



[2017-9-GT-007]

공기-물 직접 접촉식 열교환기를 구비한 농업시설 난방용 히트펌프시스템의 성능 분석

김영화¹⁾ · 강석원¹⁾ · 백 이¹⁾ · 장재경¹⁾ · 강연구^{2)*}

Performance of the Heat Pump with a Air-Water Direct Contact Heat Exchanger for Greenhouse Heating

Younghwa Kim¹⁾ · Sukwon Kang¹⁾ · Yee Paek¹⁾ · Jaekyoung Jang¹⁾ · Younkoo Kang^{2)*}

Received 21 August 2015 Revised 22 August 2017 Accepted 22 August 2017

ABSTRACT To utilize the air type natural energy for greenhouse heating during winter, it is necessary to develop a heating system including heat recovery equipment from air type thermal energy. This study examined the efficiency of an air-water direct contact type heat exchanger (DCHE) in a heat pump and the performance of the heat pump. The air entering the inlet of the heat exchanger contacts the water and exchanges the heat in the heat exchanger. The water obtaining the thermal energy from the air is used as the heat source of a heat pump and the heat pump generates higher energy by compressing a refrigerant. The energy from the heat pump is stored in the heat storage tank with water by heat exchange. The efficiency of the heat exchanger decreased with increasing intake air temperature. The discarded heat that cannot be used increased with increasing air temperature. Overall, it is necessary to design and calculate the heat capacity of a heat pump to determine the lowest temperature of the heat source to be utilized.

Key words heat pump(히트펌프), direct contact heat exchanger(직접 접촉식 열교환기), heating(난방), coefficient of performance(성능계수)

Nomenclature

COP : Coefficient Of Performance
P : Power consumption, kW
ρ : Density, kg/m³
V : Volumetric flow rate, m³/s
c : Specific heat, kJ/kg°C
T : Temperature, °C

subscript

HP : Heat Pump
w : Water
i, o : Inlet and outlet, respectively

1. 서론

파리기후변화 협정은 195개 참여국 모두 온실가스 감축 목표를 지켜야한다는 내용을 담고 있는데, 이는 세계온실가스 배출량의 90% 이상을 차지하는 양이다. 해당국가에 서는 온실가스 감축을 목표로 화석에너지 이용을 제한할

1) Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences

2) National Institute of Horticultural & Herbal Science

*Corresponding author: ykk0977@korea.kr

Tel: +82-55-580-5543 Fax: +82-55-580-5698

것이며, 이는 환경오염을 유발하지 않는 청정에너지 즉 재생에너지 발굴과 에너지대체로 전환할 것이다. 우리나라 역시 BAU(Business As Usual, 2030년 온실가스 배출전망치)대비 37% 감축을 목표로 하고 있다. 또한 2035년 신재생에너지 보급률 11%를 달성하기 위하여 신재생에너지 보급활성화 대책을 마련하고 정부지원사업을 시행하여 신재생에너지 보급률은 2015년 현재 4.6% 수준이다. 신재생에너지원 중 지열에너지는 토양, 지하수, 지표수 등 지표면이 보유하고 있는 에너지로 연중 일정한 온도를 유지하여 건축물 냉난방시 히트펌프의 열원으로 이용되고 있다. 농업분야에서도 지열에너지는 보급면적이 214ha로 다른 신재생에너지원에 비해 가장 널리 보급되었다.^[1,2,3]

지열에너지를 농업시설에 적용하기 위해서는 히트펌프를 연계하여 이용하는 것이 작물생육환경 조절에 효율적이며 이미 국내 농업분야에도 10여 년간 관련 선행연구가 수행되어왔다. 강연구 등(2007)은 수평형 지열히트펌프를 온실에 설치하여 난방성능 및 지온변화 등을 분석하였고, 유영선 등(2009)은 지열히트펌프를 온실에 설치하여 각 부온도변화 및 성능계수 등을 분석하였으며, 최희철(2010) 등은 분만돈사에 지열 히트펌프시스템을 설치하여 실내환경변화 등을 분석하였다.^[4,5,6]

지열은 연중 일정한 에너지밀도를 지속적으로 얻을 수 있는 에너지원이며 다른 자연에너지원에 비해 기후별 지역에너지땅속에 열교환기를 수평형, 수직형 등의 방식으로 매설하여 지열을 흡수하는데, 이에 따른 굴착이 필수적이다.^[7,8,9]

우리나라 내륙지역은 대부분 지열 열교환기 매설을 위한 굴착 가능하나, 섬지역 특히 제주지역은 화산질 다공성 암반층으로 형성되어있어 굴착 및 지열 열교환기 매설이 힘들다. 제주지역에는 화산질 다공성 암반층에서 공기가 토출되는데(이하 지하공기), 지하공기는 연중 일정한 열량을 함유하고 있어 온실, 버섯재배사, 돈사 등의 농업시설에 직접 송풍하여 이용되어왔으나 과습하고 이산화탄소 농도가 높은 등 작물생육환경에 적합하지 않은 특성이 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 지하공기를 열원으로 하는 히트펌프 시스템의 온실 적용 연구가 필요하였다. 제주지역 지하공기는 특성상 하절기 19°C, 동절기 14°C 수준의 온도를 유지하고, 이산화탄소 농도가 3,000~5,000ppm 함유하고 있으며 해안지역을 제외한 제주지역 85% 분포하고 있으며 평균 40kW

의 열량이 취득 가능한 양질의 재생에너지원이다.^[10,11]

그러나 지하공기의 습도는 80~97%에 이르며, 라돈농도 또한 국제방호위원회 권고 참조준위(1,000 Bq/m³)보다 높게 토출되는 지역도 있어 지하공기를 직접 농업시설에 이용하는 데에 어려움이 있다.^[12,13,14]

이와 같은 지하공기의 특성으로 인하여 히트펌프의 열원으로 간접적으로 이용하는 연구들이 수행되어왔는데 지하공기를 열원으로 직접 이용할 때에 수반되는 고지온 등(2014), 고원빈 등(2014)은 공기 중의 습도를 제거하고 동시에 난방을 목적으로 하는 히트펌프 시스템의 성능을 보고하였다.^[15,16,17]

그밖에도 지하공기를 농업시설에 직접 송풍하지 않고 지하공기와 물을 직접 접촉시켜 지하공기로부터 열을 흡수한 후 이 물을 열원으로 하는 물 대 물 히트펌프 시스템을 개발하고 난방 성능을 분석한 연구가 수행되었으나, 실험실 규모에서 단위로 구성하여 최적 운전조건을 구명하는 연구는 부족한 실정이다.^[18]

본 연구에서는 제주지역 지하공기를 농업시설에 활용하기 위해서 공기-물 직접 접촉식 열교환기를 구비한 히트펌프시스템을 구성하여 성능을 분석하고 열교환기 입구열량을 조절하여 최적 운전조건을 구명하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구는 제주지역 지하공기를 농업시설 난방에 활용하기 위하여 공기-물 직접 접촉식 열교환기(air-water Direct Contact Heat Exchanger, 이하 AWDCHE)를 구비한 히트펌프 시스템을 실험실 규모로 구성하여 최적운전조건을

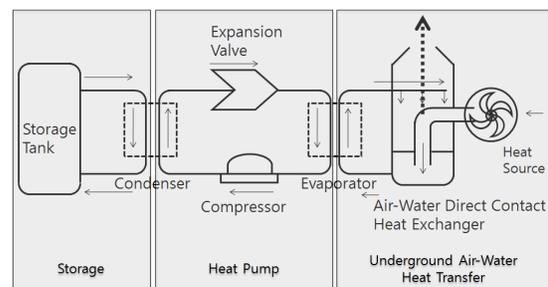


Fig. 1. The schematic diagram of heat pump system with air-water direct contact heat exchanger

구명하고자 하였다. 공기-물 직접 접촉식 열교환기를 구비한 히트펌프 시스템은 Fig. 1과 같이 크게 세부분으로 나뉜다. 공기-물 직접 접촉식 열교환기는 지하공기를 물-물 히트펌프에 적용하기 위해서 지하공기의 열을 물에 직접 열교환하는 방식으로 고안되었다. 히트펌프는 열을 이동시키는 장치로서 지하공기의 열에너지를 농업시설에 이용할 때에 효율적으로 관리 할 수 있게 제어하는 장치이다. 축열조는 히트펌프로 증폭된 열에너지를 물의 형태로 저장하여 야간에 쓸 수 있게 하는 장치이다.

2.1 공기-물 직접 접촉식 열교환기

공기를 물로 열전달하는 방식은 크게 직접 접촉하는 방식과 간접 열전달 방식이 있으나, 본 연구에서는 직접 접촉 방식의 열교환기를 구성하였다. Fig. 2와 같이 열에너지를 보유한 공기는 송풍팬과 변온가능한 히터를 통하여 흡입되어 직접 접촉식 열교환기 내부 하단에 위치한 다공질 배관으로 도달한 후 상향으로 빠져나간다. 직접 접촉식 열교환

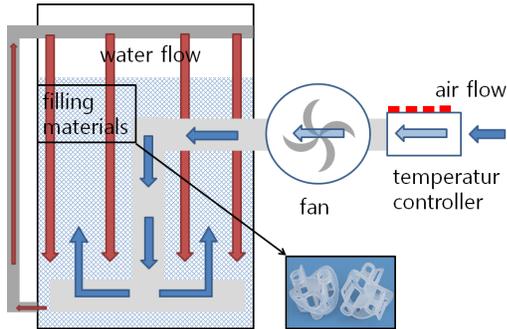


Fig. 2. Concept of air-water direct contact heat exchanger

Table 1. Specifications of air-water direct contact heat exchanger

Items		Specifications
Direct Contact Heat Exchanger Case	Material	Stainless steel
	Size (mm)	Height : 1,200 Diameter : 1,000
Fan		3.75kW
Heater		5kW
Filling materials	Material	polyethylene
	Size (mm)	50×56
	Surface (m ² /m ³)	110
	Weight (kg/m ³)	64

기 내부에는 열교환 효율을 높이기 위해 Fig. 2와 Table 1과 같은 충전재를 채워 넣었으며 충전재까지 물을 채워 넣어 물과 공기를 직접 접촉하여 열교환하게 하였다. 물은 히트펌프의 열교환기 배관으로 들어가 열을 회수한 뒤 직접접촉식 열교환기 상단 샤워장치로 하여금 하단 충전재 측으로 낙하하여 순환되게 하였다. 직접 접촉식 열교환기의 크기는 공기송풍량, 물순환량, 히트펌프 압축기 용량에 따라 크기를 결정하였다. 공기송풍량은 건공기 기준 15°C 일 때 순환수의 결빙을 막기 위해 5°C 이상이어야 한다고 가정하여 온도차를 10°C하였으며, 내부저항으로 인해 풍량이 10% 감소됨을 감안하여 송풍팬의 용량을 결정하였다. 열교환기는 원기둥형으로 제작하였으며 내부수위는 150mm 유지한다고 가정하였으며 200L의 물을 순환하도록 물펌프의 용량을 600W로 결정하였다. 공기 순환 내부 교차 파이프는 직경 150mm PVC파이프로 적용하였으며 물 순환 파이프는 20mm 스테인리스 재질 원형파이프로 구성하였다.

2.2 물-물 히트펌프

히트펌프는 냉매를 압축시켜 열을 이동시키는 장치이며 압축기 용량이 주로 성능을 발휘한다. 히트펌프 압축기 용량은 3RT의 소용량 밀폐형 스크롤 타입으로 결정하였다. 3RT의 용량은 약 40,000kJ/h의 냉동능력이 있으며 증발기와 응축기 온도 증감은 3~5°C임을 감안하여 물 순환량이 2.4m³/h 이상 가능한 물펌프로 결정하여 히트펌프에서 흡수한 열에너지는 물의 형태로 축열조에 저장할 수 있게 하였다. 위와 같이 언급한 총 구성은 Table 2와 같다.

2.3 성능실험방법

직접 접촉식 열교환기의 성능과 이를 구비한 히트펌프의 성능을 분석하기 위하여 온도, 풍속, 유량, 전력을 계측하였

Table 2. Specifications of heat pump

Items	Specification
Refrigerant	R410a
Compressor	2.25kW, Scroll type
Evaporator	Plat plate, Brazing-copper
Condenser	Plat plate, Brazing-copper
Expansion valve	14~175kW

Table 3. Measuring items and location

Measuring items	Material	Location
Temperature	Water	Evaporator inlet and outlet
		Condenser inlet and outlet
		DCHE inlet and outlet
	Air	DCHE inlet and outlet
		Ambient
Electricity	Power consumption	Heat pump
Flow rate	Water	Evaporator inlet and outlet
		Condenser inlet and outlet
	Air	DCHE inlet and outlet

※ DCHE : Direct Contact Heat Exchanger

다. Table 3과 같이 시스템 각 입부에 Pt type 열전대를 설치하여 30초 간격 1시간동안 데이터 로거(MV100, Japan)를 통해 데이터를 수집하였다. 직접 접촉식 열교환기의 공기 입출구를 통과하는 풍속은 풍속계(FVAD 15 S120, Germany)를, 히트펌프의 응축기와 증발기를 통과하는 열전달매체의 유량은 초음파유량계(PT868, Norway)를, 소비전력은 전력계(CW240, Japan)를 이용하여 측정하였다.

열교환기 입구에는 4단 변온 히터를 설치하여 총 5가지 온도로 변온하여 직접 접촉식 열교환기 입구 공기온도에 따라 물 온도차, 열량, 직접 접촉식 열교환기의 효율, 히트펌프 시스템의 성능을 분석하였다. 이와 같이 성능분석하기 위하여 성능계수는 식 (1)을 적용하여 산출하였다.

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

3. 결과 및 고찰

본 연구는 제주지역 지하공기를 농업시설에 활용하기 위해서 공기-물 직접 접촉식 열교환기를 구비한 히트펌프시스템을 실험실 규모(소규모) 용량을 대상으로 구성하였고 직접 접촉식 열교환기 입구온도에 따라 직접 접촉식 열교환기의 성능과 시스템 성능을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

3.1 직접 접촉식 열교환기 입구 공기 온도에 따른 출구 공기온도 변화

직접 접촉식 열교환기 입구 공기 온도에 따른 열교환기 성능을 분석하기 위하여 직접 접촉식 열교환기 출구 공기온도를 Fig. 3과 같이 나타내었다. 직접 접촉식 입구온도가 18.1°C에서 28.5°C까지 증가함에 따라 출구온도는 6.0°C에서 9.6°C까지 일직선으로 증가하였으나 그 이후에 증가폭이 달라짐을 알 수 있었다. 입구 공기온도가 증가함에 따라 보유하고 있는 열에너지는 증가하였으나, 히트펌프의 압축기 용량으로 인하여 회수할 수 있는 한정되어 있으며 높은 열량의 에너지가 투입되어도 그 차이만큼 버려지는 에너지가 증가한 것으로 보인다. 그 이후에 열교환기 입구 공기온도가 증가하여도 시스템에서 회수될 수 있는 에너지 또한 한정되어 있기 때문에 입구공기온도의 열량이 열교환기 내부에 투입되지 않은 것으로 사료된다.

3.2 직접 접촉식 열교환기 입구 공기온도에 따른 출구 물 온도 변화

직접 접촉식 열교환기 성능 분석에 앞서 열교환기 입구 공기온도 변화에 따른 물 입구와 출구 온도 변화는 Fig. 4와 같다. Fig. 3과 유사하게 입구 공기온도가 18.1°C에서 28.5°C까지 상승함에 따라 열교환기 출구 물 온도 즉 히트펌프 증발기 측 입구온도는 6.3°C에서 9.9°C까지 일정하게 상승하였고 히트펌프에서 약 2.5°C가량 회수한 뒤 히트펌프 출구 측 열교환기 입구 물 온도는 3.9°C에서 7.2°C로 일정하게 상승하였다. 직접 접촉식 열교환기 입구 공기온도가 28.5°C까지는 증분량이 일정하였으나, 그 이후에는

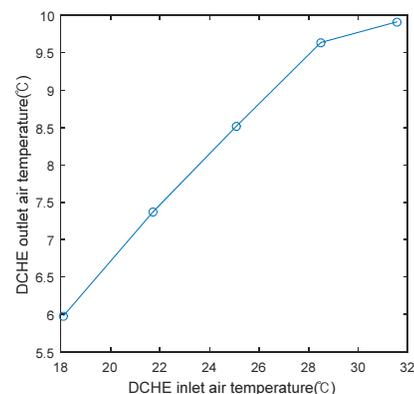


Fig. 3. DCHE outlet air temperature due to inlet air temperature variation

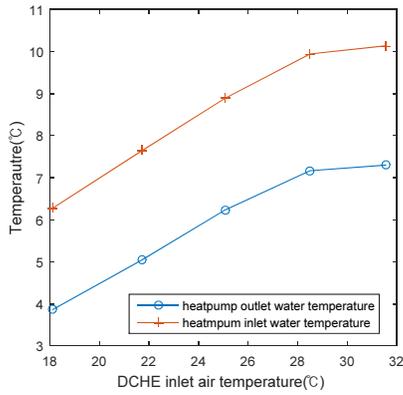


Fig. 4. Heat pump inlet and outlet water temperature due to inlet air temperature variation

급격히 증분량이 감소하였다. 직접 접촉식 열교환기 입구에 높은 열에너지를 함유한 공기가 흡입되어도 열교환기가 투입 될 수 있는 열량은 제한되어 있는 것으로 판단된다.

3.3 직접 접촉식 열교환기의 물과 공기 열량 차이

직접 접촉식 열교환기 성능을 분석하기 위하여 Fig. 5와 같이 직접 접촉식 열교환기에 순환하는 물과 공기의 열량차이를 나타내었다. 입구 공기 온도가 18.1°C에서 31.6°C도 까지 증가함에 따라 히트펌프 입구에 투입한 뒤 회수되어 나오는 출구와의 물 열량차이는 3.5~4.0°C까지 0.5°C 증가한 반면 열교환기 공기 입구와 출구의 열량 차이는 4.5°C에서 7.5°C까지 약 3.0°C의 변화가 나타났다. 열교환기 입구 공기 온도가 증가함에 따라 공기 입구와 출구의 열량 차이는 급진적으로 증가하였는데, 이는 히트펌프의 압축기

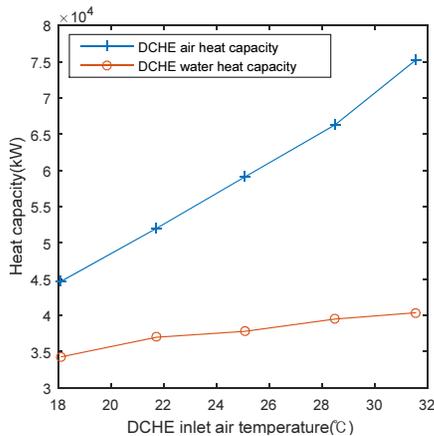


Fig. 5. DCHE inlet air and outlet water heat capacity due to inlet air temperature variation

용량에 따라 회수할 수 있는 열량은 한정되어있어 직접 접촉식 열교환기 출구로 버려지는 공기온도가 늘어남에 따라 열량차이가 늘어난 것으로 사료된다.

3.4 직접 접촉식 열교환기의 효율

Fig. 6은 Fig. 5에서 언급한 물과 공기의 열량차이를 비율로 환산하여 직접 접촉식 열교환기의 효율을 나타낸 것이다. 직접 접촉식 열교환기 입구 온도가 18.1°C일 때 76.8%에서 31.6°C일 때 53.7%까지 감소하였다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 전체 시스템에서 볼 때에 히트펌프의 용량은 한정되어 있으므로 직접 접촉식 열교환기에서 활용할 수 있는 열량은 한정되어있어 나머지 열량이 회수되지 않은 채 버려져서 온도가 올라갈수록 효율이 떨어지는 것으로 사료된다.

3.5 직접 접촉식 열교환기를 구비한 히트펌프 시스템의 성능

공기-물 직접 접촉식 열교환기를 구비한 전체 히트펌프

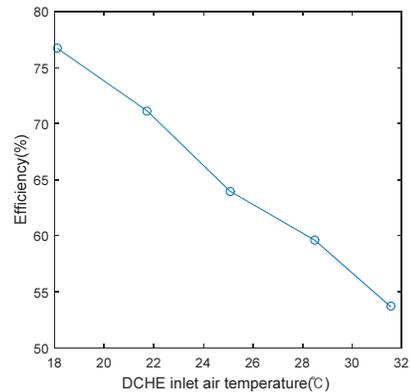


Fig. 6. DCHE efficiency due to inlet air temperature variation

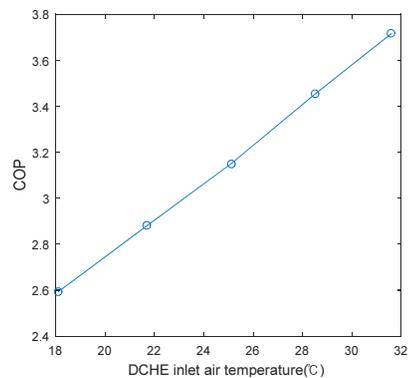


Fig. 7. Heat pump system COP due to inlet air temperature variation

시스템의 성능을 Fig. 7과 같이 나타내었다. 시스템의 성능은 히트펌프 압축기, 물과 공기, 펌프 등의 전력소비량이 포함되어 있는 수치이다. 직접 접촉식 열교환기 입구 공기 온도가 18.1°C에서 31.6°C까지 증가함에 따라 성능계수는 2.6에서 3.8까지 약 온도당 0.08 수준으로 비례적으로 증가하였다. 열교환기와 달리 히트펌프는 성능을 꾸준히 유지하는 것으로 판단된다.

3.6 히트펌프 각 부 열량 변화

직접 접촉식 열교환기 입구 공기온도가 증가함에 따라 히트펌프의 각부 열량 변화를 Fig. 8과 같이 나타내었다. 전력소비량은 8,643kJ에서 온도가 증가할수록 7,950kJ로 약간 감소하였고 열원의 온도가 올라갈수록 증발기와 응축기 열량은 약 3,000kJ 차이로 꾸준히 증가함을 알 수 있었다. 열교환기 입구 온도가 증가함에 따라 히트펌프에서 활용하는 증발기 및 응축기 에너지 대비 히트펌프의 소비전력은 비교적 변화가 적은 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 제주지역 지하공기를 농업시설에 활용하기 위해서 공기-물 직접 접촉식 열교환기를 구비한 히트펌프시스템을 구성하여 성능을 분석하고 열교환기 입구열량을 조절하여 운전조건을 구명하고자 하였다.

직접 접촉식 열교환기 입구 공기 온도가 증가함에 따라

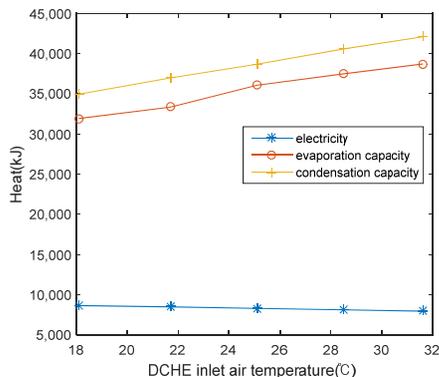


Fig. 8. Heat pump capacity due to inlet air temperature variation

출구 공기온도 및 입출구 물 온도 또한 유사한 증분량으로 증가하였고 이는 히트펌프가 활용할 수 있는 에너지는 한정되어있기 때문에 버려지는 열 또한 증가하는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 구성한 시스템에서는 입구공기온도가 30°C 이상일 때에는 직접 접촉식 열교환기 내부 물과 공기 순환에 회수되지 않았음을 알 수 있었다.

직접 접촉식 열교환기의 입구 공기온도가 증가함에 따라 직접 접촉식 열교환기의 효율은 감소하였는데, 이는 온도가 높아질수록 히트펌프에서 활용할 수 없는 버려지는 열이 증가함에 따라 효율이 감소하는 것으로 사료된다.

따라서 활용하고자 하는 열원의 최저온도를 기준으로 하여 히트펌프 용량과 맞게 열용량을 산정후 설계해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(PJ010872 & PJ006491)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

- [1] Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs, 2016, "2015 Current status of plant vegetables and vegetables produced in vegetable production", Korea.
- [2] Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs, 2015, "2014 Current status of plant vegetables and vegetables produced in vegetable production", Korea.
- [3] Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs, 2012, "ISO Implementation Program", Korea.
- [4] Kang, Y. K., Ryou, Y. S., Kim, J. K., Kim, Y. H., Jang, J. K., 2013, "Analysis on Cooling Effects of the Vertical Type Geothermal Heat Pump System Installed in a Greenhouse for Raising Seedling", Protected Horticulture and Plant Factory, 22(1), 19-25.
- [5] Park, Y. J., Ryou, Y. S., 2009, "A Case Study on the Greenhouse using Geothermal System", International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, 38(1), 61-66.

- [6] Choi, H. C., Park, J. H., Song, J. I., Na, J. C., Kim, M. J., Bang, H. T., Kang, H. G., Park, S. B., Chae, H. S., Suh, O. S., Ryou, Y.S., Kim, T. W., 2010, "Evaluation on Heating Effects of Geothermal Heat Pump System in Farrowing House", *J. of Livestock House and Environment*, 16(3), 205-215.
- [7] Koh, D. Y., Kim, O. J., Choi, S. K., Chang K C., 2005, "A Study on the High Efficiency Ground Source Heat Pump System(1)", *New Renew. Energy*, 1(4), 30-37.
- [8] Jeoung, J. H., 2007, "Drilling Techniques for Geothermal Well and Environmental Impacts", *New Renew. Energy*, 3(4), 16-21.
- [9] Paek, K. N., Song, Y. H., Lee, T. J., Song, S. S., 2015, "A Comparison of Geothermal Energy Utilized by GSHP between Real Monitoring Data and the Design Criteria", *New Renew. Energy*, 11(1), 3-11.
- [10] Sung, M. S., 2007, "Study on the Characteristics and Utilization of Underground Air in Jeju", Ph. D diss., Cheju National University.
- [11] Sung, M. S., 2007, "Utilization of Basal Underground Air in Jeju Island", *J. of Asian agriculture and biotechnology*, 25(1), 51-62.
- [12] Kim, Y. H., Kim, S. M., Lee, D. W., Hyun, M. T., 2013, "A study on the Availability of Underground Air for Heating/Cooling Energy in Volcano-Stratigraphic", *J. of the Korean Society for Power System Engineering*, 17(6), 137-142.
- [13] Kim, Y. H., Park, S. S., Kim, W. J., Kim, N.J., Hyun, M. T., 2014, "An Experimental Study on the Availability of Underground Air Energy Source in Non-Activity Volcanic Island", *J. of the Korean Solar Energy Society*, 34(5), 73-80.
- [14] Kang, T. W., Song, M. H., Kim T. H., Jang, B. Y., Kim, Y. J., Kim, G. H., Park, J. W., 2012, "A Preliminary Investigation of Radon Concentration for Some Agricultural Greenhouses in Jeju Island", *Korean Journal of Environment Agriculture*, 31(1), 9-15.
- [15] Ko, J. W., 2013, "A study on the Heat Pump System with Dehumidification Function for the Heat Utilization of the Underground Air", A master's diss., Cheju National University.
- [16] Ko, J. W., Park, Y. C., Ko, G. S., 2014, "An Experimental Study on a Heat Pump with Dehumidification Function that Utilizes Underground Air Heat", *Korean J. of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 26(2), 55-60.
- [17] Ko, W. B., Ko, J. W., Park, Y. C., 2014, "Study on the Performance of a Heat Pump System with Serial Dehumidification Function", *J. of the Korean Society of Marine Engineering*, 38(6), 609-614.
- [18] Kang, Y. K., Lim, T. S., 2016, "The Analysis of Heating Performance of Heat Pump System for Agricultural Facility using Underground Air in Jeju area - Focused on the Jeju Area -", *J. of Ecological Architecture and Environment*, 16(6), 43-48.