



제주지역 지하공기를 이용한 농업시설용 히트펌프시스템의 난방 성능 분석 - 제주지역을 중심으로 -

*The Analysis of heating performance of heat pump system for agricultural facility using underground air in Jeju area
- Focused on the Jeju Area -*

강연규* · 임태섭**

Kang, Youn-Ku* · Lim, Tae-Sub**

* Energy & Environmental Division, Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Science(NAS), Rural Development Administration(RDA), South Korea(ykk0977@korea.kr)

** Corresponding author, Architectural Engineering, Ph.D., Professor, Seoul University, South Korea(franciss9@naver.com)

ABSTRACT

Purpose: The underground air is the warm air discharged from the porous volcano bedrock 30-50m underground in Jeju, including excessive humidity. The temperature of the underground air is 15-20°C throughout the year. In Jeju, the underground air was used for heating greenhouses by supplying into greenhouses directly. This heating method by supplying the underground air into greenhouses directly had several problems. The study was conducted to develop the heat pump system using underground air as heat source for resolving excessive humidity problem of the underground air, adopting the underground air as a farm supporting project by Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs(MAFRA) and saving heating cost for agricultural facilities. **Method:** 35kW scale(10 RT) heat pump system using underground air installed in a greenhouse of area 330m² in Jeju-Special Self-Governing Province Agricultural Research & Extension Services, Seogwipo-si, Jeju. The inlet and outlet water temperature of the condenser, the evaporator and the thermal storage tank and the underground air temperature and the air temperature in the greenhouse were measured by T type thermocouples. The data were collected and saved in a data logger(MV200, Yokogawa, Japan). Flow rates of water flowing in the condenser, the evaporator and the thermal storage tank were measured by an ultrasonic flow meter(PT868, Panametrics, Norway). The total electric power that consumed by the system was measured by a wattmeter(CW240, Yokogawa, Japan). Heating COP, rejection heat of condenser, extraction heat of evaporator and heating cost were analyzed. **Result:** The underground air in Jeju was adopted as a farm supporting project by Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs(MAFRA) in 2010. From 2011, the heat pump systems using underground air as a heat source were installed in 12 farms(16.3ha) in Jeju.

KEYWORD

온실
히트펌프
지하공기

Greenhouse
Heat pump
Underground air

ACCEPTANCE INFO

Received Oct. 17, 2016
Final revision received Nov. 17, 2016
Accepted Nov. 22, 2016

© 2016 KIEAE Journal

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

2013년 현재 제주도의 농가 수는 38,502호이며, 농가인구는 111,745명으로 제주도민의 약 18.5%가 농업에 종사하고 있다. 논밭의 경지면적은 논 32 ha, 밭 62,823 ha로 농가 1가구당 경지면적은 논이 0.1 a, 밭이 163.2 a로 밭의 경지면적이 논에 비해 높다.

현재는 한반도의 남해안 일부지역에서도 생산이 되고 있지만, 제주도의 대표적인 특산물로는 감귤류를 들 수 있다. 감귤류의 총 재배면적은 2013년 현재 20,577 ha로 밭 경지면적의 약 33%에 해당하며, 그 생산량도 한해 672,267 M/T에 달한다[1].

감귤의 일부와 화훼류는 겨울철 난방을 위하여 시설하우스에서 재배되는데, 특히 시설하우스에서 생산되는 감귤의 경우는 난방에 필요한 면세유의 가격이 60% 정도 오르면 노지감귤과 소득

이 같아져[2], 시설 감귤의 의미를 잃게 된다.

제주특별자치도에서는 농업분야 경영비중 난방비를 절감하고자 2005년부터 지하공기를 직접 송풍함으로써 온실 등 농업시설을 냉난방하는 시스템(Fig.1)을 개발하여 2008년까지 400여개소를 보급하였으며, 보급분야는 호접란, 한라봉, 시설감귤, 양돈, 양계 등 다양하다. 또한 지하공의 천공 즉, 지하공기 이용은 해수 유입 및 지하수원 파괴 등이 우려되는 고도 25 m 이하 지역과 산방산 부근을 제외한 제주 전지역의 85%에서 가능하다[3].



Fig. 1. The heating and cooling system of underground air direct blowing type.

그러나 다공질 화산 암반층에서 토출되는 지하공기는 상대습

도가 높아[3] 과습으로 인한 작물의 병 발생이 우려되며[4], 온도가 15~18℃ 내외이므로 지하공기를 직접 시설하우스에 송풍하여 땅고, 한라봉 또는 하우스밀감과 같은 고온성 작물의 난방용으로 부적절하다.

지하공기를 온실 등 농업시설에 직접 송풍함으로써 나타나는 과습을 방지하기 위해 온실을 난방하여 상대습도를 낮추려는 목적으로 제주지역에서는 비교적 설치비용이 저렴한 42~91 kw(12~26 RT) 용량의 공기열원 히트펌프를 더 설치하는 경우도 있었다. 그러나 공기열원 히트펌프의 특성상 증발기에 성애가 발생하거나 가장 큰 난방부하가 필요한 일출직전에 외기 온도가 가장 낮아지는 우리나라의 기후여건으로 인하여 난방효율이 저하하는 문제 등으로 공기열원 히트펌프는 난방기로서의 역할이 크지 않은 실정이었다.

본 연구에서는 과습한 지하공기를 농업시설에 직접 송풍하지 않고, 지하공기와 물을 직접 접촉시켜 지하공기로부터 열을 흡수한 후, 이 물을 열원으로 하는 물 대 물 히트펌프 시스템을 개발하고 난방 성능 및 난방에너지 비용 절감 효과를 산출하였다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

실험 장치는 크게 지하공기로부터 열을 흡수하는 공기/물 직접 접촉식 열교환기, 온수 또는 냉수를 생산하는 물 대 물 방식의 히트펌프 시스템, 생산된 냉난방 열을 저장하는 축열조와 이들을 제어하는 제어 시스템 등으로 구성되었다.

Fig. 2는 지하공기로부터 열을 흡수하는 공기/물 직접 접촉식 열교환기(Air/Water Direct Contact Heat Exchanger, D. C. H. X.)를 보여준다. 공기/물 직접 접촉식 열교환기는 직경 1 m, 높이 2.5 m의 스테인리스소재의 원통 구조이다. 송풍 팬은 Fig. 2의 ①과 같이 지하 공으로부터 지하공기를 흡입하여 공기/물 직접 접촉식 열교환기의 중간에 설치된 직경 30 cm의 관을 통해 지하공기를 송풍한다. 이 관은 공기/물 직접 접촉식 열교환기의 내부 하단부까지 연결되어 있다. 지하공기는 Fig. 2의 ②, ③과 같이 공기/물 직접 접촉식 열교환기의 내부 하단부에서 상승하면서 Fig. 2의 ④와 같이 상부에서 분출된 물과 직접 접촉하면서 약 16℃의 지하공기로부터 열을 전달 받는다. 즉 공기/물 직접 접촉식 열교환기 내부 하단부에서 지하공기는 상승하고, 상단부에서 물은 하강하면서 지하공기에서 물로 열전달이 이루어지는 원리이다. 이렇게 함으로써 Fig. 2의 ⑤와 같이 과습한 지하공기를 외부로 배출하여 온실에 지하공기를 직접 송풍하지 않고 지하공기로부터 열만 흡수함으로써 지하공기를 직접 농업시설에 송풍하는 것과는 달리 과습을 막을 수 있다. Fig. 2의 ⑥과 같이 지하공기로부터 열을 흡수한 물은 물 대 물 히트펌프의 열원으로 이용된다.

열교환기(D. C. H. X.) 하단부에서 상승하는 지하공기의 상승 시간과 상단부로 하강하는 물의 하강시간을 늘려 열전달을 촉진하기 위해 열교환기내부에는 다공성의 플라스틱 충전 물을 채워 넣었다. 공기/물 직접 접촉식 열교환기는 일종의 쿨링타워로 난방 시에는 지하공기 내 수분의 응축으로 인하여 물이 일정 수위이하가 되면 외부로 물을 배출되게 하였다. 또한 난방 시

에는 물의 증발로 인하여 물이 일정 수위이하가 되면 외부에서 물을 자동으로 채워 넣도록 하였으며, 이외 다른 유지관리는 필요치 않도록 설계되었다. Fig. 3의 (a)는 뚜껑을 개방하여 충전 물과 물을 분출하는 원형 분출장치를 보이게 한 상태의 열교환기 내부 모습이며, (b)는 충전 물의 모습이다. 또한 (c)는 터보팬과 열교환기를, (d)는 히트펌프를, (e)는 온실내부에 설치된 팬코일 유닛을 보여준다.

제어시스템은 PLC와 컴퓨터를 기반으로 구성되었으며, 컴퓨터의 메인화면은 Fig. 3의 (f)와 같이 시스템의 각부를 구성하는 히트펌프, 송풍팬, 팬코일 유닛, 유량계 등의 가동상태, 각 위치의 온도를 표시하며, 메인화면의 상단부에는 시간 및 온도설정 모드, 냉난운전모드, 온도트렌드, 소비전력 및 유량트렌드를 표시하도록 하는 선택 바가 위치한다. 시간 및 온도 설정 모드에서는 시간에 따른 온실의 온도를 4단 변온으로 설정할 수 있으며, 축열조의 온도도 설정할 수 있다.

Fig. 4는 지하공기를 이용한 농업시설용 히트펌프 시스템의 개략도와 온도센서 설치위치를 보여준다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 온도센서는 공기/물 직접 접촉식 열교환기 입출구 지하공기 온도, 히트펌프의 증발기 및 응축기 입출구 물온도, 팬코일유닛 입출구 물온도, 축열조 물온도를 측정하도록 하였다. 유량센서는 공기/물 직접 접촉식 열교환기와 히트펌프의 증발기 사이, 히트펌프의 응축기와 축열조 사이, 축열조와 팬코일유닛 사이에 측정하여 생산되는 열량의 산출자료로 이용하였다. 또한 전력량계를 시스템의 메인전원 측에 설치하였고, 온실 내에는 온도센서를 설치하였다. 각 지점의 온도, 유량, 소비전력량 등은 전술한 바와 같이 컴퓨터의 메인화면에 나타나도록 하였으며, 동시에 저장되도록 하였다.

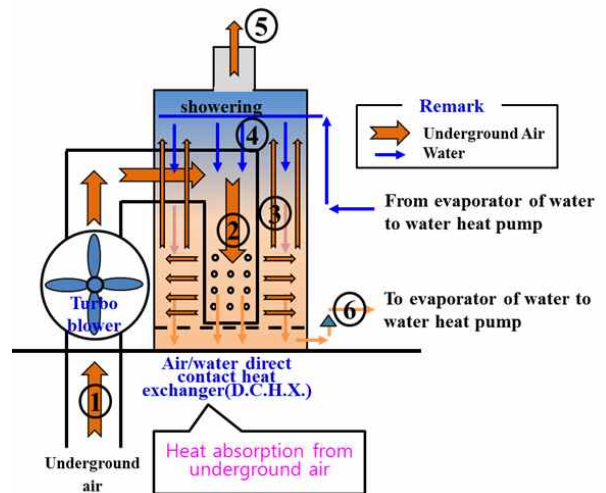


Fig. 2. Heat transfer mechanism of the Air/water direct contact heat exchanger(D.C.H.X.).

본 시스템은 제주특별자치도 서귀포시 소재의 농업기술원 스프레이국화 재배 온실에 설치하였으며, 농림축산식품부의 지열보급 사업을 참고하여 히트펌프는 35 kw, 난방면적은 330㎡하였다. Table 1은 실험장치의 사양을 나타낸다.

제어알고리즘은 다음과 같다. 먼저 유저(user)의 세팅온도가

축열조의 물 온도를 만족하지 못하면 송풍팬, 히트펌프, 공기/물 직접 접촉식 열교환기와 물 펌프들이 가동하여 축열조의 물 온도를 세팅된 온도까지 가열 또는 냉각하여 온수 또는 냉수를 생산한 후, 축열조에 저장한다. 그 다음은 세팅온도가 온실의 냉난방 온도를 만족하지 못하면 축열조와 팬코일유닛 사이의 물 펌프, 팬코일유닛의 팬이 가동하여 실내온도를 세팅된 온도까지 난방 또는 냉방한다. 단 온실의 온도는 시간에 따라 4단계로 나누어 조절할 수 있으며, 시간 또한 설정이 가능하다(4단 변온).

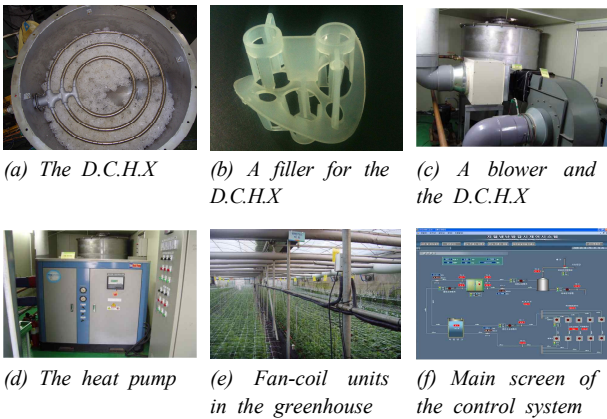


Fig. 3. Photos of the D.C.H.X, the heat pump and fan-coil units, etc.

Table 1. Specification of heat pump system using underground air.

Items		Specification	
Direct contact heat exchanger	Material	Stainless steel	
	Diameter (mm)	1,000	
	Height (mm)	2,500	
	Heat transfer fluid	Normal water	
Heat pump	Compressor	Type	High temperature scroll type
		Capacity	35 kw(10 RT)
		Voltage	380 V(3 Phase)
	Condenser/Evaporator	Flat type heat exchanger	
Refrigerant	R22		
Thermal storage tank	Diameter (mm)	2,000	
	Height (mm)	2,000	
	Heat storage fluid	Normal water	
Turbo blower	Capacity	7.5 kw	
	Air flow rate	102 m ³ /min	

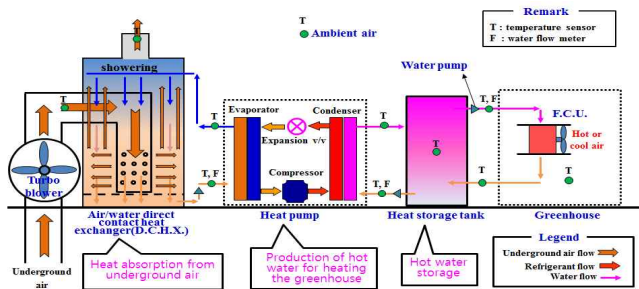


Fig. 4 The schematic of heat pump system using underground air and location of sensor.

지하공기를 이용한 농업시설 난방시스템의 난방 특성을 분석하기 위해 제어시스템과 센싱위치 및 데이터 수집방법은 전술한

바와 같으며, 초기에 시스템의 난방성능계수를 측정하기 위해 응축기, 증발기 및 축열조 입구와 출구에 T type 열전대 및 초음파유량계(PT868, Panametrics, USA)를 설치하여 데이터로거(MV200, Yokogawa, Japan)를 통해 데이터를 수집하였다. 또한 소비전력은 전력량계(CW240, Yokogawa, Hioki, Japan)로 측정하였고 식(1)을 이용하여 난방성능계수를 산출하였다. 난방성능계수는 개방회로와 폐회로로 나누어 측정하였으며, 여기서 개방회로라 함은 응축기에서 가열된 물을 축열조에 다시 보내지 않고 외부로 버리는 회로이며, 폐회로는 축열조에서 온 물을 응축기에서 가열하여 다시 축열조로 보내는 시스템, 다시 말해 축열조의 물을 계속 순환시키며 가열하는 회로를 말한다.

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

여기서, COP_H 는 히트펌프의 난방성능계수, ρ_w 는 물의 밀도 (kg/m^3), V_w 는 물의 유량(m^3/s), c_w 는 물의 비열 ($kJ/kg \cdot ^\circ C$), $T_{w,i}$ 와 $T_{w,o}$ 는 각각 응축기를 지나는 물의 입출고 온도($^\circ C$), P_{HP} 는 히트펌프의 소비전력(kW)을 의미한다.

또한 같은 면적에 같은 작물을 재배하는 온실에 경유 온풍 난방기를 설치하여 기존 온풍난방식과의 에너지 소비량 및 실내 온도 조건을 비교하였다.

2. 지하공기의 개념 및 문헌 고찰

2.1. 지하공기의 개념

제주도의 지질은 퇴적암층과 현무암, 조면질 안산암, 조면암 등의 화산암류와 기생화산에서 분출한 화산쇄설암 등으로 구성되어 있고, 일부지방의 점사질 토양을 제외하면 대부분이 흑갈색의 화산회토로 덮여 있다[4].

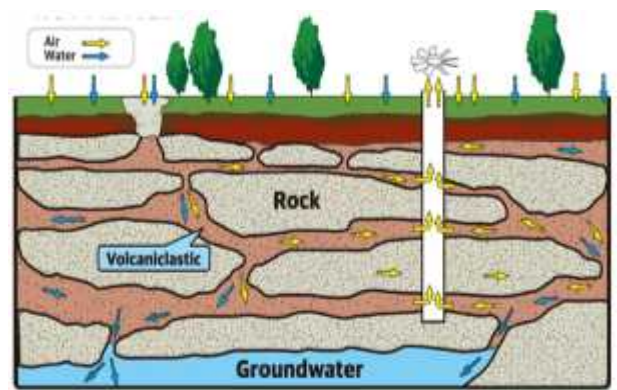


Fig. 5. The mechanism of underground air generation[5]

또한 5 m 내외의 토사 층을 제외하고 대부분 다공질의 현무암과 클링커(Clinker), 스킨리아(Scoria) 등으로 구성된 화산 쇄설층이 반복적으로 나타나고, 암석과 지층사이에 형성된 다수의 공동에 의해 지표의 공기나 물이 지하로 유입되기 쉬운 구조로 되어 있다. 이와 같은 지질층의 특성을 고려했을 때 Fig.5와 같은 지하

수층 위로 다량의 공기와 물의 유동이 발생할 것이라 예상된다. 이러한 지질구조에서 지중의 열원(Underground heat source)을 얻기 위해 지중을 천공하고 송풍기로 강제 흡입하면 15~18℃ 수준의 온도를 갖는 지중공기가 지표외부로 방출되는데 이를 직접 이용하거나 히트펌프(Heat pump)를 활용한 열 교환을 통해 열원을 취득한다. 여기서 지중공기는 암반과 용암쇄설층 등을 통과하는 과정에서 대류 열전달에 의해 열에너지를 흡수한다는 것을 예측할 수 있다[5].

2.2. 선행 연구 고찰

김 등(2007)은 제주지역 지하공기 이용을 위한 시추공의 시추심도는 통기성 확보 시 약 25~35m 이하의 심도로도 충분한 풍량을 확보할 수 있으나, 지하공기층 분포 구간의 발달은 지역마다 매우 불규칙하여 통기 층 확보 빈도와 시추경제성을 감안하여 약 50m 내외로 기본 계획함이 유리할 것이며, 시추장비의 굴착능력 및 풍량 시험 결과로 볼 때 250~300mm의 지름이 적당하며, 흡입 팬으로 사용되는 터보팬(송풍팬)의 용량은 3.7~7.5kw 범위가 적당할 것으로 보고하였다[6].

이어, 지하공기를 온실에 직접 공급하여 온실의 야간온도를 낮추는 냉방효과와 지하공기에 포함된 천연 이산화탄소 가스를 작물에 시비하는 연구가 수행되는데, 성 등(2007)은 지역적 차이는 있지만 지하공기 내에는 3,000~5,000ppm 정도의 천연 이산화탄소가 함유되어 있으며 지하공기를 온실에 직접 공급했을 때 야간 온도가 호접란의 화아 발생에 순조로운 19~22℃를 유지하였으며, 엽두께 등 지상부 생육이 월등히 좋은 것으로 나타났으며, 지하공기에 포함된 천연 이산화탄소를 이용하여 연간 18,200천원/10a의 경제적 효과가 있는 것으로 분석되었다고 보고하였다[7]. 현 등(2007)은 제주도 현무암 지하공기를 이용한 파프리카 재배에 대한 천연 이산화탄소 가스 시비에 대한 연구에서 일반 재배에 비해 지하공기에 포함된 천연 이산화탄소 가스를 시비할 경우 착과수가 1.9개 더 많았으며 과실 중경은 작아졌으나 중량은 증가하였고 과실 당도와 착색도 및 과피의 경도가 높았다고 보고하였으며[8], 성 등(2009)은 호접란 재배대의 하부공간에 저 광도를 필요로 하는 새우란을 지하공기로 저온 처리하여 재배하는 것이 심비디움 재배대의 하단에 재배하는 것보다 엽두께와 경경이 굵고 근수가 많았다고 보고하였다[9].

김 등(2013)은 제주지역 화산지질층 지하공기를 열원으로 이용하고자 하는 연구를 수행하였다. 김 등은 지중공기온도, 습도를 고려하여 지열취득 열 예측량을 산출한 결과 평균 40kw이상의 에너지를 취득 가능하며 열 교환 온도차가 크고, 풍량이 많을수록 취득 가능 에너지량이 많아짐을 예상할 수 있다고 보고하였다. 또한 지하공기 이용 방식을 직접 이용하거나 히트펌프의 열원으로 이용하는 방법을 추천하였으나, 단지 지하공기 에너지 취득량에 대한 이론적 해석에 불과하다[5].

고 등(2014)은 애월과 구좌읍의 지하공기는 온도가 약 18.5~18.8℃, 습도는 85.5%로, 히트펌프를 이용하지 않고 직접 토출되

는 공기를 시설원예 등에 공급하여 열원으로 활용할 수 있지만, 습도가 높아 이를 직접 시설원예에 사용할 경우에는 높은 습도로 인하여 과 양병의 발생빈도를 높이는 등 농작물 재배에 악영향을 미치며, 지하공기를 직접 건물 공간에 사용할 경우에는 결로현상이나 곰팡이 번식 등의 원인이 될 수 있다고 보고하며, 제습기능을 동반하고 유입공기의 온도강하를 방지할 수 있는 지열히트펌프를 개발하였다[10]. 이 보고는 지하공기의 과습에 의한 폐해를 잘 기술하고는 있으나, 지열히트펌프를 이용하여 지하공기 내 포함된 수분을 제거한 후, 건조한 지하공기를 농업시설 및 건물 공간에 직접 이용한다는 개념은 여전히 포함하고 있다. 본 연구에서는 지하공기를 직접 농업시설 공간에 이용하지 않고 공기/물 직접 접촉식 열교환기를 통하여 지하공기의 열만 흡수한 후, 이를 히트펌프의 열원으로 이용, 농업시설을 난방 함으로써 시설농가의 난방에너지 비용을 절감하고자 하였으며, 또한 지하공기가 농업시설에 직접 유입되어 과습에 의한 농작물 피해를 배제하고자 하였다.

지하공기의 열을 히트펌프의 열원으로 활용하려는 연구는 강 등(2009, 2011), 김 등(2010)에 의해 수행되며[11], [12], [13], 열원은 다르지만 지열 히트펌프에 대한 문헌 또한 국내외를 막론하고 다수 보여 진다.[15], [16], [17], [18].

3. 결과 및 고찰

3.1. 개방회로에서의 난방성능계수

Fig. 6은 개방회로에서의 히트펌프의 난방열량 및 성능계수를 나타낸다. 여기서 개방회로라 함은 응축기에서 열 교환된 온수를 외부로 배출시키는 형태이며, 밀폐회로는 축열조 내부의 물이 응축기와 축열조를 계속 순환하면서 축열조의 물이 일정온도까지 도달하게 하는 과정을 말한다. 또한 실험시간이 7분으로 짧은 것은 현장에서 큰 유량의 물을 확보할 수 없어 축열탱크에 물을 저장하였다가 실험에 사용하였기 때문에 축열탱크의 물이 모두 소진되면 성능 실험을 중단하였기 때문이다.

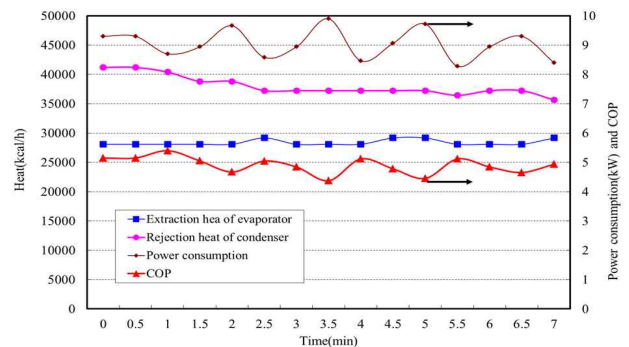


Fig. 6. Heat, power consumption and COP in open loop

개방회로에서 히트펌프의 난방성능계수는 4.3~5.5 수준으로 나타났으며, 이때 난방열량은 35,000~41,000kcal/h 수준이었다. 또한 공기-물 직접접촉식 열교환기에 의해 지하공기로부터 얻는 열량(증발열량)은 28,000 kcal/h 수준이었다.

김 등(2013)에 의하면 온도 15℃인 지중공기를 송풍기를 이용하여 100 m³/min의 풍량으로 강제대류 시켰을 때 열 교환 후 배출온도가 10℃이면 약 40 kw(34,400kcal/h)의 지열을 취득할 수 있는 것으로 보고되었으나, Table 1에서 보인바와 같이 본 연구에서는 풍량은 102m³/min로 실제는 약 32.6 kw(28,000 kcal/h)의 열량이 취득되었다. 이것은 김 등은 지하공기의 열량과 지하 공기 내 수분의 응축 잠열량을 합한 산출 값(simulated value)사용하였고, 본 연구에서는 공기-물 직접 접촉식 열교환기에서 지하공기와 물의 실제 열 교환과 히트펌프의 증발기에서 물과 냉매의 실제 열 교환, 즉 두 번의 열 교환에 의한 취득 열량의 차이라고 판단되었다.

3.2. 밀폐회로에서의 축열 가동 시 각부 온도 변화

Fig. 7은 밀폐회로에서 축열하는 동안의 응축기와 증발기의 입출구 온도 및 공기-물 직접접촉식 열교환기의 입출구 공기 온도를 보여준다. 6톤 용량의 물을 18℃에서 49.5℃까지 가열하는 시간은 약 3시간이 소요되었으며, 지하공기 입구 온도는 축열 기간 내내 약15℃를 유지하였다. 반면 지하공기 출구 온도 및 증발기 입출구 온도는 응축기 입출구 온도가 상승하면서 초기에는 하강하다가 다시 상승하는 형태를 보여주었다. 이는 축열 가동 초기에는 축열조 내부의 온도가 낮아 응축기에서의 열전달 량이 크기 때문이며, 일정 시간이 흐른 후에는 축열조 내부온도가 상승하여 응축기에서의 열전달 량이 초기보다 작아져 흡수열량이 점점 줄어들면서 증발기 입 출구 온도가 상승하고 동시에 지하공기 출구 온도도 상승하는 것으로 판단되었다.

또한 지하공기를 물과 열 교환하여 물을 히트펌프의 열원으로 사용하면 지하공기나 외기를 히트펌프의 증발기에 직접 흡입시켜 히트펌프의 열원으로 사용하는 경우에 비해 같은 유량에서 보다 많은 열량을 확보할 수 있고, 지하공기나 외기를 히트펌프의 열원으로 사용함으로써 발생하는 증발기 측에 성애 및 이를 제거하는 제상문제를 없앨 수 있기 때문에 물을 히트펌프의 열원으로 사용하는 것이 보다 효율적이라 판단되었다.

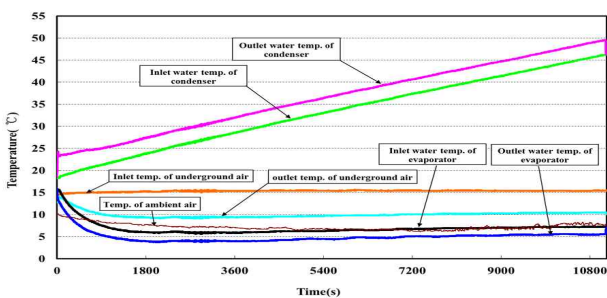


Fig 7. Temperature variation in operating thermal storage tank(closed loop)

3.3. 밀폐회로에서의 축열 가동 시 난방 성능

Fig. 8은 밀폐회로 축열 가동 시 난방성능계수를 나타낸다. 난방성능계수는 가동 초기에는 5.0수준이었으며, 응축기 출구 온도가 50℃까지 높아짐에 따라 2.5로 저하하는 것으로 나타났다. 이때 응축열량은 40,000 kcal/h에서 27,000 kcal/h로, 증발열량은

30,000 kcal/h에서 18,000 kcal/h로 하강하였다. 반면 응축기 출구 온도의 상승으로 인하여 히트펌프의 소비전력은 가동 초기 9.0kw에서 12.5kw까지 상승하였다.

이것은 히트펌프를 지속적으로 가동하면서 축열조의 온도가 상승하면서 응축기에서 흡수하는 열량이 감소하고, 이에 따라서 증발기에서 흡수하는 열량이 감소하고, 소비전력은 증가하여 난방성능계수가 감소하는 것으로 판단되었다.

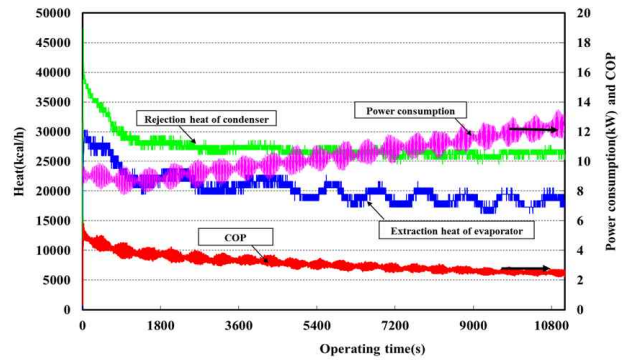


Fig 8. Heating COP in operating thermal storage tank(closed loop)

3.4. 온실 난방 효과

Fig. 9는 축열조의 축열된 열매체(물)가 팬코일 유닛을 거쳐 온실을 난방하면서 축열조의 부족 열량을 히트펌프가 보충하는 온실난방모드에서의 실내온도 변화 및 지하공기 입출구, 증발기 입출구 온도를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 온풍난방기가 설치된 온실은 난방기 가동여부에 따라 19~26℃까지 변화하였다. 또한 히트펌프가 설치된 온실은 20~22℃로 실내온도 편차가 약 2℃ 정도로 고르게 분포하는 것으로 나타났다. 또한 실험기간 중 최저 외기 온이 약 7.5℃로 다소 높기는 하지만, 외기 온이 가장 낮은 1월중 서귀포 지역 30('71~'00)년 최저온도는 2.3~4.3℃인 것을 감안하였을 때 실내온도를 잘 유지하는 것으로 판단되었다.

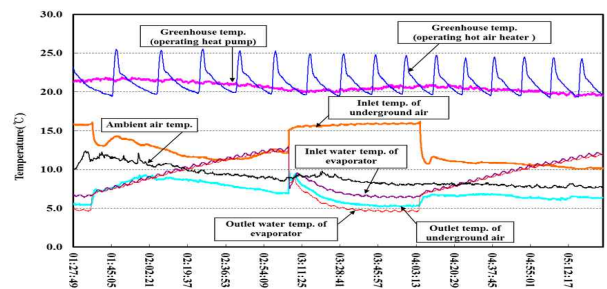


Fig 9. Heating effect of greenhouse.

3.5. 난방에너지 비용 비교

Table 2는 지하공기를 이용한 히트펌프시스템과 기존 난방 방식인 경우 열풍기의 에너지 소비에 따른 난방에너지 비용 절감 효과를 1000m²(10a)로 산정하여 비교한 것이다. 또한 Fig 9에서 보는 바와 같이 2016년 2월 초에서 6월 초까지 약 4개월 동안 지하공기를 이용한 히트펌프 시스템은 40,644kWh의 전력을 사용하였으며, 경우 온풍난방기는 약 8,898L의 경유를 소비하였다. 이를 농업용 전기료와 면세유가로 환산하면 지하공기를 이용하는

히트펌프시스템이 경유 열풍기에 비해 난방에너지비용을 5,624천원/10a 절감하는 것으로 나타나, 지하공기를 이용하는 히트펌프가 경유 온풍 난방기에 비해 약 75%의 난방에너지 비용 절감 효과가 있을 것으로 분석되었다.

Table 2. The effect of heating cost reduction by the system

Items	The heat pump system using underground air	Hot air heating
Electric power consumption(kwh)	40,644	
Diesel fuel consumption(L)		8,897.7
Heating cost(Won)	1,849,302	7,474,068
Index	24.7	100

※ Price of diesel : 840Won/L, Price of electricity : 45.5Won/kwh

4. 결론

본 연구에서는 지하공기를 온실에 직접 송풍하여 난방하는 방식의 과습 문제를 해결하고, 난방비용을 절감하고 지하공기를 농식품부의 지원 사업에 채택시키고자 제주지역의 지하공기를 열원으로 이용하는 히트펌프 시스템을 개발하였다.

6톤 용량의 물을 18℃에서 49.5℃까지 가열하는 축열 기간 동안 지하로부터 토출되는 지하공기의 온도는 약 15℃를 유지하여, 지하공기가 히트펌프의 열원으로 적당하다고 판단되었다. 축열조 온도가 40℃~45℃일 때, 성능계수는 2.1~2.7수준이었으며, 이때 히트펌프가 발생한 열량(난방열량)은 34.9~44.2kw 수준이었다. 2월~6월까지 경유대비 난방에너지 비용 절감액은 5,625천원/10a였으며, 약 75%의 난방비 절감 효과가 있는 것으로 판단되었다.

제주지역 지하공기를 이용하는 히트펌프 시스템은 2010년도에 농림축산식품부가 시행하는 농업에너지이용효율화사업에 채택되어 지원을 받게 되었으며(국고 60%, 지방비 20, 자부담 20), 2011년부터 제주지역에서 12개 농가, 16.3ha의 면적에 보급되었다. 이로 인하여 농업분야에서의 자연에너지 이용 확대와 온실난방에 화석에너지를 이용하지 않기 때문에 이에 따른 이산화배출 저감[14]을 통한 친환경 농업을 구현할 수 있을 것으로 기대되었다.

또한 본 연구에서 개발된 히트펌프 시스템의 효율적인 운영을 위해 필폐회로 축열 가동 시 난방 성능에서 가동 초기 5.0 수준에서 응축기 출구 온도 50℃에서 2.5까지 떨어지는 히트펌프시스템의 안정적 운영을 위해서 계속적 연구의 필요성이 요구되고 있다.

Acknowledgement

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ010872) 및 국립농업과학원 농업과학기술 연구 개발사업(과제번호: PJ010964)의 지원에 의해 이루어진 것임

Reference

[1] <http://www.agri.jeju.kr/mainfo/stats/genera.html>
 [2] 농촌진흥청, “유가 상승에 따른 시설원에 농가 대응방안 연구”, 농촌진흥청 연구보고서, 2009 // (Rural Development Administration of Korea, “The Study on Scheme Dealing with Horticultural Farming to increase Oil Price”, RDA report, 2009)

[3] 성문석, “제주도 지하공기의 특성과 이용성에 관한 연구” 제주대학교 박사학위논문, 2007 // (Sung, Moon-Seok, “Study on the Characteristics and Utilization of Underground Air in Jeju Island”, Jeju National Univ. Doctorial Paper, 2007)
 [4] 제주지방기상청, “제주도 기후변화 경향 및 기후특성에 관한 연구”, 제주지방기상청 연구보고서, 2009 // (Jeju Regional Meteorological Administration, “The Study on the Regional Characteristics of Climate Change in Jeju Island” Jeju Regional Meteorological Administration report, 2009)
 [5] 김용환, 김성만, 이동원, 현명택, “화산지질층 지하공기 열원 이용 가능성에 관한 연구”, 한국동력기계공학회지, 제 17권 6호, 2013 // (Kim, Yong-Han, Kim, Sung-Man, Lee, Dong-Won, Hyun, Myoung-Taek, “A study on the availability of underground air for heating/cooling energy in volcano-stratigraphic”, Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 17, No. 6, 2013)
 [6] 김진희, 성문석, 소인섭, 현해남, “제주 화산섬의 현무암 지하공기 분포와 이용성에 관한 연구”, 한국생물환경조절학회 학술발표회, 제 16권 2호, 2007 // (Kim, Jin-Ho, Sung, Moon-Seok, So, In-Sup, Hyun Hae-Nam, “Study on the Distribution and Utilization of Basalt Underground Air in Jeju Volcanic Island”, Journal of the Korean Society for Bio-Environment Control, Vol 16, No 2, 2007)
 [7] 성문석, 소인섭, 강태완, 김정선, 허태현, 강성근, 김공호, 김진희, “제주도 현무암 지하공기 이용에 의한 호접란 생육촉진 효과”, 한국원예학회 학술 발표대회, 2007 // (Sung, Moon-Seok, So In-Sup, Kang, Tae-Wan, Kim, Jeong-Seon, Hur, Tae-Hyun, Kang, Seong-Geun, Kim, Gong-Ho, Kim, Jin-Hoe, “Phalaenopsis Growth Promotion Effect by Utilization of the Jeju Basalt Underground Air in Jeju Volcanic Island”, Journal of the Korean Society For Horticultural Science, 2007)
 [8] 현봉철, 박기수, 소인섭, 성문석, 김진희, “제주도 현무암 지하공기를 이용한 파프리카 재배에 대한 천연 탄산 가스(CO2) 시비 연구”, 한국원예학회 학술발표대회, 2007 // (Hyun Bong-Cheol, Park, Gi-Su, So, In-Sup, Sung, Moon-Seok, Kim, Jin-Hoe, “Nature Carbon Dioxide (CO2) Fertilizing Research in Paprika Hydroponics that Use Jeju Volcanic Island Basalt Underground Air”, Journal of the Korean Society For Horticultural Science, 2007)
 [9] 성문석, 소인섭, 강성근, 고성준, 강종훈, 이상순, “지하공기를 이용한 호접란 재배대의 허부공간 새우란 재배 효과”, 원예과학기술지, 제 27권 s호, 2009 // (Sung, Moon-Seok, So, In-Sup, Kang, Seong-Geum, Ko, Sung-Jun, Kang, Jong-Hoon, Lee, Sang-Soon, “Utility of Cultivation Space under Phalaenopsis of Culturing Bed in the Underground Air for the Growth of Calanthe spp”, Korean Journal of Horticultural Science & Technology, Vol 27, No s, 2009)
 [10] 고지은, 박윤철, 고흥수, “지하공기열 히트펌프 제습기에 관한 실험적 연구”, 한국냉동공조학회, Vol. 26, No. 2, 2014 // (Ko, Ji-Woon, Park, Youn-Cheol, Ko, Gwang-Soo, “An Experimental Study on a Heat Pump with Dehumidification Function than Utilizes Undergroun Air Heat”, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering”, Vol. 26, No. 2, 2014)
 [11] 강연구, 유영선, 김영화, 성문석, 김종구, 장재경, 이형모, “지하공기를 이용하는 농업시설용 난방시스템”, 한국신재생에너지학회 추계학술대회, 2009 // (Kang, Youn-Ku, Ryou, Young-Sun, Kim, Young-Hwa, Sung, Moon-Seok, Kim, Jong-Koo, Jang, Jae-Kyoung, Lee, Hyoung-Mo, “Performance of Heat Pump System Using Underground Air as Heat Source”, The Korean Society for New and Renewable Energy, 2009)
 [12] 김영화, 강연구, 성문석, 유영선, 김종구, 장재경, 이형모, “지하공기-물 직접접촉식 열교환기를 구비한 히트펌프의 성능”, 한국신재생에너지학회 추계학술대회, 2010 // (Kim, Young-Hwa, Kang, Youn-Ku, Sung, Moon-Seok, Ryou, Young-Sun, Kim, Jong-Koo, Jang, Jae-Kyoung, “Performance of Underground Air-to-Water Heat Pump with Direct Contact Heat Exchanger”, The Korean Society for New and Renewable Energy, 2010)
 [13] 강연구, 김영화, 유영선, 김종구, 장재경, 이형모, “지하공기 이용 히트펌프시스템의 땅고온실 난방효과”, 한국신재생에너지학회 추계학술대회, 2011 // (Kang, Youn-Ku, Kim, Young-Hwa, Ryou, Young-Sun, Kim, Jong-Koo, Jang, Jae-Kyoung, Lee, Hyoung-Mo, “Heating Effect of Greenhouse Cultivated Mangos by Heat Pump System using Underground Air as Heat Source”, The Korean Society for New and Renewable Energy, 2011)
 [14] 최준영, “히트펌프 보급으로 인한 CO2 배출저감효과” 기계저널: 대한기계학회지 제 51권 5호 // (Choi Jun-Young, “CO2 emissions reduction effect due to the spread of the heat pump”, Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 51, No. 6, 2011)
 [15] Doherty, P. S., S. Al-Huthaili, S. B. Riffat, and N. Abodahab, “Ground source heat pump - description and preliminary results of the Eco House system”, Applied thermal engineering 24, 2004.
 [16] Hepbasli, A. and O. Akdemir, “Energy and exergy analysis of a ground source (geothermal) heat pump system”, Energy conversion and management 45. 2003.
 [17] Lund, J. W., “Direct-use of geothermal energy in the USA”. Applied Energy, Vol. 74, 2003.
 [18] Sutphin, S. E., “Heat pumps: Installation and trouble shooting”, The Fairmont Press Inc., 1994.