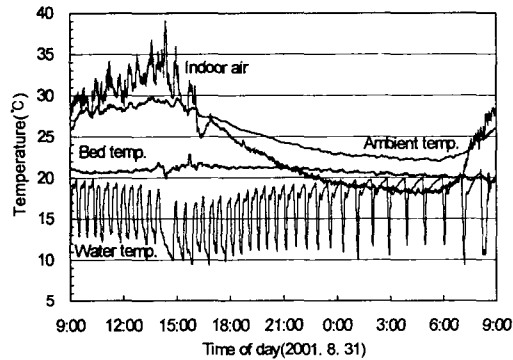


Fig. 6 Temperature variation in the different positions during one day operation of the heat pump(2001. 8. 31).

l/h로 변할 때 COP는 1.3~2.1 수준으로 변하고 있음을 보여주고 있다. 같은 외기온에서는 대부분 유량이 많을수록 COP가 약간 증가됨을 알 수 있었으며, 외기온이 낮을수록 유량증가에 대한 COP 증가가 큰 것으로 나타났다.

다. 양액베드 냉난방 성능시험

(1) 양액베드 냉방성능

여름철 양액베드의 온도를 20°C로 설정하였을 때 외기온 변화에 대한 온실내 공기온도, 열펌프로부터 배출되는 냉각수 온도 및 베드온도의 경시변화를 그림 6에 나타내었다. 외기온이 23~30°C

로 변할 때 온실내 공기온도는 18~38°C로서 온실 내부의 공기온도가 외기온에 비하여 주간에는 높고 야간에는 낮게 나타났으며, 양액베드는 열펌프 가동시 생성된 10~20°C의 냉수 순환으로 설정치 온도인 20°C에 근사하게 유지되었다.

열펌프는 주간에 가동 지연시간이 길고, ON OFF 되는 반복시간은 짧게 나타났으며, 야간에는 이와 반대로 가동 지연시간이 짧고 반복시간은 길게 나타났는데 이는 주간의 냉방부하가 야간에 비하여 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단되었다.

열펌프 가동시 소요되는 전력량을 측정 한 결과, 야간인 24~7시에는 1kWh 미만, 8~13시 및 18~23시에는 약 2kWh, 부하가 큰 14~17시에는 약 4.0kWh가 소요되는 것으로 나타났으며, 15시에 최대 4.5kWh가 소요되었고 1일 소요된 총 전력량은 43.3kWh 이었다. 온실내 온도가 14시에 35°C로 최고인 반면 소비전력은 15시에 최대로 나타났는데 이는 온실내로 투입된 복사열이 양액베드에 저장되어 근권부에 영향을 미치는데 약 1시간이 소요되는 것을 알 수 있었다.

(2) 양액베드 난방성능

겨울철 양액베드의 온도를 21°C로 설정하였을 때 외기온 변화에 대한 온실내 공기온도, 시험구 및 대비구 베드온도의 경시변화를 그림 7에 나타내었다. 외기온이 -7~9°C로 변화할 때 온실내 공기온도는 온풍난방기의 사용으로 야간에 13~18°C

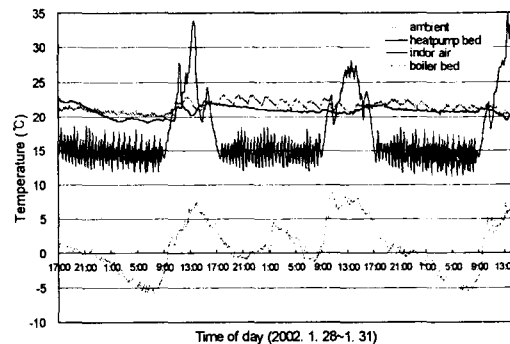


Fig. 7 Temperature variation in the different positions during three days operation of the heat pump(2002. 1. 28~1. 31).

로 유지되었으며, 시험구의 양액베드는 열펌프 가동으로 생성된 25~40℃의 온수 순환으로 설정치 온도인 21℃로 큰 변화 없이 유지된 반면 대비구에서는 온도의 상하한폭이 커서 정밀제어가 어려운 것으로 나타났다.

2002년 1월 28일부터 2월 1일까지 양액베드 난방용으로 열펌프가 설치되어 있는 시험구에는 전력량계를 설치하고 온수보일러가 설치되어 있는 대비구에는 연료공급 파이프에 유량계를 설치하여 매일 동일시간에 1일 전력소모량과 연료소모량을 측정한 결과, 그림 8에서 보는바와 같이 시험구에서는 9.7kWh의 전력이 소모되었으며, 대비구에서는 7.7ℓ의 경유가 소모되었다.

겨울철 양액베드 난방에 소요되는 난방비용을 면세유 경유 364원, 농사용전기(병) 37.8원을 기준으로 하여 산정한 결과, 온수보일러를 이용하여 양액베드를 난방하는 데는 1일 2,803원, 열펌프를 이용하면 367원이 소요되어 약 87%의 양액베드 난방비용 절감효과가 있는 것으로 나타났다.

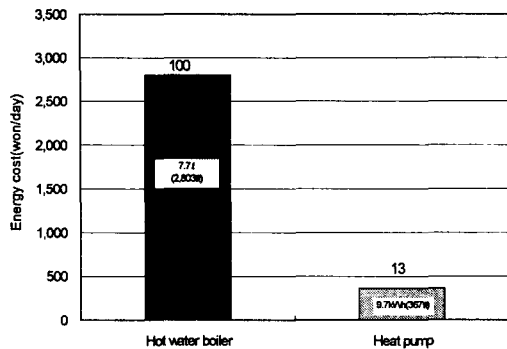


Fig. 8 Comparison of energy cost of the heat pump to the hot water heater.

4. 결 론

필라이트를 양액배지로 이용하는 양액재배에서 작물의 근권부 온도를 주년 적정온도로 유지시켜 주기 위하여 공기-물방식의 열펌프를 이용한 양액베드의 냉난방시스템을 구성하고 열펌프의 성능 시험과 현장시험을 실시한 결과 다음과 같은 결과

를 얻었다.

1) 필라이트 배지를 이용한 양액베드 냉난방에 필요한 열량을 산정하기 위하여 지배방정식을 정립하였으며, 산정한 결과 냉방시는 451kJ/h·m², 난방시 347kJ/h·m²의 열량이 소요되어 냉방시가 약 1.3배 부하가 큰 것으로 나타났다.

2) 양액베드의 냉난방을 위한 3.75kW 용량의 공기-물방식 열펌프를 설계 제작하였다.

3) 난방시 응축기를 흐르는 유량이 600~1,500ℓ/h로 증가함에 따라 압축기에 투입된 전기에너지는 12,122~17,974kJ/h 이었고 응축기에서 방출되는 방열량은 42,360~64,372kJ/h로서 이때 열펌프의 난방성능계수(COP)는 3.0~4.0로 유량이 많고 외기온이 높을수록 COP가 높은 것을 알 수 있었다.

4) 냉방시에는 유량이 600~1,500ℓ/h로 증가할 때 열펌프의 냉방성능계수(COP)는 1.3~2.1 수준이었으며, 같은 외기온에서는 대부분 유량이 많을수록 COP가 약간 증가되었고 외기온이 낮을수록 유량증가에 대한 COP 증가가 큰 것으로 나타났다.

5) 여름철 양액베드 냉방시험 결과, 베드는 설정온도로 잘 유지되었고 냉방부하의 차이에 의하여 열펌프는 주간에 가동 지연시간이 길고, ON/OFF 되는 반복시간은 짧은 반면 야간에는 이와 반대로 나타났으며, 전력량은 15시에 최대 4.5kWh가 소모되어 1일 총 43.3kWh가 소모되었다.

6) 겨울철 난방시험 결과, 열펌프를 이용하여 양액베드를 난방하는 시험구에서는 1일 9.7kWh의 전력이 소모되어 367원의 난방비용이 들었으며, 온수보일러를 이용한 대비구에서는 7.7ℓ의 경유가 소모되어 2,803원의 난방비용이 들어 열펌프를 이용할 경우 약 87%의 난방비용 절감효과가 있는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 남윤일. 2000. 양액재배 자동시스템과 재배시설. 한국농업전문학교 2000년 농촌진흥공무원 전문교육교재(양액재배).
2. 농림부. 2001. 2000년 채소재배 및 생산실적.

3. 농촌진흥청. 2001. 2000 인공배지 양액재배 현황.
4. 문지혜, 이상규, 고관달. 1999. 하계 오이재배시 근권 냉각처리가 수량 및 품질에 미치는 영향. 원예연구소 농사시험사업연구보고서.
5. 서정운 역. 1990. 열전달. 회중당.
6. 송현갑, 금동혁, 류관희, 이기명, 이종호, 정두호. 1993. 시설원에 자동화. 문운당.
7. 이재욱. 1994. 온수지중가온이 동계 시설오이의 근권환경, 생육 및 수량에 미치는 영향. 경북대학교 박사학위논문.
8. 青木伸雄. 1993. 農業用ヒートポンプシステム技術. 社団法人 農業電化協會.