



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



박사학위논문

발전소 폐열원 열펌프 시스템의  
시설원에 적용

제주대학교 대학원

원예학과

허태현

2012년 2월



# 발전소 폐열원 열펌프 시스템의 시설원에 적용

지도교수 소인섭

허태현

이 논문을 농학 박사학위 논문으로 제출함

2012년 2월

허태현의 농학 박사학위 논문을 인준함

심사위원장

송근식

위원

박은철

위원

유영선

위원


조영열

위원

蘇寅燮

제주대학교 대학원

2012년 2월



On the Application of the Heat Pump System  
to Facility Horticulture, Using Hot Waste  
Water from Power Plants

Tae-Hyun Huh

(Supervised by Professor In-Sub So)

A thesis submitted in partial fulfillment of the  
requirements for the degree of Doctor of Agriculture

2012. 2

Department of Horticulture  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 目 次

목 차 .....	i
Abstract .....	iii
List of Table .....	viii
List of Figures .....	x
I. 서 언 .....	1
II. 연구사 .....	4
1. 발전소 온배수에 대한 연구 .....	4
2. 시설원에 열펌프 시스템 이용에 대한 연구 .....	6
III. 재료 및 방법 .....	11
1. 대한민국 화력발전소 온배수 온도 및 열 에너지량 조사 .....	11
2. 발전소 온배수 열에너지 이용 시설원에 냉·난방 장치 실험 .....	11
1) 금속재질의 열회수장치를 활용한 냉·난방시스템 실험 .....	13
2) PE파이프 열회수장치를 활용한 효율성 검증 .....	13
3. 발전소 온배수 열에너지 공급 성능평가 .....	13
4. 경제성분석 .....	14
IV. 결과 및 고찰 .....	16
1. 대한민국 화력발전소 온배수 온도 및 열 에너지량 조사 .....	16
1) 발전소 온배수 배출량 및 배출수온 .....	16
2) 제주지역 내 발전소 폐열 부존량 조사 .....	17



## Abstract

This study has been conducted with the purpose to demonstrate the economic value of utilizing the enormous heat energy carried in the hot waste water from power plants by comparing the benefit from using hot waste water against that from using geothermal energy in widespread application under the Korean government's policy. It is expected that the findings from this study would lead to drastic savings in the heating/cooling expenses of the facility horticulture and help meet the government's green-growth policy by reducing the CO<sub>2</sub> emission.

In Korea, power generation of 1 Twh emits, on average, 138 million tons of hot waste water, annually totalling to upwards of 47.73 billion tons. On Jeju's coast, 230 million tons of hot waste water, equivalent to the energy of about 143,000 TOE, is discharged every year. Temperature of the hot waste water from the Namjeju Thermal Power Plant was observed to be 25~28°C in Winter(lowest in February), 32~35°C in Summer(highest in September). Annual sum of hot waste water discharged from all the power plants in Korea is estimated at over 388,000GWh. Energy of 13,217GWh is used every year on heating greenhouses(13,000ha of facility horticulture, light oil consumption of 1,256,000kl), accounting for 3.4% of the waste heat from power generation. The acreage of facility horticulture potentially benefitted by hot waste water has been estimated at 1,028ha for 20°C heating, and at 631ha for 24°C heating on jeju.

Considering the corrosion caused by seawater, the heat retrieval system used metal pipes of SUS 316 quality, weighing 1,950kg, with a capacity of

300,000 Kcal/hr, and was manufactured for the use with 90RT. Test plant was constructed on July 27, 2010 and was test run for 6 months until February 28, 2011, turning out to show a smooth operation and a high efficiency in heat use and economy. But some troubles have been identified in that the maintenance is not handy because the heat retrieval system is installed in the hot water tank, and that the chain hooks holding, and the mount supporting, the heat retrieval system are corroded by seawater and thus dislocated off the fixed part.

A PE-pipes heating and cooling system for facility horticulture was developed and tested for efficiency, compared to the existing metal-pipes system, in order to retrieve the heat in the waste water from a power plant and to use it efficiently. Total length of the used PE pipes was 2,800m. Temperature measurements of the water at the inlets of the evaporator and the condenser in the system of 30RT scale.

The experimentation was carried out through the help from the watt-hour meters, flow meters and temperature sensors installed on the 115kw-unit heat pump system. Analysis of the obtained data disclosed that the evaporated heat was equivalent to 108.1kw, condensed heat was 144.9kw, electricity consumption was 37.2kw and the heating efficiency coefficient was 3.9 when the temperature of the heat media was 21.3°C at the inlet to the evaporator and 45.3°C at the inlet to compressor.

Efficiency was thus validated. The use of PE pipes solved the corrosion problem, and reduced the manufacturing cost by more than 27%. It is also believed that the hot water tank, if installed in a farm, can enlarge the heat retrieval system and facilitate frequent maintenance work.



During the period of study from Nov 1, 2010 to Jan 31, 2011, the lowest outside temperature was  $-5.1^{\circ}\text{C}$  in Jan 2011 around Hwasoon-ri, Andeok-myeon. The lowest temperature inside the heat storage was  $43.6^{\circ}\text{C}$  in November 2010,  $45.0^{\circ}\text{C}$  in December 2010, and  $44.2^{\circ}\text{C}$  in January 2011. It thus stayed stable regardless of the fluctuation in the exterior temperature and the amount of energy used in the mandarine or mango greenhouses. When the outside temperature was  $-5.1^{\circ}\text{C}$ , the lowest temperature inside the mango greenhouse stood at around  $22^{\circ}\text{C}$ , the same as on the other days. This point demonstrates that the system is able to hold a stable temperature in the greenhouse regardless of that outside.

The result of this experimental study showed that the system using hot waste water has many strengths resulting from easy control of the temperature in the green house unrestricted by the high or low outside temperature. It enables to keep the inside temperature at an adequate level to the floral differentiation of the plant and growth phase of the fruit, to control harvest time, to better the artificial coloration with low-temperature treatment in a relatively hot season. It proved to be a system which can lighten the farmers' burden by enabling them to operate the heating system with 13% of the expense needed by the use of light oil, and thus yield high income though the quickened-growth shipment.

The growth diary in year one of the mandarine in the greenhouse heated with hot waste water goes like this. Started heating on November 15, began to flower on November 27, was in full bloom on December 2, and mature ready for harvest late June. 13 tons of early satsuma mandarine were harvested from an acreage of  $3,050\text{m}^2$ .

An experimental test was run on the mango greenhouse which contained 2-year-old apple mango trees of Irwin variety planted in the  $200\ell$  plastic boxes on an acreage of  $2,215\text{m}^2$ . New shoots shot up 4.9 times a year, began

to bud on Dec. 11, began to flower on Nov 3, and got mature on Nov 15. Harvest time has thus been accelerated by more than a year compared to that in normal farming.

Electricity of 226,641 kwh was consumed, leading to the electric bills of 9,975,124 won, by the heating and cooling system using hot waste water for the greenhouse of 5,265m<sup>2</sup>(3,050m<sup>2</sup> for early satsuma mandarine, and 2,215m<sup>2</sup> for apple mango) for 5 months from Dec 15, 2010 to Feb 28, 2011. By contrast, the consumption of tax-free light oil amounted to 76,013 L in the system providing the same amount of energy in the form of hot air. The energy bill was calculated to be 76,013,000 at the price of 1,000 won per liter. This calculation offers 87% of cost-saving rate reaped by this heating system, compared to that of a system consuming tax-free light oil.

The study of cost/benefit analysis and pay-back period for the facility cultivation of paprika showed the pay-back period to be 3.19 years for the system using hot waste water. This figure is 1.34 years (25%) shorter than that gained by the system using geothermal energy.

It has been estimated that CO<sub>2</sub> emission can be reduced by 306.3 tons every year if hot waste water replaces light oil for the facility horticulture in a greenhouse of 1ha.



## List of Tables

<b>Table 1.</b> Examples of the agricultural use of hot waste water in overseas countries .....	10
<b>Table 2.</b> Emission of hot waste water by power plants on the Korean coasts .....	18
<b>Table 3.</b> Estimation of the waste heat in hot waste water in Jeju Island ..	19
<b>Table 4.</b> Power plants in Jeju Island .....	19
<b>Table 5.</b> Monthly average temperature of the hot waste water from Namjeju Thermoelectric Power Plant .....	20
<b>Table 6.</b> The low extreme temperature in the climatic data on Seogwipo City .....	24
<b>Table 7.</b> Estimation of the maximum heating load of the experimental greenhouse depending on the temperature outside .....	24
<b>Table 8.</b> Heating load of desired temperature on Seogwipo City .....	25
<b>Table 9.</b> Potential acreage of facility horticulture heated by the hot waste water from power plants in Jeju Island .....	25
<b>Table 10.</b> Properties of air, soil and water .....	28
<b>Table 11.</b> An example of construction of a heating system using seawater	28
<b>Table 12.</b> Specifications of a heat recovery system .....	29

<b>Table 13.</b> Test on the heat pump in the heat retrieval system using PE pipes .....	41
<b>Table 14.</b> Production and installation costs of the heat retrieval system .....	42
<b>Table 15.</b> Daily temperatures of the water coming in and out of the heat pump in November 2010 .....	45
<b>Table 16.</b> Daily temperatures of the water coming in and out of the heat pump in December 2010 .....	46
<b>Table 17.</b> Daily temperatures of the water coming in and out of the heat pump in January 2011 .....	47
<b>Table 18.</b> Dates of major growth stages of Satsuma mandarin grown under the hot water heating system .....	51
<b>Table 19.</b> Comparison of arriving dates at the major growth stages affected by different heating systems for mango .....	54
<b>Table 20.</b> Cost/benefit analysis of the heat pump using hot waste water .....	57
<b>Table 21.</b> Investment cost into the pipeline system using hot waste water from power plant .....	59
<b>Table 22.</b> The effect on the reduction in CO <sub>2</sub> emission reaped by the use of hot waste water from power plants .....	60



## List of Figures

<b>Fig. 1.</b> The view of Korea Southern Power Plant and the laboratory for the experiment on the use of hot waste water .....	15
<b>Fig. 2.</b> Power generation system of the thermal power plant No. 3 and 4 in Namjeju Thermoelectric Plant .....	17
<b>Fig. 3.</b> Ambient air, sea water and hot waste water temperature(°C) on Seogwipo City(2010) .....	21
<b>Fig. 4.</b> Heat storage tank under construction .....	26
<b>Fig. 5.</b> Completed heat storage tank .....	26
<b>Fig. 6.</b> Fin and tube arrangement heat exchange system (300,000 Kcal/hr) under assembly .....	30
<b>Fig. 7.</b> Photo of the heat exchange system .....	30
<b>Fig. 8.</b> Installation of the pipelines to convey saltwater .....	31
<b>Fig. 9.</b> A heating/cooling system for facility horticulture using hot waste saltwater (for experimental purpose) .....	33
<b>Fig. 10.</b> Floor plan for farm facilities using hot waste water .....	33
<b>Fig. 11.</b> Corrosion 1 of the heat retrieval system in the hot waste water tank used for the experiment .....	35
<b>Fig. 12.</b> Corrosion 2 of the heat retrieval system in the hot waste water tank used for the experiment .....	35

<b>Fig. 13.</b> A draft of a heating and cooling system for facility horticulture using hot waste saltwater .....	38
<b>Fig. 14.</b> Temperature distributions of heat transfer fluid(water) passing through evaporator and condenser when PE pipes are used for heat exchange in heat pump system of 104kw .....	39
<b>Fig. 15.</b> System COP and heat flow rates of evaporator and condenser when PE pipes are used for heat exchange in heat pump system of 104kw .....	40
<b>Fig. 16.</b> Temperature fluctuations in the heat storage tank in response to the exterior temperature (November 2010, °C) .....	43
<b>Fig. 17.</b> Temperature fluctuations in the heat storage tank in response to the exterior temperature (December 2010, °C) .....	43
<b>Fig. 18.</b> Temperature fluctuations inside the heat storage tank in response to the exterior temperature (January 2011, °C) .....	44
<b>Fig. 19.</b> Effect of hot waste water on the temperature inside the mandarine greenhouse(November 2010, °C) .....	49
<b>Fig. 20.</b> Effect of hot waste water on the temperature inside the mandarine greenhouse(December 2010, °C) .....	50
<b>Fig. 21.</b> Effect of hot waste water on the temperature inside the mandarine greenhouse(January 2011, °C). .....	50
<b>Fig. 22.</b> Effect of hot waste water on the temperature inside the mango greenhouse (November 2010, °C) .....	53
<b>Fig. 23.</b> Effect of hot waste water on the temperature inside the mango greenhouse (December 2010, °C) .....	53

<b>Fig. 24.</b> Effect of hot waste water on the temperature inside the mango greenhouse (January 2011, °C) .....	54
<b>Fig. 25.</b> Effectiveness of hot waste water and tax-free oil .....	56
<b>Fig. 26.</b> Legend .....	74
<b>Fig. 27.</b> List of equipment .....	75
<b>Fig. 28.</b> Concept modules of the system .....	76
<b>Fig. 29.</b> Layout of the facilities .....	77
<b>Fig. 30.</b> Floor plan of the machine room for the heat pump .....	78
<b>Fig. 31.</b> Detail plan around of hot waste water tank .....	79
<b>Fig. 32.</b> Floor plan of the area A in the greenhouse .....	80
<b>Fig. 33.</b> Floor plan of the area B in the greenhouse .....	81
<b>Fig. 34.</b> Exterior plan of the heap pump .....	82
<b>Fig. 35.</b> Detail plan of the heat exchange system (using metal pipe) .....	83
<b>Fig. 36.</b> Detail plan of the radiator .....	84

## I. 서 언

현대사회에서 인류가 해결해야 할 과제중의 하나가 심각한 에너지 문제와 지구 온난화 현상이라고 할 수 있을 것이다. 지구의 일부분인 화석연료를 계속 사용함으로써 화석에너지 고갈이라는 문제와 지구온난화 문제가 동시에 야기되고 있으며, 시설농업에서도 난방용으로 주로 사용하는 탄소를 포함한 화석에너지를 연소시킬 때 많은 량의 CO<sub>2</sub>를 방출하며 이것이 CH<sub>4</sub>(메탄)이나 N<sub>2</sub>O(아산화질소) 같은 다른 가스와 함께 전 지구의 온난화를 초래하고 있는 것이다.

시설농업에서 최대 현안과제는 화석연료 사용에 따른 CO<sub>2</sub> 배출과 난방비용 문제이다. 우리나라의 시설농업 난방비용은 연간 1조 4,426억원(2008년)에 달하고 있다. 시설농업 경영비중 난방비가 차지하는 비율은 시설작물에 따라 다소 차이는 있으나 30~50%로 일본의 20%, 네델란드의 14~15%, 이스라엘의 10%에 비하면 난방비가 차지하는 점유율은 매우 높은 편이다(농촌진흥청, 2010).

우리나라에서 현재 농업용으로 공급되고 있는 석유류는 한시적으로 세금이 일부 면제되어 일반 과세가격 대비 휘발유 46%, 경유 56%, 실내등유·보일러등유·중유(병커-C)는 82~89% 수준으로 공급되고 있으나(농협중앙회, 2008), 국가 지원 면세비율이 점차 줄어들고 있는 실정으로 난방에 따른 경영비 상승으로 인한 시설농가 경영에 어려움을 더하고 있는 실정이다. 국제유가가 배럴당 100\$일 때, 경영비는 12% 증가하고 반면에 소득은 14% 감소될 것으로 예상되므로(농촌진흥청, 2010) 화석에너지를 대체할 수 있는 신·재생에너지의 농업적 활용에 대한 기술개발과 경영비의 큰 부분을 차지하는 난방비를 줄이는 기술개발이 무엇보다 중요한 당면 해결과제이다.

현재까지 시설농업에서 화석연료의 사용은 필수적이며 우리나라 농업부분에서 발생하는 CO<sub>2</sub>는 대부분 시설농업 온실에서 배출한다. 우리나라의 온실면적은 국민소득 증가에 따른 겨울철 신선채소의 소비수요 증가와 수출확대 등에 따라 1990년 25천ha에서 2000년 51천ha로 약 두 배 이상 증가한 후 2010년 현재는 52천ha 정도를 유지하고 있다(농촌진흥청, 2010).



우리나라 가온 재배면적은 13천ha 전체 온실의 25% 수준으로 온실난방은 주로 석유류에 의존하고 있으며 석유류 중에서는 95%를 경유로 사용하고, 중유는 4%, 기타 1%정도 사용하고 있다. 우리나라 화석연료 공급량은 경유 1,566천kl, 중유 79천kl이며, 농업용 온풍난방기는 2000년 127,557대에서 2008년에는 180,317대로 급격히 증가하는 추세에 있다(한국농촌경제연구원, 2007).

뿐만 아니라 화석연료 난방기 불연소 가스 발생에 의한 피해사례가 빈번히 발생하는 등 화석연료를 대체할 수 있는 농업용 에너지공급 자원 발굴이 절실히 요청되고 있다.

2006년 보스턴보고서에 의하면 기후변화로 인한 경제적 손실은 매년 세계 GDP의 5~20%에 달할 것으로 예상하고 있다. 이와 같은 문제점으로 인하여 세계 각국은 교토의정서를 만들어 CO<sub>2</sub> 배출량을 1990년 대비 평균 5.2% 감축할 것을 규정하고 있다. 2020년까지 세계 7대 녹색 강국을 지향하는 우리나라는 온실가스 배출 감축목표를 UN 권고 수치 중 최고 수준을 따라 2020년 배출 전망치(BAU) 대비 30% 감축하기로 2009년 코펜하겐 기후변화회의에서 자발적으로 발표하였다. 이는 5억 6,900만톤으로 2005년 발생량 5억9,400만톤의 4% 감소 수준에 해당된다(이, 2011).

정부는 이를 달성하기 위하여 총량제한방식 탄소배출권 거래제의 법적·제도적 기반이 되는 ‘저탄소 녹색성장 기본법’을 제정하였고(2010년 1월), 환경부 고시 제 2011 - 14호(2011년 2월 17일)로 ‘지역단위 온실가스 배출권 거래제도 시범사업 운영규정’ 발표하여 광역자치단체별로 온실가스 배출량을 제한하고 탄소배출권 거래시장이 활성화 될 수 있도록 하는 등 온실가스 배출 규제에 적극적으로 나서고 있다.

위와 같이 화석에너지 사용의 문제점으로 볼 때 지열, 해수열, 태양열 등을 활용한 자연순환형 대체에너지 개발 필요성이 갈수록 커지고 있다. 신·재생에너지의 농업적 활용기술은 미국 등 선진국을 중심으로 지열히트펌프 기술이 실용화되었고 우리나라에서도 정책에 반영되어 시설농업에 급속하게 보급이 이루어지고 있는 것은 매우 다행스럽고 희망적인 발전이라고 할 수 있겠다.

태양열의 농업적 활용에 대해서는 태양열 에너지 밀도가 낮고 기상상황에 따라 집열량 변동이 심하며, 여름과 겨울철의 온도 변화폭이 매우 커서 그로인한

수축팽창, 고온에 의한 부식, 동파 문제(강 등, 2004) 등으로 아직은 기술개발 단계에 있는 것으로 보이며 앞으로 효율적인 집열 시스템과 축열재 등이 지속적으로 개발 보완되어야 할 것으로 사료된다.

본 연구는 발전소 온배수 열에너지를 시설농업에 효율적으로 이용하기 위한 열펌프 시스템의 시설원에 적용이다. 화력발전소나 원자력발전소는 화석연료나 원자력연료로부터 얻어진 고압증기로 증기터빈을 돌려 전기를 생산하고 다시 바닷물 냉각수로 증기를 식히는 시스템으로 필수적으로 온배수가 필요하다. 현재의 기술상 발전소 열효율은 원자력 34% 및 기력 40%내외이기 때문에 공급 에너지의 60~66% 가량은 전기로 전환되지 않고 온배수 등으로 자연환경에 방출된다. 우리나라 전체 온배수량은 연간 473.3억톤(해양수산부, 2006년)으로 이는 우리나라 연간 강수량의 절반에 가까운 양이며, 우리나라 전 국민이 사용하고 있는 수도물보다 더 많은 양이라 할 수 있다. 또한 온배수 배출에 의한 바다 수온 상승으로 해양생물에 피해를 줌으로서 주변 어민들의 민원이 끊이지 않는 반면, 온배수의 열에너지가 이용되지 못하는 점은 매우 안타까운 일이다.

이러한 점에 착안하여 일부에서 시설농업에 발전소 온배수를 이용할 수 있는 방법을 찾고자 노력하여 왔으나 아직까지는 실용화 사례가 없는 실정이다. 발전소의 겨울철 온배수 온도는 20~28℃ 정도로 비교적 낮은 수준으로 온배수열을 직접 이용하기 어려웠기 때문인 것으로 생각되지만, 발전소 온배수 열에너지는 지열·해수열·하천수열 등 자원보다 매우 높으며 배출량 또한 매우 많기 때문에 열펌프 장치를 활용하면 매우 좋은 자원이 된다.

따라서 본 연구에서는 최근 우리나라 국가시책에 반영되어 활발하게 보급되고 있는 지열에너지와 온배수열 에너지의 이용 효과를 비교 분석하여 많은 열에너지 자원인 발전소 온배수를 시설농업에 효율적 활용효과를 밝힘으로서 시설농가 냉·난방에 따른 경영비를 대폭 줄이고, CO<sub>2</sub> 발생을 감소시켜 국가의 저탄소 녹색성장 정책에 부응하는데 목적을 두고 수행하였다.

## II. 연구사

### 1. 발전소 온배수에 대한 연구

발전소 온배수란 화력발전이나 원자력발전에서 사용된 증기를 물로 응축시켜 재사용하기 위하여 다량의 냉각수를 필요로 하고, 이 과정에서 온도가 상승된 물이 주변으로 방출되는 냉각수를 온배수(溫排水, thermal effluents 또는 thermal discharges)라 부른다. 이렇게 주변에 방출되는 열을 폐열(廢熱, waste heat)이라 부르며, 이러한 손실을 '경제상 낭비보다는 기술상 낭비'라고도 한다. 최근에 건설된 발전소의 경우 열효율 40%, 증기온도 550℃, 압력  $10.3 \times 10^6 \text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 열소비를 2,200kcal 조건에서 정상적으로 가동한다고 하면 880kcal가 전기에너지로 전환되고 1,400kcal의 열에너지는 방출된다고 하였다(김, 2000).

발전소를 비롯한 대규모 임해공단에서 발생하는 폐열 처리에 있어 가장 간편하고 경제적인 방법은 해수를 냉각수로 사용하는 관류냉각방식(once through cooling system)으로 세계의 모든 연해국가에서 사용되고 있다. 관류냉각방식에서는 펌프를 사용하여 자연에서 취수된 해수를 복수기(condenser)로 보내어, 이곳에서 폐열을 부하시킨 후 다시 바다로 되돌려 보내진다.

관류냉각방식에 있어 복수기의 설계치에 따라 다소차이는 있지만 복수기 양쪽 끝에서의 온도차이( $\Delta T$ )는 저온복수기(low temperature condenser)가 6~11℃ 범위이고, 고온복수기(high temperature condenser)는 14~17℃ 범위이다. 우리나라에서는 통상 저온복수기를 사용하고 있지만 최근 고온복수기를 사용하는 발전소가 점차 증가하고 있으며  $\Delta T$ 는 14℃내외로 조절하고 있다. 온배수는 자연에서 취수한 물에 인위적으로 열에너지가 첨가되어 자연해수의 수온만 높여준 상태로 열에너지 이외에 어떠한 물질도 폐열처리 과정에서 첨가되지 않고 다시 자연

으로 배출되는 깨끗한 물을 말한다.

미국의 경우 자연에서 취수되는 모든 물의 50%정도가 발전소 냉각수로 사용되고 있다(Rute and Silvia, 2006). 담수자원이 부족한 우리나라에서는 발전소와 같은 대규모 열기관에서 사용할 수 있는 냉각재로는 해수가 유일하며, 이러한 사정으로 모든 대규모 발전단지는 필연적으로 해안가에 위치하고 있다.

우리나라 발전설비별 전력생산량은 화력발전이 62.3%, 원자력발전이 35.5%로 온배수를 사용하는 관류냉각방식 발전량이 97.8%를 점유하고 있다. 발전소 온배수는 31개 발전소에서 연간 473.3억톤, 제주지역에는 남제주화력발전소와 삼양화력발전소에서 연간 2.4억톤이 바다에 배출되며 버려지는 에너지는 연 143.100toe로 보고되고 있다(제주특별자치도, 2008).

원자력발전은 기력발전과 발전개념이 동일하지만 사용되는 연료가 화석연료가 아니고 핵연료라는 점이 다른 점이며, 안전상의 문제로 외부와 완전히 밀폐된 원자로 안에서 핵분열로 얻은 에너지를 보일러로 보내어 고온, 고압 증기를 생산한다. 냉각수는 기력발전소와 같이 독립된 관을 따라 흐르며 복수기에서 수증기를 응축시킨 후 온배수로 배출된다.

즉, 냉각계통은 원자로와 완전하게 분리되어 있기 때문에 정상적인 가동조건에서 온배수가 방사능에 노출될 염려는 없다. 원자력발전의 열효율은 약 33~36% 내외이며 굴뚝으로 배출되는 폐열이 없어 기력발전에 비하여 다소 많은 양의 온배수를 배출한다. 원자력발전소의 열효율을 36%로 가정할 때, 냉각계통으로 처리해야 할 폐열량은 약 64%이다. 온배수  $\Delta T$ 를 7°C기준으로 할 때 1kwh의 전력을 얻기 위하여 일반 기력발전 온배수량은 0.1톤이고 원자력발전소에서 배출되는 온배수량은 약 0.16톤이다.

우리나라의 총 전력생산의 약 36%를 생산하는 4개 원자력발전소에서 배출한 온배수는 총 227.2억톤으로 전체 온배수 배출량의 50.7%를 배출한 것을 감안할 때 원자력발전소가 가장 큰 온배수 배출원임을 알 수 있다.

유엔해양법협약(UN Convention on the Law of the Sea, 1994)에는 “해양환경의 오염은 직·간접적으로 인위적으로 해양환경으로 유입되는 물질 또는 에너지로서 해양생물에 해롭거나, 해양의 쾌적한 이용을 저해 시키는 것”으로 온배수를 오염물질로 규정하였다. 우리나라의 규제기준은 배출구에서 최대 허용수온은 3

5℃까지이며 하절기에는 전지역이  $\leq 7^{\circ}\text{C}$ 이고 동해안은  $\leq 12^{\circ}\text{C}$ , 서해안은  $\leq 15^{\circ}\text{C}$ 로 규제하고 있으며 봄철과 가을철은 수온의 변화에 따라 연동적으로 조절토록 규제를 하고 있다. 최근 온배수와 관련된 선진 각국의 동향을 보면, 온배수를 오염물질로 규정하여 관련규제가 점차 강화되고 있다.

배출되는 온배수는 높은 온도로 자연해수보다 밀도가 낮기 때문에 표층에 떠서 조류의 흐름에 따라 흐른다. 배출구에서의 유속으로 온배수는 일정한 거리까지 직진하지만 조석류를 따라 점차 연안 쪽으로 만곡되어 흐른다. 점차 확산되면 수온이 감소하지만 중앙부로 갈수록 외부해수와 희석률이 감소하여 일정범위의 온도상승 영역 즉, 온배수확산구역을 형성하게 된다(이순길, 2008). 온배수확산구역은 주변해역과의 수온평형이 깨진 상태이며 해당 범위 내에서 필연적으로 해양생태계 변화를 동반한다. 냉수성 종들과 협온성 종들은 높아진 주변수온에 적응하지 못하고 점차 도태된다. 온배수 배출로 도태된 해양생물이 수산업적으로 중요한 종이라면 바로 수산업 피해로 이어지며, 수산업적으로 중요하지 않은 경우라도 2차적으로 수산업 종에 영향을 줄 수도 있다.

우리나라에서 처음으로 대단위 발전소가 해안가에 세워진 1970년대 초부터 최근까지 주요 온배수 배출업인 발전회사와 어민간의 분쟁이 끊이지 않고 있다. 1980년 이후 2005년까지 각 발전회사에서 지불한 피해보상액은 약 3,230억원으로 원자력 부분이 약 1771억원, 화력부분이 약 1,459억원이었다. 원자력부분에서는 영광원자력이 1,681.3억원으로 가장 많은 피해보상액을 지불하였다. 지불 대상은 온배수 확산구역 내에서의 어업권 소멸에 따른 보상이 대부분을 차지하였다(이, 2008).

## 2. 시설원에 열펌프 시스템 이용에 대한 연구

지열·해수열·온배수열 등 저열원을 이용하는 데 핵심적인 역할은 “열펌프”이다. 열펌프 사이클은 냉매가 지열·해수열·온배수열을 흡수 증발하면 → 압축되

면서 고온고압(압축기)이 되고 → 온수·온풍으로 열을 방출하면서 응축되고(응축기) → 팽창되어 저온저압(팽창변) 과정을 거치면서 일반적으로 사용한 전기 에너지의 3~6배의 에너지를 방출하게 되는 시스템이다.

Heat Pump는 100년 이상 검증된 기술로서 효율이 높고 환경문제가 적게 발생하는 장점이 있는 것으로 알려져 있다. Ball(1983)에 따르면 1912년 스위스의 Heinrich Zoelley가 처음으로 특허를 출원하면서 대지를 열원으로 하는 히트펌프가 시작되었다고 한다. 1990년대에는 Kavanaugh, Bose, Rafferty 등이 지열히트펌프 배관설비에 있어서 유량에 대한 파이프 압력강하, 각종 부속류의 에너지 손실을 측정하기 위한 모듈을 만들어 지열원 히트펌프 이용을 촉진시키는 등 유럽을 포함한 북미, 일본 등에서 지열을 이용한 각종 열원시스템에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 특히 시스템과 관련하여 미국은 S.S Department of Energy 와 NREL의 지원아래 Geothermal Energy Program이 활발히 진행되고 있으며, 미국 내 대학(Oklahoma state Univ.)과 연구소(Geothermal Bore Technologies)등에서도 미국정부 지원 아래 보급형 열펌프 개발에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

Kavanaugh와 Rafferty(1997)는 지열히트펌프의 설계에 대한 기준을 제시하였고, 많은 설치사례들에 대한 자료를 엔지니어들에게 보급함으로써 지열히트펌프 이용을 촉진시키고 있다. 지열원 히트펌프시스템이 1995년 이후 59%의 성장을 보였고 매년 9.8%씩 증가를 보여 왔으며, 미국과 유럽 국가들이 2000년 초까지 세계적으로 공급한 지열히트펌프 시스템은 약 50여만 대인 것으로 조사되었다고 보고하였다.

일본에서는 홋카이도 지역에 겨울철 도로 해빙을 위하여 총 4km를 발전소 온배수 배관시설 사례가 있다고 하였다(김 등, 2009).

압축식 열펌프의 국가별 특허 출원비중은 전체 5,143건에서 일본이 전체건수의 54%, 미국이 25%, 우리나라가 21%를 차지하고 있어(김 등, 2005) 우리나라에서도 지열 히트펌프 시스템에 대한 연구가 비교적 활발하게 이루어지고 있다.

이(1979)는 지열에너지 자원과 전망을 국내에 소개하였고, 김(2005)은 온실 난방을 하기 위한 엔진구동 지열히트펌프를 적용하기 위해서 군산과 진주에서 토양온도특성을 파악하였다. 그는 10년 동안의 지중온도 관측 자료를 이용하여 토



양의 열확산계수를 구하고 지중온도 예측을 수행하였다. 김 등(2005)은 HFC-134a를 냉매로 하는 엔진구동 지열히트펌프를 제작하여 지열원은 물, 고열원은 공기로 하여 시스템 성능을 분석하였으며, 히트펌프를 이용할 경우 중유 보일러보다 저온의 온수 또는 온풍을 이용하는 것이 바람직하므로 중유난방기에 비해 온수배관의 방열면적이나 온풍량을 많게 하여야 하며, 이것은 온실 내 온도분포를 균일하게 하고 적당한 공기유동을 유도하는 측면에서 장점일 수 있다고 하였다.

강 등(2005)은 지열을 열원으로 하는 열펌프 시스템을 개발하기 위해 압축기 용량 7.5 kw, 지중온도를 겨울철 지중 2m, 4m의 평균지온 10~15°C, 시설내부의 공기온도를 15°C로 초기 입력조건을 설정하여 시뮬레이션을 수행하고 열펌프 시스템의 최적설계에 필요한 관련인자의 영향과 아울러 열펌프 시스템의 성능계수를 분석하였으며 지열히트펌프에 의하여 건물을 냉·난방할 경우, 난방시에는 최고 73%까지 냉방시에는 평균 45% 정도의 에너지 절약 효과가 있는 것으로 보고하였다. 또한 강(2005)은 지열히트펌프 열원으로 지하수를 사용함으로써 히트펌프 COP 및 전체 시스템 효율 역시 우수한 값을 갖는 것을 확인하였다고 보고하였다.

최근 농촌진흥청 국립농업과학원에서 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 소재의 열교환 파이프를 온실의 지하 3m부위에 매설하여 지열을 회수하는 슬린키타입의 축열식 수평형 지열히트펌프 시스템을 세계 최초로 실용화하여 정부 시책에 반영 전국적으로 확대보급하고 있다(유 등, 2008).

해수열을 양식장에 활용한 연구는 장 등(2008)이 R410A-R134a 냉매의 실증용 열펌프를 설계 제작하여 현장실증 시험을 실시한 결과 하계기간 해수온도가 19.3~23.5°C인 조건에서 냉방성능계수는 약 4.3~5.8, 냉방능력은 40~60kw로 나타났으며 해수온도 13.4°C인 조건하에서 난방공급 온도가 50°C일 때 난방성능계수는 3.5라고 하였다(장, 2008).

우리나라에서 온배수를 시설원에 농업에 열펌프를 이용하여 본격적으로 이용한 사례는 본 실증연구에서 최초인 것으로 사료된다.

제주지역 온배수 이용 사례로서 제주해양수산자원연구소에서 어류생산동배출수를 이용하여 연구소 건물의 냉·난방에 활용하는 시범사업을 2009년도에 추진하였으며, 유사한 폐열이용 사례로서 제주 S호텔인 경우 2009년부터 지하 정화

조(25℃ 내외)에서 열에너지를 회수하고 열펌프에서 온도를 높여서 전 객실과 겨울철 야외수영장 등에 열 에너지를 저렴한 비용으로 해결하고 있는 사례가 있으며, 광양제철소 폐열이용은 포항산업과학연구원 사업으로 벤로형 유리온실 11,880㎡에 완숙토마토를 재배하여 공단직원용으로 활용하고 있는 사례가 있는데 120℃ 중온수를 65℃ 전후 온수로 희석하여 온실에 이용하는 시스템으로 난방 에너지 60% 정도를 폐열로 공급(유료) 받아 활용하고 40%는 석유로 가온하는 시스템이다. 전라남도 곡성군에 위치한 금호타이어 폐열활용 사례는 굴뚝에서 폐열을 온수형태로 회수하여 축열조에 저장하여 온실에 활용하는 사례가 있으며, 울산광역시 울산공단 내 KOC ELECTRIC CO.에서는 2007년부터 공단폐열을 활용하여 사원 및 회사관계자들에서 선물용으로 하우스망고 440주를 상자재배 하고 있는데, 온도가 높은 공장 폐열을 간단한 열교환기 장치만으로 25℃ 이상 유지되도록 하고 있는 사례가 있다.

외국에서 발전소 온배수 이용 사례를 살펴보면 수산업에서 양식용으로 온배수를 활용하는 사례는 많으며, 농업적 이용사례는 Table 1에서 보는 바와 같이 프랑스에서 비교적 활발하게 온배수를 이용하고 있다(제주특별자치도, 2008). 프랑스는 내륙국가로 냉각탑 형태의 발전설비 방식이며 국가적 차원에서 폐열을 회수하여 인근 대규모 사용처에 공급하는 시스템 보급을 적극 추진하고 있다.


시설원예에서 고온기 저온처리에 관한 연구는 오이·고추묘의 육묘시 고온으로 착과불량, 도장 등 작물생리상 불리한 점이 많기 때문에 ‘지열 열펌프 + 차광’ 처리한 결과 ‘차광, 차광 + 포그’ 처리구 보다 5~7℃ 야간온도가 낮았고, 초장·엽면적은 적었으며, 건묘지수는 모두 높게 나타났다고 하였다(이 등, 2006).



Table 1. Examples of the agricultural use of hot waste water in overseas countries.

국명	발전소명 (출력 MW×기)	냉각 방식	온배수이용 내용
프랑스	Bugey(-4,5) (937 × 2)	냉각탑	4.8ha의 유리온실에서 꽃, 관상용식물 재배
	Chinon (919 × 4)	냉각탑	민간회사가 4.8ha의 온실에서 토마토·꽃 재배, 건설용 목재 건조공장에서 열이용
	Cruas (921 × 4)	냉각탑	5.8ha의 온실에서 토마토 재배, 연간 출하량 2,000톤, 시청·교회·수영장에서도 열이용
	Dampierre (937 × 4)	냉각탑	120ha의 농원에 온배수 공급설비가 설치되어 15사가 묘종, 꽃, 채소 등 온실에 이용
	St. Laurent-Des -Eaux (956 × 2)	냉각탑	0.53 ha의 장미·채소 생산, 장미는 고품질로 연간 35-40만개 출하, community center·수영장에도 활용
	Tricastin (955 × 4)	하천수	29ha에 토마토·장미·베고니아 재배
스페인	Asco (930 × 2)	냉각탑	발전소의 온실에서 관상용식물 재배, 온실면적 20×100m, 이용수량 100톤/시간
일본	동북전력(주) 能代화력발전소		온배수열을 히트펌프로 회수하여 서비스빌딩, PR관(열대식물원을 포함)의 난방에 이용
	관서전력(주) 미야즈에너지연구소		꽃·엽채류 온실 110m <sup>2</sup> 3동, 160m <sup>2</sup> 1동
	구주전력(주) 겐카이원자력발전소		관엽식물류 등 온실 167m <sup>2</sup> 3동

- 자료 : (재)전원지역 진흥센터(편), 해외 여러나라의 공생발전소 사례집



### Ⅲ. 재료 및 방법

#### 1. 우리나라 화력발전소 온배수 온도 및 열 에너지량 조사

##### 1) 발전소 온배수 배출량 및 배출수온

발전소 온배수열 에너지를 조사하기 위하여 우리나라 발전소에서 배출되는 온배수 량과 온배수 에너지량은 해양수산부 발표자료(2006)를 참고하여 전국 11개 발전소에서 배출되는 량을 기준으로 하였으며, 온배수 온도는 남제주화력발전소 자료(2011)를 인용하였고, 온배수 열회수 온도는 열펌프의 입구와 출구에 온도센서를 설치하여 매일 1시간 간격으로 조사하여 일일 평균치로 환산하였다.

##### 2) 제주지역 내 발전소 폐열 부존량 조사

제주지역 내 발전소 폐열부존량은 제주특별자치도 미활용에너지 조사자료(2008)와 서귀포시 안덕면 화순리 소재 남제주화력발전소 및 제주시 삼양동 소재 제주화력발전소 등 2개소에서 배출되는 온배수 폐열량을 기간난방부하량 계산식에 대입하여 산출하였으며, 이 산출된 열에너지로 시설원에 난방가능 면적을 15℃, 20℃와 24℃ 등 3가지 유형으로 난방유지가능 면적을 계산하였다.

#### 2. 발전소 온배수 열에너지 이용 시설원에 냉·난방장치 실험

##### 1) 시험온실의 난방부하량 결정과 열펌프, 축열조 설계

온실의 난방 부하량은 외기온도에 따라 크게 변화하므로 실험지역 기후자료 극값 중 최저 외기온도를 파악하고 그에 따른 최대 난방 부하량을 아래와 같은 산출식으로 계산하여 열펌프 용량을 결정하였고 설계에 활용하였다.

$$q_g = A_g \cdot U \cdot (T_{in} - T_{out})(1-f_r)$$

$$= 7,500 \times 5.7 \times \{20 - (-5.0)\} \times (1 - 0.55) = 480,937 \text{kcal/hr}$$

$q_g$  : 최대난방부하(kcal/hr)

$A_g$  : 온실의 표면적(7,500m<sup>2</sup>, 온실면적 5,000m<sup>2</sup>)

$U$  : 난방부하계수(비닐온실 5.7kcal/m<sup>2</sup>·hr·°C)

$T_{in}$  : 설정실내기온 또는 목표온도(20°C),  $T_{out}$  : 최저외기온(-5.0°C)

$f_r$  : 보온피복에 의한 열에너지 절감률(0.55)

기간난방부하는 일정기간 온실의 목표온도를 유지하는데 필요한 열량으로 그 기간이 1년일 경우 연간 난방부하라고 하며, 작물 재배기간 동안 온실의 목표온도를 유지하는데 필요한 에너지 소비량을 예측하기 위하여 아래의 기간난방부하 공식을 사용 산정하였다.

$$h_t A_g \Delta T_m = q_{soil}$$

$$\therefore \Delta T_m = G_r \frac{q_{soil}}{A_s h_t}$$

여기서,  $G_r = \frac{A_s}{A_g}$  : 보온비

$\Delta T_m = T_{in} - T_{out}$  : 야간에 토양전열량에 의하여 유지되는 실·내외 온도차(°C)

$\Delta T_a = T_{inc} - T_{out}$  : 온실 설정온도와 외기온의 온도차(°C)

$\Delta T_h = \Delta T_a - T_m$  : 실제 난방에 의하여 유지되어야 할 실·내외 온도차(°C)

온배수 사용 열량을 난방유 경우 사용량으로의 환산은 아래 산정식을 사용하였다.

$$V_f = \frac{q_n}{H \cdot n}$$

$V_f$  : 연료의 소비량( $\ell$ )

$q_n$  : 기간난방부하(kcal)

$H$  : 연료의 발열량(경유 9,050kcal/ $\ell$ )

$n$  : 난방시스템의 열이용효율(온풍난방 : 0.8)

축열조는 열회수장치, 송배수관, 열펌프를 거치면서 축열조에는 최고 55°C의 열전달매체가 축열될 수 있도록 축열조의 체적을 구하고 설계하였다.

## 2) 실험장치 설계, 설치 및 실증

온배수 열을 이용한 시설의 냉·난방 자료를 획득코자 온배수 열을 회수할 수 있는 장치 설계, 설치 방법 및 자료수집 방법은 아래와 같다.

### (1) 금속재질의 열회수장치를 활용한 냉·난방시스템 실험

금속재질 열회수장치 실증시스템을 제주특별자치도 서귀포시 안덕면 화순리 703번지 등에 2010. 7. 27일 준공하여 2011. 2.28일까지 6개월간 실증연구를 추진하였으며, 본 실증시험에 적용된 금속재질의 열회수장치를 활용한 바닷물 온배수 이용 시설원에 냉·난방시스템을 아래와 같이 운영하였다.

- ① 발전소 냉각수인 바닷물 온배수조에 열회수 장치를 설치하되, 바닷물의 염분과 빠른 유속에 견디도록 단단하게 설치한다.
- ② 열회수 장치를 통하여 온배수 열이 회수된 물을 송·배수관( $\Phi$  200~250mm)을 통하여 열펌프에 연결하고
- ③ 열펌프에서 물 온도를 45~55℃로 올리거나 또는 8~10℃로 낮추어 각각 온수탱크와 냉수탱크에 저장한다.
- ④ 온수탱크 또는 냉수탱크 물을 하우스 내에 설치된 환유니트를 통하여 하우스 공기 냉·난방에 이용한다.
- ⑤ 온실 냉·난방을 자동제어하고 열펌프 입·출구 및 축열조 온도, 온실 각각 내부온도, 투입전력량 등을 자동제어 및 데이터 저장 시스템에 저장한다.

### (2) PE파이프 열회수장치를 활용한 효율성 검증

발전소 온배수 열 회수장치 재질을 (1)항의 금속재질을 사용하지 않고 슬린키 타입의 지열회수용 PE 파이프를 활용한 열회수장치(Fig. 13) 방식을 온배수 열회수 장치에 적용하여 효율성을 검증하였다. 설치위치는 발전소 내 온배수조에 설치하였으며 실험은 2011년 5월 25일에 실시하였다.

### 3. 발전소 온배수 열에너지 공급 성능평가

#### 1) 외기온 변화에 따른 축열조 온도변화 조사분석

2010년 11월 1일부터 2011년 1월 31일까지 3개월 동안 외기온도 변화에 따른 축열조 온도변화와 온배수열 이용 열펌프 입·출수 온도변화를 조사하기 위하여 온도센서를 입구 및 출구에 설치하여 자료를 수집하였다.

#### 2) 온배수열 이용이 하우스감귤과 망고의 실내온도 및 생육에 미치는 효과조사 분석

하우스감귤에 대한 온배수 열에너지 이용 실증시험은 30년생 궁천조생 품종이 재식되어 있는 반자동 내재해형 플라스틱 하우스 3,050m<sup>2</sup>를 이용하였다. 11월 하순에 가온을 시작하여 이듬해 6월하순에 수확하는 작형으로 실시하였으며, 2010년 9월 중순부터 10월 하순까지 하우스내 야간온도를 13~15℃로 저온처리하였다. 저온처리 이후에 11월 2일, 11월 8일에 감귤착과 예정지에 대한 수삽처리(2회)로 꽃을 확인한 후, 11월 15일부터 매일 1℃씩 온도를 높이는 방식으로 가온을 실시하였다.

망고에 대한 온배수 열에너지 이용 실증시험은 반자동 내재해형 플라스틱하우스 2,215m<sup>2</sup>를 시설하여 2년생 애플망고 Irwin 품종 묘목을 200ℓ 플라스틱 상자에 정식하였다.. 플라스틱 상자는 바닥 가장자리에 직경 3cm 배수구멍 6개를 각각 뚫어 방근포를 깔고 농암갈색 화산회토양과 시판용 유기질비료를 3 : 1 비율로 섞은 배지를 사용하였다.

### 4. 경제성분석

#### 1) 발전소 폐열이용 온실난방 시스템 난방비 절감효과 분석

본 실증시험에 사용된 온실은 5,265m<sup>2</sup> 으로서 재배작물은 조생온주 감귤 3,050

m<sup>2</sup>, 애플망고 2,215m<sup>2</sup> 이었으며, 분석에 활용된 난방비는 2010년 10월 15일부터 2011년 2월 28일까지 5개월간 면세경유 대비 난방에너지 비용 절감율을 계산하였다.

## 2) 경제성 및 투자비용 회수기간 분석

경제성분석은 현재 시설농업에서 가장 많은 연료를 사용하는 작물중 하나인 파프리카 시설재배를 기준으로 보고된 지열히트펌프 효율성 자료에 본 실증시험 결과 도출된 온배수열 이용 난방비 절감율을 적용하여 비교 평가하였다. 또한 시설 농업에 온배수열 이용 열펌프 시스템 설치 시 비용회수 가능 기간을 분석하였다.

## 3) 발전소 온배수열 이용시 시설농업의 CO<sub>2</sub> 배출 저감효과 분석

우리나라 시설농업에서 난방용으로 사용하고 있는 에너지는 대부분 경유 또는 등유를 사용하고 있으므로 온배수를 이용할 경우 배출이 저감되는 CO<sub>2</sub>량을 조사 분석 하였다.



Fig. 1. The view of Korea Southern Power Plant and the laboratory for the experiment on the use of hot waste water.

## IV. 결과 및 고찰

### 1. 화력발전소 온배수 에너지량 조사

#### 1) 발전소 온배수 배출량 및 배출수온 조사

우리나라 온배수 배출량은 473.3억톤이다(해양수산부, 2006년). 우리나라 연안에  $2\text{m}^3/\text{초}$ (63백만 $\text{m}^3/\text{년}$ ) 이상 온배수를 배출하는 발전소는 Table 2에서 보는 바와 같이 원자력발전소 4개, 기력발전소 18개 및 복합화력발전소 8개로 총 30개의 발전단위가 있으며, 2006년 12월31일 기준으로 해수를 냉각제로 사용하여 얻은 발전량은 약 330.8Twh로 전체 발전량의 약 82%를 차지하였다.

발전량 대비 온배수 배출량을 보면 2006년 기준으로 1Twh의 전력을 생산하는데 평균 1.38억톤의 온배수를 배출하였으며 해역별 연간 배출량은 서해안이 206.9억톤으로 가장 부하량이 크다. 이 중 인천·경기해역 34.3억톤, 태안·보령해역 98억톤 그리고 영광해역 74.6억톤 이었다. 남해안에는 총 73.5억톤이 배출되었으며 제주해역에는 2.3억톤이 배출되었다. 동해안에는 동해중부해역 66.4억톤 및 동해남부해역 123.5억톤으로 총 189.9억톤이 배출되었다.

우리나라 발전 추이로 본다면 향후 연안에 배출되는 온배수량이 연간 강수량에 버금가는 1,000억톤에 달하는 시기도 멀지 않을 것으로 사료된다. 선진국에서 사용되는 냉각수량을 비교해 보면, 미국의 경우 1960년대 후반에 발전소 냉각수 사용량이 국가 전체 냉각수 사용량의 80%를 넘었고, 영국에서는 80년대 후반에 발전소 냉각수사용량이 89%를 차지하였다(Langford, 1990).

대부분의 발전소는 자연수온 변화에 따라 온배수  $\Delta T$ 를 조절하고 있다. 따라서 자연수온이 높은 7월부터 10월까지의 전체적으로  $7^\circ\text{C}$  이하의  $\Delta T$ 를 나타내고 있으며 자연수온이 가장 높은 9월의  $\Delta T$ 는  $5.7^\circ\text{C}$ 에 불과하다. 11월부터 자연수온이 내려가면 냉각수 사용량을 점차 줄여서  $\Delta T$ 는  $7^\circ\text{C}$ 를 넘어 점차 상승하여 자연수온이 가장 낮은 2월에는 평균 $\Delta T$ 는  $12^\circ\text{C}$ 내외 최고에 달했다(해양수산부 2008).



## 2) 제주지역 내 발전소 폐열 부존량 조사

제주지역 발전소 열효율은 Table 3, 4에서 보는 바와 같이 3개소 모두 40%이며, 온배수 폐열 부존량은 남제주화력발전소 694천TOE(tonnage of oil equivalent, 발열량 1,000만kcal)/yr, 제주화력발전소 737천TOE/yr로서 약 143천TOE/yr이다. 남제주화력발전소와 제주화력발전소는 온배수가 배출되지만 한림복합발전소는 전력부족 등 비상시에 가동하는 냉각탑방식 발전소로서 온배수가 발생되지 않는다. 2005년도 제주도내의 발전폐열인 온배수 에너지는 제주도 최종에너지소비량은 996천toe(제주특별자치도, 2008)로서 약 14.4%에 해당하는 막대한 양이다.

남제주화력발전소는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 기력발전 방식이다. 기력발전이란 중유를 연소시켜 발생하는 열로 보일러의 물을 가열하여 이때 만들어진 고온, 고압의 증기로 터빈을 회전시켜 발전기에서 전기를 생산하고 다시 냉각시켜 물로 변환 후 다시 가열하는 방식으로 반드시 냉각수가 필요한 발전방식이다.

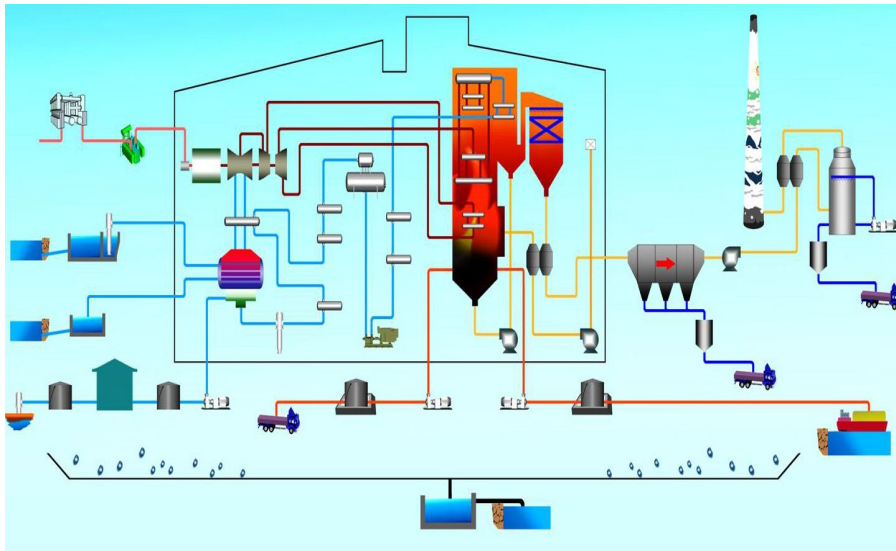


Fig. 2. Power generation system of the thermal power plant No. 3 and 4 in Namjeju thermoelectric plant.



Table 2. Emission of hot waste water by power plants on the Korean coasts.

	Plant (ea)	Capacity (MW)	Production (TWh/year)	Emission (100 million ton/TWh)	Emission per unit ton/TWh)	Design $\Delta T(^{\circ}C)$
Total	31	57,451.7	330.8	473.3	1.431	6.4~13.5
한국남부 발전(주)	하동화력	3,000.0	24.2	24.4	1.008	6.4
	영남화력	400.0	7.3	2.3	0.315	8.0~8.3
	신인천복합	1,800.0	12.2	8.7	0.713	7.0
	부산복합	1,800.0	10.7	7.5	0.701	8.2
	남제주화력	200.0	0.2	0.3	1.500	7.0
	소 계		42.5	43.2	1.016	
한국남동 발전(주)	삼천포화력	3,240.0	24.5	28.3	1.155	6.4~9.5
	영동화력	325.0	1.6	1.7	1.063	9.2
	여수화력	528.6	1.4	2.3	1.643	6.4~9.4
	영흥화력	1,600.0	11.6	17.4	1.500	6.4
	소 계		31.9	49.7	1.558	
한국서부 발전(주)	태안화력	3,000.0	23.9	26.8	1.121	7.7
	평택화력/복합	1,880.0	5.4	7.6	1.407	10.0
	서인천복합	1,800.0	8.8	4.1	0.466	6.4
	소 계		37.1	38.5	1.038	
한국동서 발전(주)	당진화력	3,000.0	23.4	20.5	0.876	6.4~6.8
	호남화력	500.0	3.7	6.3	1.703	8.8
	동해화력	400.0	2.2	3.9	1.773	7.2
	울산화력/복합	3,000.0	9.7	13.4	1.381	7.0~10.0
	소 계		31.0	44.1	1.423	
한국중부 발전(주)	보령화력/복합	4,800.0	23.4	39.1	1.671	6.4~7.0
	서천화력	400.0	1.9	2.2	1.158	9.4
	인천화력/복합	1,650.0	3.9	2.2	0.564	7.0~10.2
	제주화력	215.0	1.0	2.1	2.100	7.0
	소 계		30.2	45.6	1.510	
한국수력 원자력(주)	고리원자력	3,137.0	26.4	44.6	1.689	4.7
	영광원자력	5,900.0	43.1	74.6	1.731	7.4
	월성원자력	2,778.7	32.0	47.2	1.475	8.2
	울진원자력	5,900.0	32.0	60.8	1.900	7.2
	소 계		133.5	227.2	1.702	
포항제철 (주)	포항제철발전소	945.0	5.4	7.0	1.296	7.0
	고로냉각용			1.4		7.0
	광양제철소	1,300.0	8.4	8.6	1.024	8.0
	소 계		14.2	17.0	1.197	
GS EPS	부곡복합	501.0	3.0	1.8	0.600	7.0
포스코파워	복합발전소	1,800.0	2.4	1.9	0.792	10.0~13.5
케이파워	광양복합화력발전소	1,074.0	2.7	1.9	0.704	5.0~6.0
메이아파워	울촌복합화력발전소	577.4	2.3	2.4	1.022	

- Source : Final report on the use of hot waste water from power plants,  
Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, 2006.

Table 3. Estimation of the waste heat in hot waste water in Jeju Island.

Power plant	Capacity (MW)	Heat efficiency (%)	Annual average rate of operation (%)	Rate of hot waste water emission (%)	Waste heat in hot waste water	
					MW	1,000 TOE/yr
Namjeju Th.	240	40	46	46	127	69.4
Hanlim Com.	105	40	15	Cooling tower	-	-
Jeju Th.	255	40	46	46	135	73.7
Total	600				262	143.1

- Source : Survey on the Unused Energy Resources, Jeju Special Self-Governing Province, 2008.

Table 4. Power plants in Jeju Island.

Plant	Capacity (MW)	Description of the facilities	Fuel in use	Location
Namjeju Th.	240	Thermal power(100MW× 2 units) Internal combustion (10MW×4 units)	Heavy oil	Andeok, Seogwipo
Hanlim Com.	105	Steam Turbine(35MW×2) Gas Turbine(35MW×1)	Diesel	Hanlim, Juju
Jeju Th.	255	Thermal (10MW×1 unit, 75MW×2) Internal combustion (5MW×8) Gas Turbine(55MW×1)	Heavy oil	Samyang 1-dong, Jeju

- Source : Survey on the unused energy resources, Jeju Special Self-Governing Province, 2008.

남제주화력발전소 온배수 평균온도는 2010년 12월 27.46℃, 2011년 1월 25.57℃, 2월 24.71℃, 3월 24.83℃ 로서 최저수온 시기는 2월 24.71℃이었고, 최고수온 시기는 8월 32.64℃이었으며, 연평균 28.20℃이었다(Table 5).

유입되는 바닷물과의 온도차는 2010년 12월 9.16℃, 2011년 1월 9.10℃, 2월 9.30℃, 3월 9.44℃로서 연평균 8.15℃ 이었다. Table 5에서 A, B는 남제주화력발전소 3, 4호기 온배수 온도이며, Inlet은 인근 바닷물의 온도, Outlet은 온배수 온도이다.

Table 5. Monthly average temperature of the hot waste water from Namjeju Thermoelectric Power Plant(℃).

Month	A		B		Average		
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Diff
January	16.40	26.33	16.55	24.81	16.47	25.57	9.10
February	15.35	25.13	15.46	24.29	15.40	24.71	9.30
March	15.52	25.83	15.26	23.83	15.39	24.83	9.44
April	16.34	26.56	15.84	23.56	16.09	25.06	8.97
May	17.08	26.72	17.16	25.75	17.12	26.23	9.12
June	19.80	29.79	19.87	28.41	19.84	29.10	9.26
July	22.93	30.97	23.12	29.81	23.03	30.39	7.37
August	26.69	32.88	26.77	32.40	26.73	32.64	5.91
September	26.29	31.81	26.49	30.80	26.39	31.31	4.92
October	24.52	31.82	24.79	29.08	24.65	30.45	5.80
November	21.14	30.82	21.23	30.39	21.18	30.61	9.43
December	18.30	27.46	18.29	27.46	18.29	27.46	9.16
mean	20.03	28.84	20.07	27.55	20.05	28.20	8.15

- Source : Namjeju Thermoelectric Power Plant, 2010..

Fig. 3는 2010년도 서귀포시 지역의 외기 대기온도와 바닷물 온도, 남제주화력 발전소 온배수 온도를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 온배수 온도와 기상청에서 조사한 바닷물 온도를 비교한 결과 겨울철에는 9~10℃ 정도 높게 나타나고 있음을 알 수 있으며 또한 그만큼 온배수에 많은 열에너지가 포함되어 있다는 뜻이기도 하다.

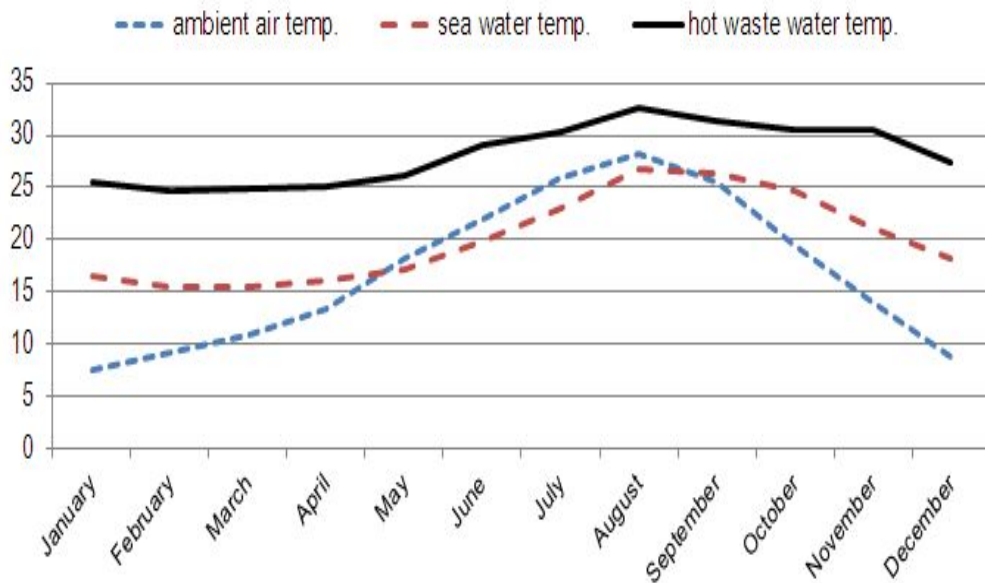


Fig. 3. Ambient air, sea water and hot waste water temperature(°C) on Seogwipo City(2010).

## 2. 발전소 온배수열 에너지이용 시설원에 냉·난방 장치 실험

### 1) 시험온실의 난방부하량 결정에 의한 열펌프, 축열조 설계

실증시험온실의 난방부하량 결정은 실증시험지역의 외기온도에 따라 크게 변화하므로 지역 외기온도를 기준으로 계산하여야 한다. 서귀포시 지역 기후자료 극값 중 최저기온(°C)은 Table 6에서 보는 바와 같이 1981년도 -5.0℃ 이었다.

난방 중 온실 외부로 방출되는 총열량 중 난방설비로 공급해야 하는 열량을

난방부하(heating load)라고 하며 최대난방부하와 기간난방부하로 대별한다. 본 연구에 활용된 실증시험온실의 열펌프 용량을 결정하기 위하여 실증시험온실의 난방을 행하는 기간 중 최대로 공급해야 하는 열량을 찾기 위하여 외기온도에 따른 전체적인 난방부하계수, 온도차, 보온피복의 열절감율 등을 고려하여 최대 난방 부하량을 산출하였다.

계산식에 대입한 실증시험온실 면적은 5,000m<sup>2</sup>, 비닐하우스 면적은 7,500m<sup>2</sup>, 보온재는 2중 다겹보온 수평커튼 시설일 때를 기준으로 산출하였고, 외기기온은 서귀포시 지역 30년 기상 관측값 중 가장 최저기온인 -5.0℃를 기준으로 하였으며, 온실내부 온도는 하우스감귤 비대기 및 하우스 땅고 생육적온인 20℃를 기준으로 산출한 결과 실증시험온실(5,000m<sup>2</sup>)의 최대난방부하는 425kw이며, 부하변동에 따라 히트펌프의 가동용량을 가변하여 운전할 수 있도록 105kw, 140kw, 180kw 용량의 히트펌프를 각각 1대씩 설치하였다.

산정식에 의하여 본 실증시험 열펌프 설계용량을 120RT로 결정하였으며, 실증 지역 외기온도 변화에 따른 1ha 기준으로 최대난방부하량 변화 예측량은 Table 7과 같다. 외기온도가 -5.0℃일 때 최대난방부하량은 961,874 kcal/hr(경유 132.8 l/hr)이었으며, -3.0℃일 때는 884,925 kcal/hr(경유 122.2 l/hr), 0.0℃일 때는 769,500 kcal/hr(경유 106.3 l/hr), 3.0℃일 때는 654,075 kcal/hr(경유 90.3 l/hr), 6.0℃일 때는 577,125 kcal/hr(경유 79.7 l/hr)이었다.

기간난방부하량은 Table 8과 같이 계산되었다. 외기기온을 기상청이 분석한 서귀포시 지역 최저평균 온도로 설정하고 시설난방 온도를 24℃로 설정할 경우 일일 열 에너지량 소모량은 12월 12,436천Kcal/ha, 1월 14,530천Kcal/ha, 2월 13,802천Kcal/ha 이었으며, 연간 난방소요 열량은 12월 385,520천Kcal/ha, 1월 450,430천Kcal/ha, 2월 386,460천Kcal/ha 이었으며 연간 총 필요열량은 2,267,460천Kcal/ha이었다.

서귀포시 지역에서 연간 적정온도 24℃로 난방코자 할 때 산정식에 대입하여 계산한 결과 2,267,460천Kcal/ha 이었으며, 이 열량을 경유난방 연료로 사용할 경우 소요량은 다음과 같았다.

$$2,267,460,000\text{Kcal/ha} / (9,050 \times 0.8) = \text{경유 } 313,185 \text{ l/ha}$$

열펌프는 역카르노사이클을 사용하며, 효율은 성능계수(COP : Coefficient Of

Performance)로 표시한다. 에너지 보존 법칙에 의해 출력에너지는 입력에너지와 같으며, 더운 열원으로 방출되는 열에너지는 차가운 열원으로부터 흡수되는 열에너지와 외부로부터의 일인 전기에너지의 합과 같다. 그러므로 열펌프의 난방성능계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{난방성능계수(COP}_h\text{)} &= \frac{\text{방출되는 열에너지}}{\text{전기에너지}} \\ &= \frac{\text{전기에너지} + \text{흡수되는 열에너지}}{\text{전기에너지}} \\ &= 1 + \frac{\text{흡수되는 열에너지}}{\text{전기에너지}} \end{aligned}$$

위 식에서 보는 바와 같이 열펌프의 성능계수(효율)는 이론적으로 항상 1보다 커지게 된다. 즉 입력에너지보다 출력에너지가 크기 때문에 에너지를 절약하는 효과가 있다. 이때 차가운 열원으로부터 흡수되는 열에너지가 크면 클수록 열펌프의 성능계수는 높아지며 이는 에너지 절약효과가 더욱 더 커짐을 의미한다.

서귀포지방의 최근 30년 최저기온 극값은  $-5.0^{\circ}\text{C}$ 이며, 외기온이  $-5.0^{\circ}\text{C}$ 인 경우 1ha당 최대 난방부하는 961,874kcal/hr 이므로, 본 실증시험온실 5,000m<sup>2</sup>에서 최저기온이  $-5.0^{\circ}\text{C}$  일 때의 최대 난방부하 480,937kcal/hr를 기준으로 열펌프를 설계하였다. 위와 같은 자료를 바탕으로 제주지역에서 온배수를 이용하여 시설냉·난방이 가능한 면적을 산출하였다. 제주도내 온배수 폐열부존량은 143.100 TOE/yr이므로 이를 환산하면 Table 9에서 보는 바와 같이 시설원에 작물을 최저기온  $20^{\circ}\text{C}$ 로 난방시 1,028ha의 시설난방이 가능하고,  $24^{\circ}\text{C}$ 로 최저온도 관리를 할 경우에도 631ha의 시설난방이 가능한 엄청난 에너지량으로 계산되었다.

실험을 위한 축열조 설계는 열회수장치, 송배수관, 열펌프를 거치면서 최고  $5^{\circ}\text{C}$ 의 열전달매체를 축열하는 것으로 하였으며, 축열조는 방열온도를  $50\sim 30^{\circ}\text{C}$ 로 하여 시스템 고장 시에 외기온도  $-5.0^{\circ}\text{C}$  상태에서 실내온도 최저  $20^{\circ}\text{C}$ 로 3시간 이상 온실 난방 활용이 가능하도록 용량은 난방용 80 TON, 냉방용 50 TON 규모로 설계 시공하였다(Fig. 4, 5).

온실내부에 열을 공급하는 방열기는 풍량 56m<sup>3</sup>/min 용량의 FAN MOTER를 사용하였다.

Table 6. The low extreme temperature in the climatic data on Seogwipo City(°C).

Description	Year 1971			1981			1990		
	Value	Month	Day	Value	Month	Day	Value	Month	Day
Seogwipo	-4.0	1	4	-5.0	2	26	-4.2	1	25

- Source : Homepage of Korea Meteorological Administration (www.kma.go.kr), Extreme values in the climatic data, August 2011.

Table 7. Estimation of the maximum heating load of the experimental greenhouse depending on the temperature outside(Kcal/hr, 1ha).

Exterior temperature	-5.0°C	-3.0°C	0.0°C	3.0°C	6.0°C
Maximum heating load (kcal/hr)	961,874	884,925	769,500	654,075	577,125
Diesel equivalent (ℓ)	132.8	122.2	106.3	90.3	79.7

- Tested in Seogwipo city with the lowest temperature in the greenhouse at 24°C.

Table 8. Heating load of desired temperature on Seogwipo City(1,000 Kcal/ha).

Month	heating load of days			heating load of month		
	24℃	20℃	15℃	24℃	20℃	15℃
January	14,530	10,887	6,334	450,430	337,500	196,350
February	13,802	10,159	5,605	386,460	284,450	156,940
March	11,342	7,700	3,146	351,600	238,700	97,530
April	7,518	3,874	0	225,540	116,220	0
May	3,874	231	0	120,090	7,160	0
October	3,328	0	0	103,170	0	0
November	8,155	4,512	231	244,650	135,360	6,930
December	12,436	8,793	4,239	385,520	272,580	131,410
Total	-	-	-	2,267,460	1,391,970	589,160

Table 9. Potential acreage of facility horticulture heated by the hot waste water from power plants in Jeju Island.

Minimum controlled temp in the facility (℃)	Potential acreage of facility horticulture		
	Total	Seogwipo City	Jeju City
15 ℃	2,429 ha	1,178 ha	1,251 ha
20 ℃	1,028 ha	499 ha	529 ha
24 ℃	631 ha	306 ha	325 ha

- The area where hot waste water can be utilized: Around Samyangdong and Sinchon in Jeju city; and Hwasoon-ri, Andeok-myeon, Seogwipo city.





Fig. 4. Heat storage tank under construction.



Fig. 5. Completed heat storage tank.

## 2) 실험장치 설계 및 실증

시설농업에 열펌프를 활용하는 기술은 세계적으로 지열을 활용한 방법을 중심으로 5,000여건 특허가 출원되는 등 많은 학자들이 흙을 전도체로 하는 지열 히트펌프 기술개발에 상당한 성과를 이루었고 보급단계에 있다. 그러나 열에너지를 회수 활용하는 데 있어 단위 체적당 열용량은 흙보다는 물이 매우 유리하다.

Table 10에서 보는바와 같이 공기대비 단위 체적당 열용량은 물이 3,432배 흙이 1,073배이다. 대기 중의 공기는 에너지원 확보가 용이한 반면 온도조건이 불리하고 난방 시 심한 경우 열교환기 표면에 착상이 발생하여 성능을 저하시키는 단점이 있으며, 흙은 대기보다 온도조건은 유리하지만 열전도율이 낮은 단점이 있다(김, 2005).

시설농업에서의 난방은 50℃미만의 열원만 있으면 충분하므로 수백, 수천 ℃까지 올릴 수 있는 화석연료를 사용하지 않고도 주변에 산재한 저열원을 바탕으로 열펌프를 활용하면 냉·난방이 가능하다고 하겠다.

이러한 관점에서 발전소 온배수는 공기, 흙은 물론이고 물을 열원으로 사용하는 해수, 지하수, 하천수, 연못 등 다른 자원보다 온도가 높은 물이기 때문에 열회수 활용에는 매우 유리할 것으로 판단되어 발전소 온배수열 에너지이용 냉·난방시스템 적용 연구를 추진하게 된 동기이다.

### (1) 금속재질의 열회수장치를 활용한 냉·난방시스템 실험

발전소 온배수열 회수 및 효율적 이용을 위하여 먼저 금속재질의 열회수장치를 활용한 냉·난방시스템을 설계하였다. 본 시스템 설계를 고안함에 있어 농촌진흥청에서 개발한 지열난방 방식을 기본적인 모델로 하되 열 에너지를 지열이 아닌 온배수열에서 취하는 방법으로 설계하였다.

열회수 방법은 제주해양수산자원연구소 어류생산동배출수 폐열회수장치(Table 11)를 모델로 설계하였고 동 사업을 추진한 시공업체를 선정하여 설계와 공사를 진행하였다. 어류생산동배출수 폐열회수장치 시범사업은 바다물을 끌어올려 수산자원 양식연구에 활용하고 바다로 버려지는 통로에 금속재질의 열회수장치를 설치하여 연구소 건물의 냉·난방에 활용하는 시스템이다.

Table 10. Properties of air, soil and water.

	Air	Soil	Water
$C_p$ [kJ/(kg·k)]	1.0035	0.7531	4.184
$\rho$ [kg·m <sup>3</sup> ]	1.215	1736	1000
$k$ [W/(m·k)]	0.02521	0.1442	0.5914
$\rho C_p$ [kJ/(m <sup>3</sup> ·k)]	1.219	1307.2	4184

- Source : Kim Yeong-il, The Journal of Geothermal Energy, Vo. 1, No. 1, p27, June 2005.

Table 11. An example of construction of a heating system using seawater.

Description	Contents
Construction duration	From March to July in 2009.
Agency (Location)	Jeju Special Self-Governing Province (Pyoseon-ri, Pyoseon-myeon, Seogwipo City)
Location, Acreage of the facility	Jeju Fisheries Research Institute, Main building, 1,634m <sup>2</sup>
Construction cost (million won)	306 (Subsidy 153, Self-pay 153)
Capacity	Heating load : 220,000kcal/h Cooling load : 250,000kcal/h
Source of heat	Waste water from a fishery raising fish
Key facilities	Heat pump, Tubular heat exchanger, Circulation pump

- Source : Local supply business of new · renewable energy(Ministry of Knowledge Economy, 2009).

본 실증시험을 추진하기 위하여 온배수 배출주체인 남제주화력발전소 측과 수차례 협의하여 설계하였는 바, 혹 있을 줄 모르는 바닷물(온배수) 누출 시 토양 오염과 농가민원 등을 고려하여 농장에 바닷물 온배수를 끌어올리지 않고 발전소 내부의 기존 온배수조에 열회수장치(Fig. 6과 7)를 설치하여 열을 회수하는 방법으로 실증시험을 추진키로 하고 관련사항들을 발전소간 체결한 업무협약서에 삽입하여 추진하였다.

본 실증시험에 사용된 금속재질 열회수장치는 발전소 냉각수 인입이 잠시 멈춘 발전소 점검기간을 통하여 온배수조 내부에 설치하였으며 열회수장치 제원은 Table 12와 같다. 열회수장치는 바닷물 부식을 고려하여 SUS 316 재질을 사용하였으며 중량은 1,950kg, 용량은 300천 Kcal/hr로 제작하였다. 이는 본 실증시험 열펌프 총 120RT 용량 중 90RT에 사용될 용량이고, 나머지 30RT는 PE 파이프를 이용한 실증시험으로 추진하였다.

Table 12. Specifications of a heat recovery system.

	Shell side	Tube side
Fluid	Sea water	Water
Fluid entering	199,390 kg/hr	59,760 kg/hr
Temp.	inlet	21 °C
	outlet	19.5 °C
	design	30 °C
Press.	inlet	0.01 kPa
	design	0.02 kPa
	test(hyd.)	- kPa
	test(pneu.)	- kPa
Transfer surface	40 m <sup>2</sup>	
Weight	1,950 kg	
Heat duty	300,000 Kcal/hr	



Fig. 6. Fin and tube arrangement heat exchange system  
(300,000 Kcal/hr) under assembly.



Fig. 7. Photo of the heat exchange system.



송배수관은 발전소 내부 도로굴착과 발전소 주변을 따라 사업장으로 연결되도록 설계하였다. 송배수관은 도로부분을 제외하고는 지하로 매설하지 않고 지상부에 노출시켜 누수여부 확인이 용이하도록 하였고 별도 보온처리는 하지 않았다. 지하에 매설하지 않았던 또 다른 이유는 공사비용 절감과 송배수관 이동구간이 선사유적지 보호지역이라 가능한 땅을 굴착하지 않는 상태로 설계를 하였다.

본 실험에서의 송배수관은 175m로 거리가 짧고 20~25℃ 정도의 저온수를 이동시키는 관계로 큰 열손실은 없을 것으로 판단하여 보온처리를 하지 않았다. 그렇지만 이동거리가 길어지면 열손실을 줄이기 위해서 온배수 인입관에 대해서는 보온처리 후 지하 매설을 하여주는 것이 바람직할 것으로 사료되며, 배수관은 공사비 절감차원에서 별도 보온처리를 하지 않아도 무방하리라 사료된다.



Fig. 8. Installation of the pipelines to convey saltwater.

위와 같은 내용들을 종합하여 2010년 3월부터 7월까지 서귀포시 안덕면 화순리 703번지와 남제주화력발전소 내 온배수 실피트에 Fig. 9, 10의 계통도와 같은 발전소 바닷물 온배수 이용 시설원에 냉·난방 시스템을 설치하여 2010년 7월 29일부터 실증연구를 추진한 결과 시스템은 정상적으로 운영되었고 열 이용효율, 경제성도 매우 높았다.

축열조 온도는 외기온도가  $-5^{\circ}\text{C}$ 내외로 떨어지는 시기에도  $48.3^{\circ}\text{C}$ 를 유지함으로써 온실에 충분하게 에너지를 공급할 수 있는 시스템 용량으로 판단되었으며, 하우스감귤 재배실험에서도 고온기 저온처리와 저온기 재배자가 원하는 온도를 지속적으로 유지할 수 있어서 일반재배 작형과 비교하여 빠르게 생육이 진행된 것으로 확인 되었다. 또한 하우스망고 재배실증에서도 일반농가에 비하여 수확기간을 1년 이상 단축할 수 있을 뿐만 아니라, 좋은 가격을 기록하는 단경기 수확을 통하여 보다 안정적인 농가소득이 가능한 작형으로 판단되었다.

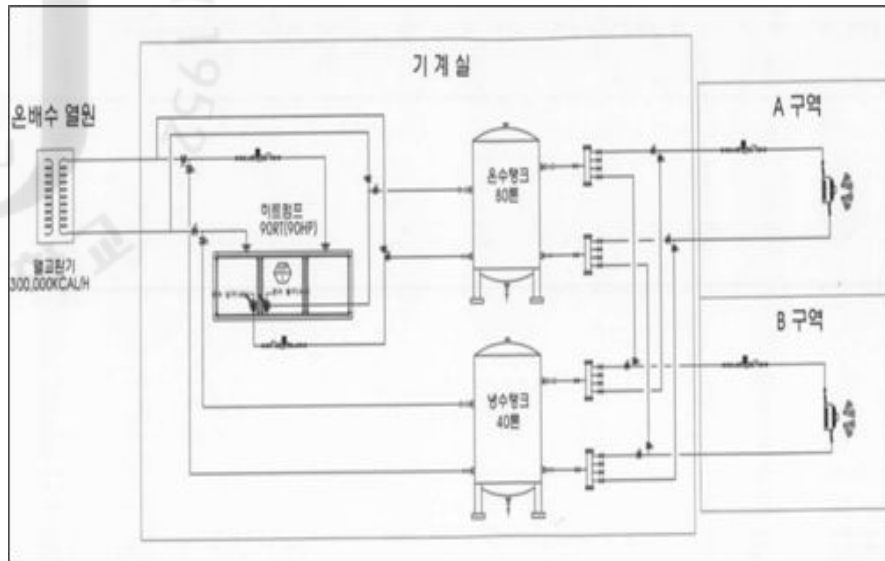


Fig. 9. A heating/cooling system for facility horticulture using hot waste saltwater(for experimental purpose).

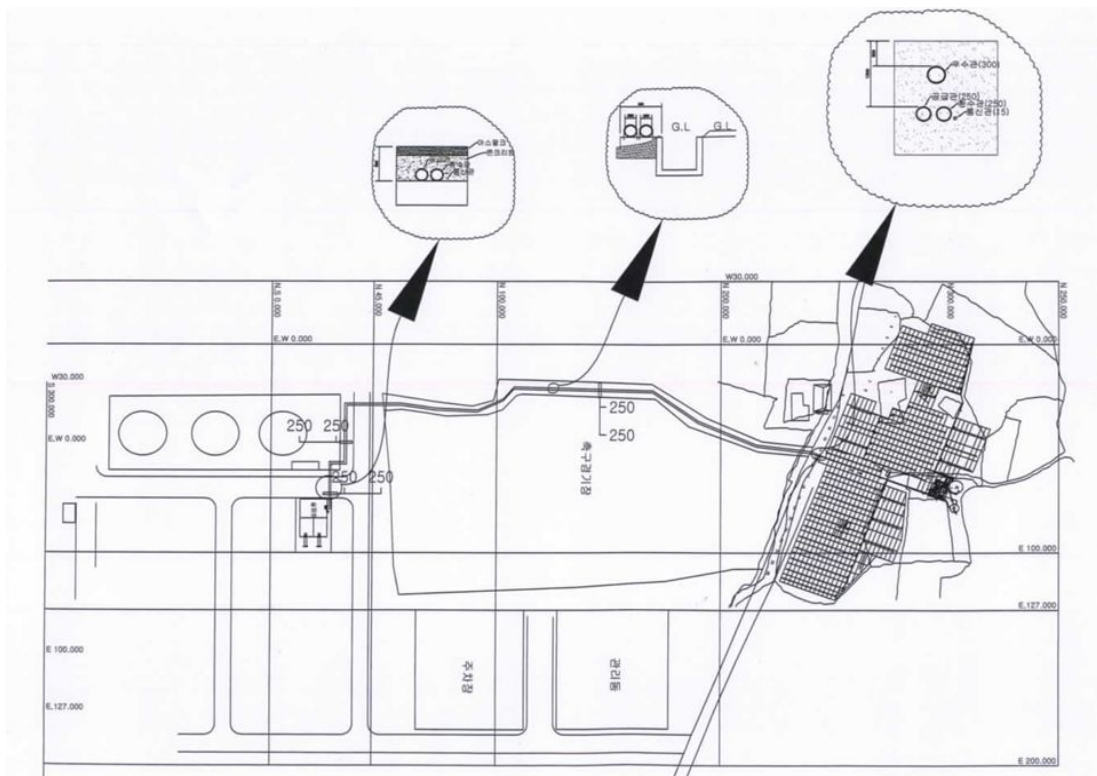


Fig. 10. Floor plan for farm facilities using hot waste water.



그렇지만 시설물 관리에 있어서 몇가지 문제점을 발견할 수 있었다.

첫째, 발전소 온배수조 내에 열회수장치를 설치함으로써 시설의 유지관리가 어렵다는 점이다. 발전소는 연1회 정기수리 기간을 제외하고는 연중 가동되므로 온배수조 내에 설치된 열회수장치의 확대, 고장수리 등 작업 상황이 발생할 경우에는 발전소 가동을 중단하고 작업을 진행해야 하나, 발전소 가동 중단은 국가적인 전력수급 관계로 실질적으로는 어려운 문제점이 있으므로 다른 열회수 방법이 모색해야 할 필요성이 대두되었다. 즉, 발전소내 온배수조에 시설물을 설치하지 않고 농장 내에 온배수조를 만들고 온배수를 인입해서 열을 회수하는 방법으로 개선해야할 것으로 사료되었다.

둘째, 금속재질 열회수장치의 부식의 문제이다. 금속재질의 열회수장치는 2010년 7월 15일 설치하여 2011년 2월 11일까지 사용시 문제점 발생이 안되었으나, Fig. 11, 12에서 보는 바와 같이 2011년 2월 12일 온배수조 내 고정 장치로부터 열회수장치를 연결하는 쇠사슬 고리와 장치를 지지하는 받침대가 바닷물에 부식되어 고정부분에서 이탈되는 문제점이 발생되었다. 국내 최초로 시도되는 실증연구로서 기존에 설치한 사례도 없을 뿐 아니라 바닷물 속에서 준 영구적으로 견디어야 하기 때문에 부식을 고려하여 신·재생에너지 지방보급사업(지식경제부, 2009)의 열회수장치를 모델로 부식에 안전한 SUS 316 재질로 제작하였지만 설치 1년도 안되어 열회수장치에서 부식이 진행되었다. 부식이 진행된 부분은 실질적인 열회수장치에서는 부식이 적었으나, 장치를 지지하는 받침대, 상부를 연결하는 쇠사슬 고리, 볼트와 너트 등 온배수조에 장치를 고정하기 위한 연결 부속품에서 주로 부식이 진행되었다.

부식의 원인으로 바닷물은 염류 뿐만 아니라  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$  등과 같은 기체도 녹아있으며 이들 기체는 염류농도가 낮을수록, 바닷물 압력이 높을수록, 유속이 빠를수록 더 많이 함유한다고 하였고, 공기 중에는 질소와 산소 성분비가 4 : 1이지만 바닷물에는 4 : 3으로 산소가 질소에 비하여 더 잘 용해되며,  $CO_2$  는 대기량의 50배 정도로서(장기창 등, 2008) 일반 바닷물보다 훨씬 빠른 유속과 많은 기체량 함유로 훨씬 더 부식이 빨리 진행된 것으로 사료되었다.

차후 모든 발전소 온배수이용 시스템을 설계 시에는 이러한 상황을 충분히 고려해서 부식에 강한 플라스틱 재질을 활용해야 할 것으로 사료되었다.



Fig. 11. Corrosion 1 of the heat retrieval system in the hot waste water tank used for the experiment.



Fig. 12. Corrosion 2 of the heat retrieval system in the hot waste water tank used for the experiment.

## (2) PE파이프 열회수장치를 활용한 효율성 검증

위에서 서술한 바와 같이 본 실험을 통하여 바닷물 온배수에서 열 에너지를 회수할 때, 금속재질을 사용한 열회수장치의 문제점이 확인되었다. 이러한 문제점을 해결하고 보다 안정적인 열에너지를 회수하기 위하여 PE파이프를 활용한 열회수장치를 설계하게 되었다(Fig. 13).

PE파이프 열회수장치 시스템의 특징은 발전소 바닷물 온배수의 부식성과 온도 특성을 고려한 가변형 폐열 회수장치라는 점이다. PE 파이프를 Roll 형태로 제작함으로써 내부식성을 향상시킬 수 있고, 금속재질의 열회수장치가 아니고 PE 파이프를 사용함으로써 제작비를 절감할 수 있으며, 장기 사용시 내구성을 고려한 열펌프의 안전제어방법을 채택할 수 있는 등 여러 가지 장점이 있을 것으로 사료되었다.

조사에 사용된 PE 파이프 총길이는 2,800m, 30RT 규모로서 난방성능계수를 측정하기 위하여 Fig. 14에서 보는 바와 같이 105kw급 히트펌프시스템에 전력량계, 유량계, 온도센서 등을 설치하여 시험하였다. 시험결과 증발기측 열매체 입구온도가 21.3℃, 응축기측 열매체 입구온도가 45.3℃일때 증발열량은 108.1kw, 응축열량은 144.9kw, 소비전력은 37.2kw, 난방성능계수는 3.9로 나타났다(Fig. 14와 15, Table 13).

금속재질의 열회수장치에서는 1월 온배수 온도 25.57℃에서 열회수 온도 19℃인 점을 고려하면, PE 파이프 열회수장치에서는 5월 평균 온배수 온도 26.23℃에서 21.3℃ 온도회수는 충분하게 열에너지가 회수되는 것으로 판단되었다.

또한, PE파이프 열회수장치를 활용한 발전소 온배수열 이용 시설원에 냉·난방 시스템의 장점으로 제작비를 절감할 수 있다는 점이다.

열회수 장치를 제작함에 있어 금속재질을 사용하지 않고 PE 파이프를 사용할 경우 제작비를 27% 이상 절감할 수 있을 것으로 분석되었다. 90RT 열펌프에 에너지를 공급하기 위한 용량으로 열회수장치 300천 kcal를 제작 활용하는 데 비용 33천천원이 소요되었으나, 지열히트펌프 시스템에서 사용하는 PE 파이프 방법으로 개선할 경우 제작 및 설치비용이 24,113천원으로 8,887천원이 절감되는 것으로 조사되었다(Table 14).

뿐만 아니라, 온배수조를 농장 내에 설치함으로써 열회수장치의 확대, 고장수리 등 작업을 수시로 진행할 수 있는 장점이 있다. 본 장치의 열펌프 시스템의 난방성능계수는 3.9 이상으로 열펌프의 에너지 소비량 보다 3.9배 이상의 에너지 획득이 가능한 것으로 확인되었다. 단, 주의해야할 사항은 온배수조가 농장 내에 위치하기 때문에 바닷물 누출 시에는 토양오염과 주변농가 피해가 될 수 있으므로 공사를 철저히 감독하고 바닷물 누출시 배수로를 따라서 바다로 배출될 수 있도록 주변 안전장치를 설치해야 한다.

PE파이프 열회수장치를 활용한 발전소 온배수열 이용 시설원에 냉·난방 시스템 설치활용 방법은 아래와 같다.

- ① 열에너지를 이용할 시설원에 단지 내에 온배수를 담아 둘 수 있는 온배수조를 지하에 시설하고, 온배수조 내에 열회수용 PE관이 최대한 많이 설치되도록 차곡차곡 롤 형태로 쌓아서 시설한 뒤, 송·배수관(Φ 200~250mm)을 통하여 온배수조에 온배수를 끌어올려 가득 채운다.
- ② PE관 내에 물을 순환시켜 온배수 열을 회수하고 열이 회수된 물을 열펌프에 연결, 열펌프에서 물 온도를 45~55℃로 올리거나 또는 8~10℃로 낮추어 각각 온수탱크와 냉수탱크에 저장하여 둔다.
- ③ 뜨거운 또는 차가운 물을 하우스내에 설치된 환유니트를 통하여 하우스 공기를 냉·난방 활용한다.
- ④ 온실냉·난방을 자동제어하고 열펌프 입·출구 및 축열조 온도, 온실 각각 내부온도, 투입전력량 등을 자동제어 및 데이터 저장 시스템에 저장한다.

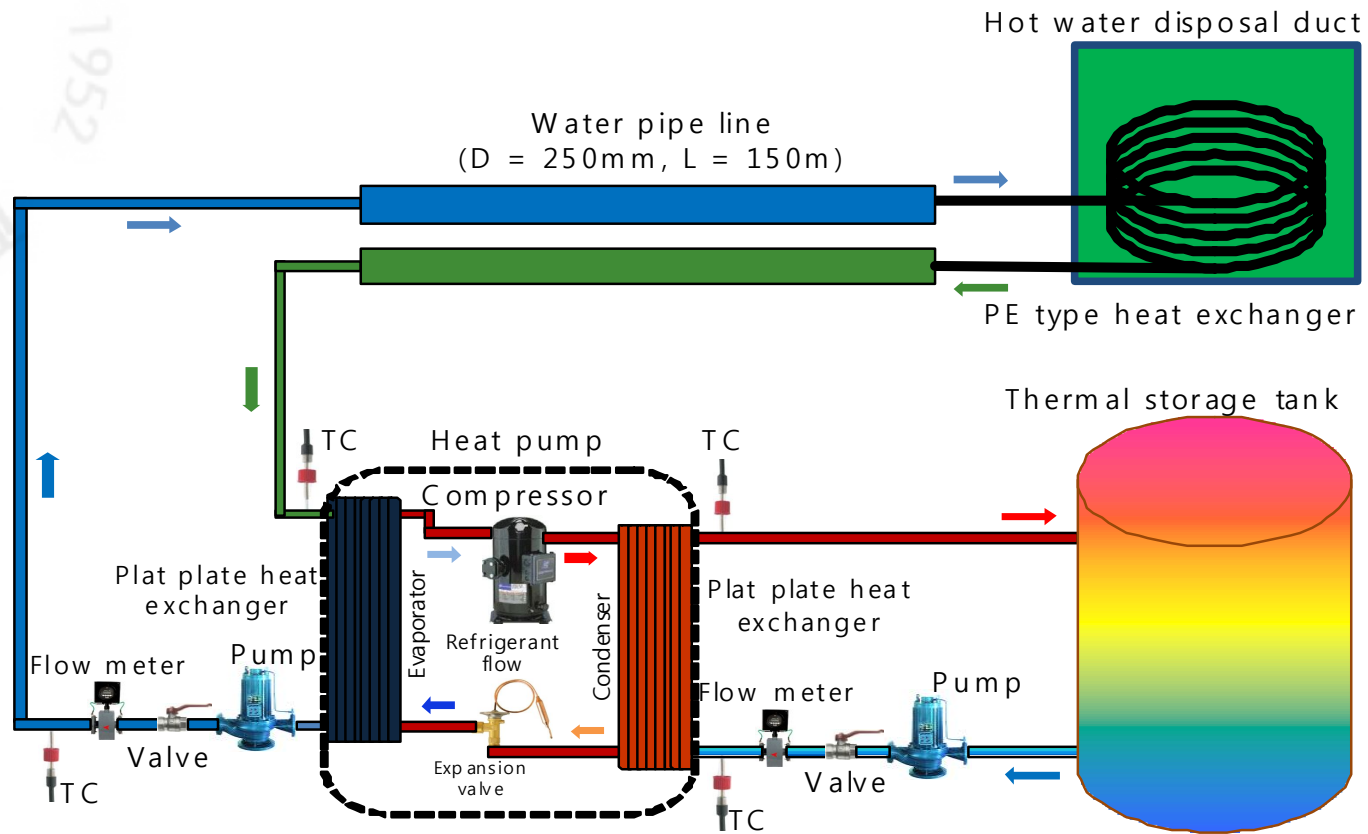


Fig. 13. A draft of a heating and cooling system for facility horticulture using hot waste saltwater.



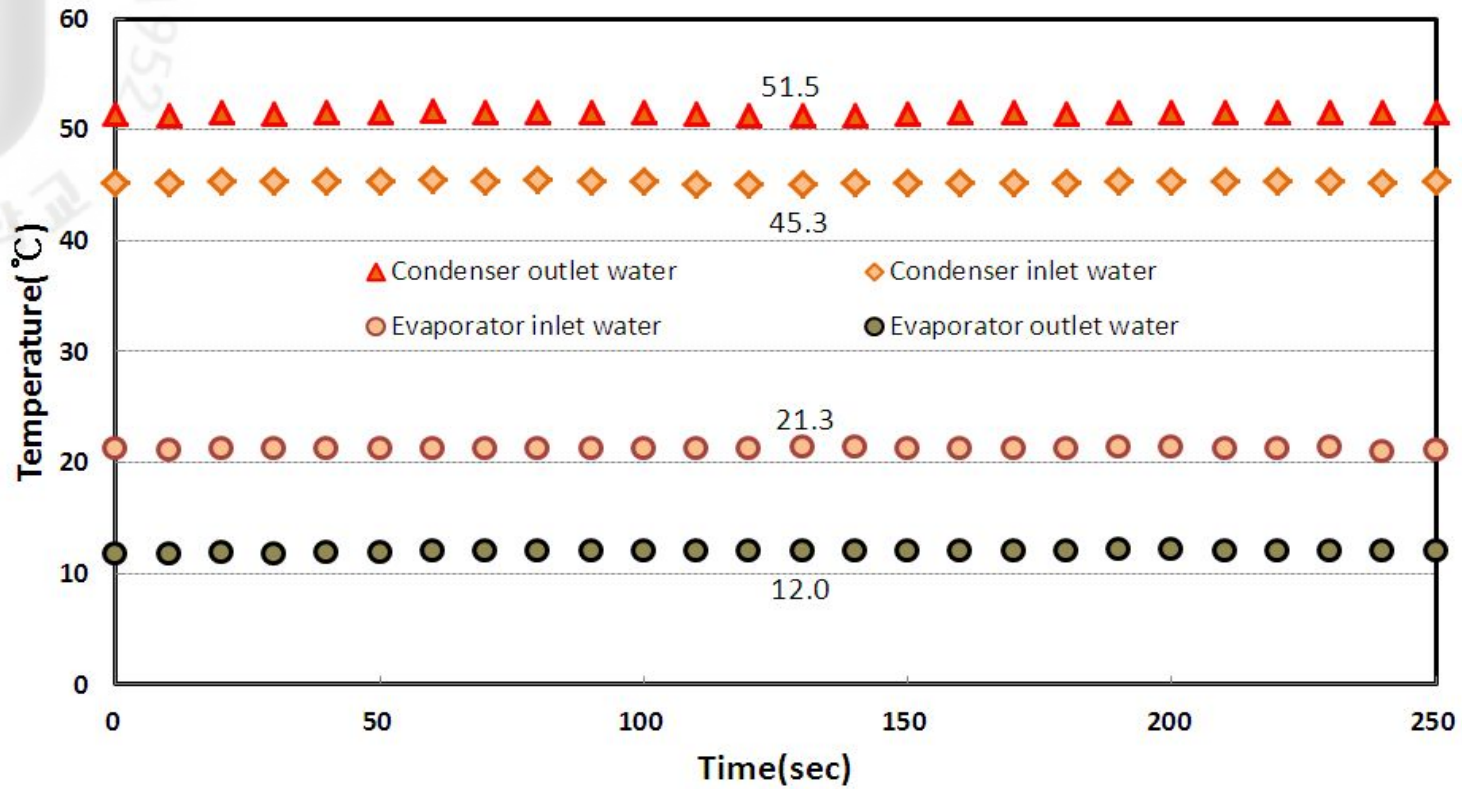


Fig. 14. Temperature distributions of heat transfer fluid(water) passing through evaporator and condenser when PE pipes are used for heat exchange in heat pump system of 104kw.

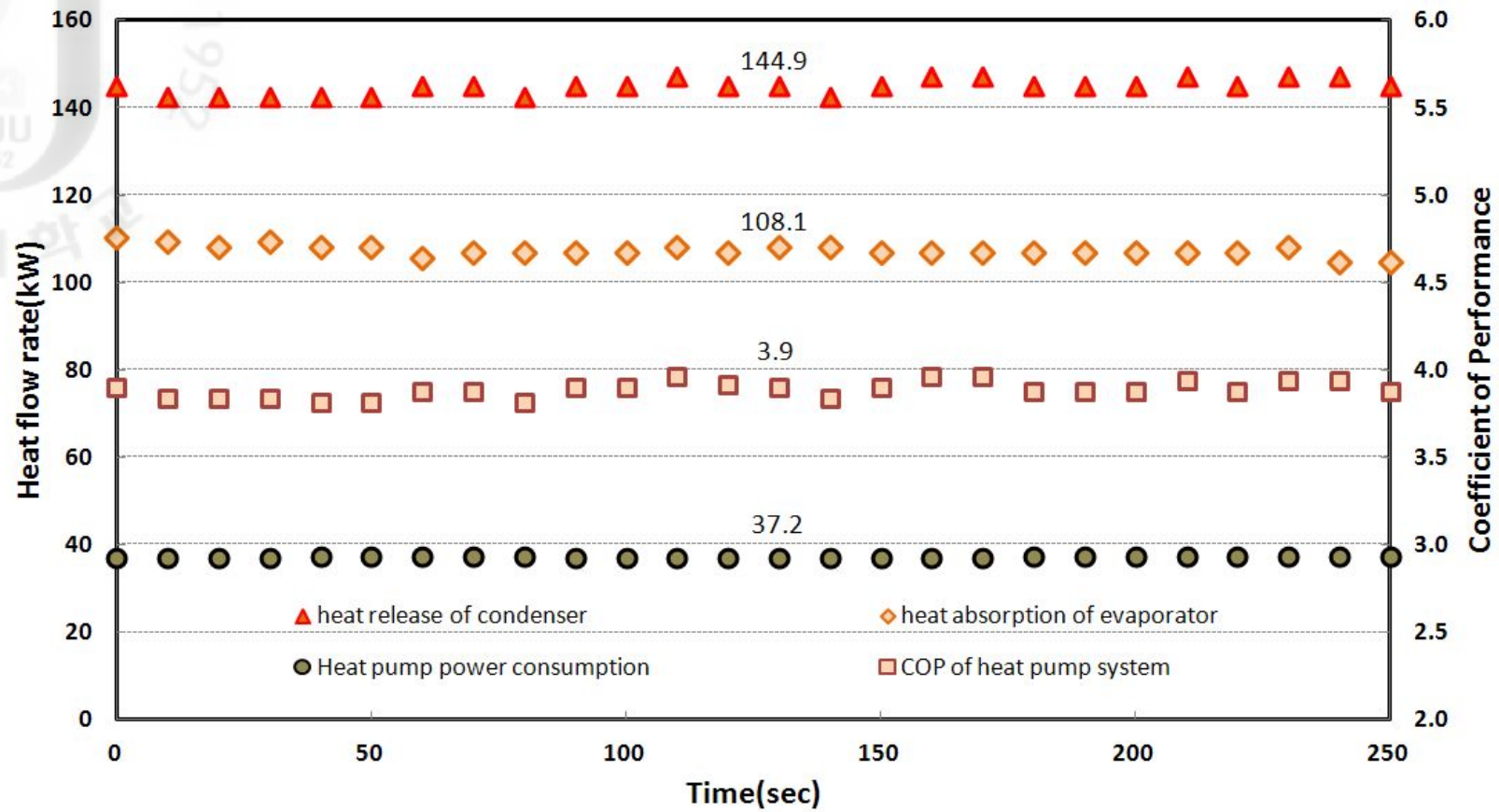
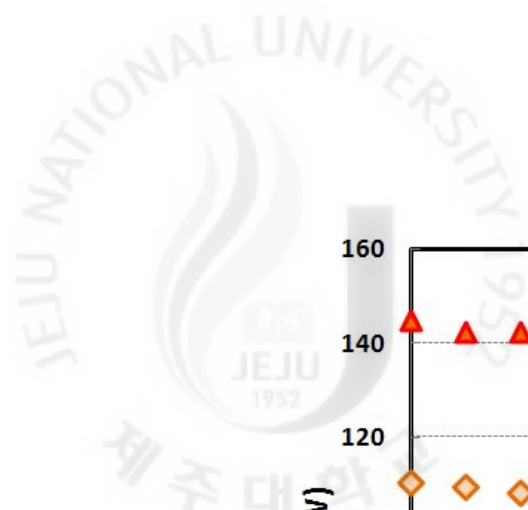


Fig. 15. System COP and heat flow rates of evaporator and condenser when PE pipes are used for heat exchange in heat pump system of 104kw.

Table 13. Test on the heat pump in the heat retrieval system using PE pipes.  
(30RT, May 25, 2011)

Date	Time	Evaporator inlet	Evaporator outlet	Condenser inlet	Condenser outlet
2011/05/25	12:14:00	21.2	11.7	45.2	51.4
2011/05/25	12:14:10	21.1	11.7	45.2	51.3
2011/05/25	12:14:20	21.2	11.9	45.4	51.5
2011/05/25	12:14:30	21.2	11.8	45.3	51.4
2011/05/25	12:14:40	21.2	11.9	45.4	51.5
2011/05/25	12:14:50	21.2	11.9	45.4	51.5
2011/05/25	12:15:00	21.2	12.1	45.5	51.7
2011/05/25	12:15:10	21.2	12.0	45.4	51.6
2011/05/25	12:15:20	21.3	12.1	45.5	51.6
2011/05/25	12:15:30	21.2	12.0	45.4	51.6
2011/05/25	12:15:40	21.2	12.0	45.3	51.5
2011/05/25	12:15:50	21.3	12.0	45.1	51.4
2011/05/25	12:16:00	21.3	12.1	45.1	51.3
2011/05/25	12:16:10	21.4	12.1	45.1	51.3
2011/05/25	12:16:20	21.4	12.1	45.2	51.3
2011/05/25	12:16:30	21.3	12.1	45.2	51.4
2011/05/25	12:16:40	21.3	12.1	45.2	51.5
2011/05/25	12:16:50	21.3	12.1	45.2	51.5
2011/05/25	12:17:00	21.3	12.1	45.2	51.4
2011/05/25	12:17:10	21.4	12.2	45.3	51.5
2011/05/25	12:17:20	21.4	12.2	45.4	51.6
2011/05/25	12:17:30	21.3	12.1	45.3	51.6
2011/05/25	12:17:40	21.3	12.1	45.4	51.6
2011/05/25	12:17:50	21.4	12.1	45.3	51.6
2011/05/25	12:18:00	21.0	12.0	45.2	51.5
2011/05/25	12:18:10	21.1	12.1	45.4	51.6
2011/05/25	12:18:20	21.0	12.0	45.4	51.5
2011/05/25	12:18:30	20.9	12.0	45.3	51.5

- Refrigerant: R410a, Power consumption: 3.7kw, Flow rate in the evaporator: 10,000L/h
- Flow rate in the condenser: 20,100L/h, Electricity: 0.207V-27.2kw, Total length of the heat retrieval system: 2,800m



Table 14. Production and installation costs of the heat retrieval system.

Used material	Scale of the heat retrieval system	Installation cost	Remark
SUS 316 L for lukewarm water	300,000 kcal (90RT)	33,000	metal
PE pipe	300,000 kcal (90RT)	24,113	PE material

### 3. 발전소 온배수 열에너지 공급 성능평가

#### 1) 외기온 변화에 따른 축열조 온도변화 조사

Fig. 16, 17과 18에서 보는 바와 같이 조사지역인 서귀포시 지역의 외기온 평균온도는 2010년 11월 14.0℃, 12월 8.9℃, 2011년 1월 4.0℃ 이었으며, 실증시험 지역 외기온 최저온도는 2010년 11월 2.1℃, 12월 -2.8℃, 2011년 1월 -5.1℃ 이었다.

외기온 변화에 따른 축열조 최고온도는 2010년 11월 52.4℃, 12월 52.4℃, 2011년 1월 52.2℃ 이었고, 축열조 평균온도는 2010년 11월 48.9℃, 12월 49.1℃, 2011년 1월 48.3℃이었으며, 축열조 최저온도는 2010년 11월 43.6℃, 12월 45.0℃, 2011년 1월 44.2℃ 로서 축열조 온도는 외기온 변화와 하우스감귤, 하우스망고 온실에 사용한 에너지량에 관계없이 일정한 온도를 유지하였다.

특히 외기온도가 -5℃내외로 떨어지는 2011년 1월 15일~16일에도 축열조 평균온도는 48.3℃를 유지함으로써 온실에 충분하게 에너지를 공급할 수 있는 시스템 용량으로 판단되었다.

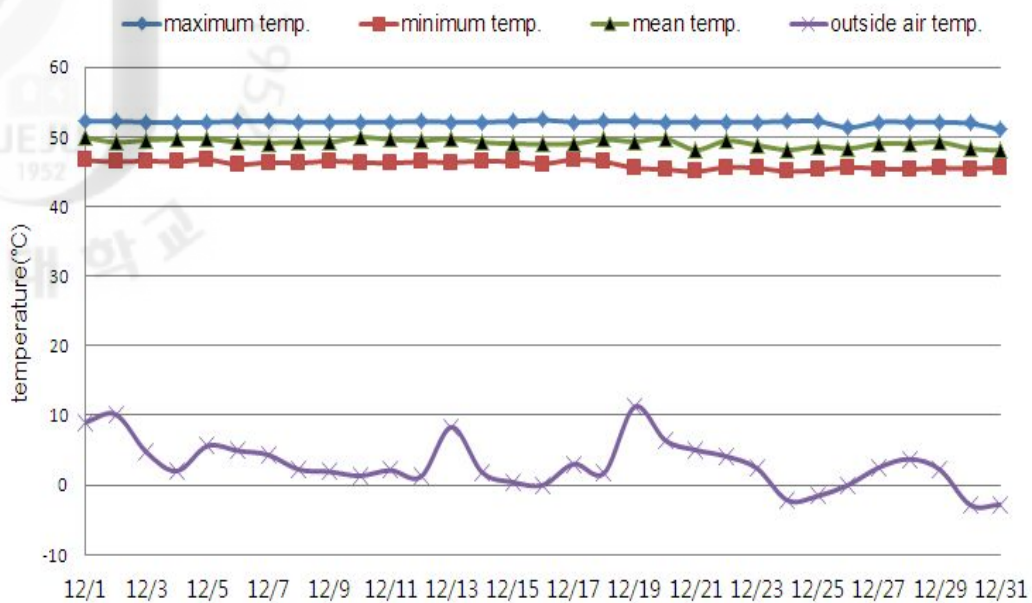


Fig. 16. Temperature fluctuations in the heat storage tank in response to the exterior temperature (November 2010, °C).

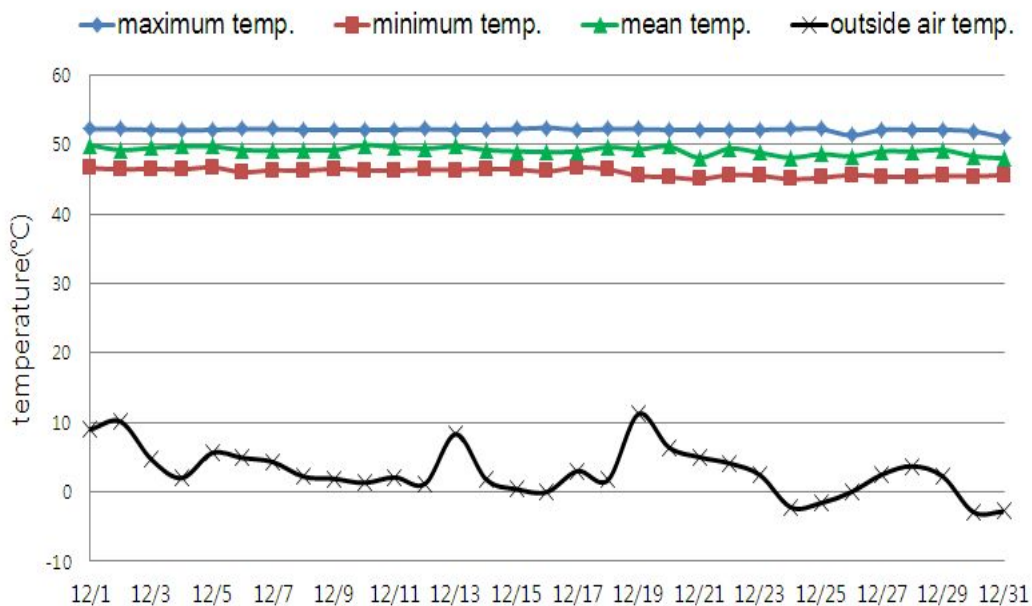


Fig. 17. Temperature fluctuations in the heat storage tank in response to the exterior temperature (December 2010, °C).

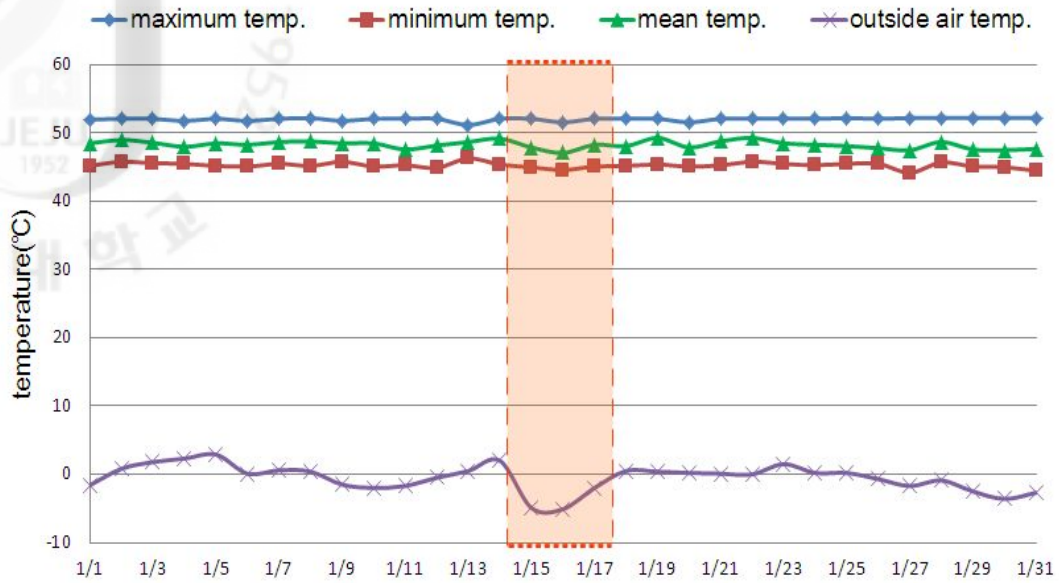


Fig. 18. Temperature fluctuations inside the heat storage tank in response to the exterior temperature (January 2011, °C).

2010년 11월 1일부터 2011년 1월 31일까지 조사 분석 기간 동안에 온배수열 이용 열펌프 입·출수 온도는 Table 15, 16와 17에서 보는 바와 같다. 2010년 11월 중순까지는 열펌프 가동량이 적었으며 11월하순 부터는 본격적으로 가동되었음을 알 수 있었다.

Table 17에서 보는 바와 같이 2011년 1월중 증발기와 응축기의 입출구 물온도 변화를 조사한 열펌프의 증발기에서 16.1°C의 물이 온배수덕트로 가면 19.0°C로 데워져서 다시 증발기로 들어옴으로서 약 2.9°C의 온배수 열에너지를 활용하였고, 반면 45.9°C인 축열조의 물이 열펌프의 응축기로 들어가면 52.9°C로 데워져서 다시 축열탱크로 들어감으로서 평균 7.0°C가 온실에 사용된 것으로 조사 분석되었다.

Table 15. Daily temperatures(°C) of the water coming in and out of the heat pump in November 2010.

date	Heat pump 1				Heat pump 2				Power C. (kw)
	Tsout	Tsin	Hsout	Hsin	Tsout	Tsin	Hsout	Hsin	
11 / 01	28.4	37.5	19.4	20.3	41.9	45.8	25.2	24.2	653
11 / 02	25.9	35.3	18.6	19.4	41.7	45.7	24.6	23.7	754
11 / 03	24.2	34.9	17.4	18.4	42.6	46.9	24.3	23.1	714
11 / 04	23.2	33.1	17.2	17.9	42.0	46.6	24.1	22.8	710
11 / 05	23.1	33.1	17.8	18.6	42.6	46.8	24.0	22.8	770
11 / 06	22.9	32.4	18.1	18.9	42.6	46.9	22.7	21.9	703
11 / 07	22.7	31.8	17.9	19.1	43.0	47.1	20.0	19.1	678
11 / 08	30.4	37.4	19.1	19.1	36.7	39.6	18.4	18.1	806
11 / 09	43.7	47.0	22.9	22.1	19.5	19.7	16.2	16.6	642
11 / 10	41.5	44.2	23.8	23.5	17.3	17.5	15.6	16.2	439
11 / 11	38.6	40.5	24.1	24.1	19.8	20.1	18.1	18.3	577
11 / 12	41.2	43.6	23.7	23.5	19.0	19.1	18.4	18.6	588
11 / 13	41.1	43.4	23.8	23.5	18.3	18.3	17.9	18.1	748
11 / 14	42.3	45.4	24.0	23.1	19.1	19.2	18.2	18.5	1,324
11 / 15	44.1	48.5	22.6	21.0	21.4	22.2	17.9	17.8	1,377
11 / 16	41.5	47.9	21.3	21.0	43.6	49.5	22.4	20.3	1,371
11 / 17	45.0	48.9	23.6	22.5	41.1	45.5	23.6	22.6	1,276
11 / 18	43.8	49.1	24.1	22.3	21.3	22.1	18.7	19.5	1,273
11 / 19	44.0	49.2	24.3	22.4	17.6	17.7	16.9	17.3	1,134
11 / 20	43.6	48.1	24.3	23.0	17.5	17.7	16.8	17.1	856
11 / 21	42.2	45.7	24.5	23.6	18.6	18.7	17.6	17.8	931
11 / 22	43.2	46.9	23.5	23.1	26.3	28.1	21.9	21.0	1,404
11 / 23	44.2	48.8	22.1	22.0	44.0	49.9	23.0	20.6	1,386
11 / 24	45.6	50.2	22.0	22.3	45.2	51.2	23.8	21.7	1,869
11 / 25	46.9	53.1	22.2	21.7	47.1	54.2	23.6	20.6	2,017
11 / 26	46.3	51.5	22.6	20.9	44.3	50.3	22.3	20.2	2,183
11 / 27	47.1	52.7	22.4	20.4	45.9	52.5	22.4	19.7	2,419
11 / 28	46.9	53.3	21.6	19.5	47.0	54.0	21.8	18.7	1,896
11 / 29	45.4	50.8	22.2	21.2	45.3	51.6	22.3	19.9	1,489
11 / 30	45.0	50.0	22.8	22.3	45.0	50.8	23.0	20.8	1,382
mean	38.8	44.5	21.8	21.4	33.9	37.2	20.9	19.9	1,145

- Tsout : Thermal storage tank outlet temp.
- Tsin : Thermal storage tank inlet temp.
- Hsout : Heat source outlet temp.
- Hsin : Heat source inlet temp.

Table 16. Daily temperatures(°C) of the water coming in and out of the heat pump in December 2010.

date	Heat pump 1				Heat pump 2				Power C. (kw)
	Tsout	Tsin	Hsout	Hsin	Tsout	Tsin	Hsout	Hsin	
12 / 01	44.1	48.7	23.1	22.6	43.9	49.4	23.3	21.4	1,647
12 / 02	45.8	52.3	23.6	23.3	46.9	53.1	23.8	21.1	1,809
12 / 03	45.7	52.0	21.7	20.9	46.5	53.2	22.0	19.1	1,789
12 / 04	44.5	49.6	21.4	20.2	44.2	50.5	21.4	19.0	1,341
12 / 05	43.9	48.7	21.5	21.8	43.6	49.4	22.2	20.2	1,653
12 / 06	45.5	51.3	21.5	21.0	46.0	52.3	21.8	19.3	2,033
12 / 07	46.0	53.0	20.9	20.0	47.1	54.3	21.3	18.0	2,148
12 / 08	46.1	53.0	21.4	20.2	47.0	54.4	21.7	18.3	1,954
12 / 09	45.9	52.1	20.8	19.5	46.5	53.4	21.0	18.0	1,419
12 / 10	44.6	49.2	20.9	20.8	44.2	49.8	22.0	20.1	1,697
12 / 11	44.6	50.4	21.1	20.5	45.1	51.8	21.2	18.5	2,237
12 / 12	46.0	53.5	21.6	20.3	47.1	54.8	21.9	18.2	1,438
12 / 13	44.6	51.5	21.8	22.1	46.4	52.8	22.2	19.4	2,140
12 / 14	46.0	52.9	20.3	19.1	47.0	54.4	20.5	17.1	2,544
12 / 15	46.7	53.6	20.5	18.1	47.1	54.7	20.5	16.8	2,514
12 / 16	46.4	53.9	20.6	18.6	47.2	55.0	20.9	17.2	2,339
12 / 17	46.2	53.7	21.6	20.4	47.2	55.2	22.1	18.3	1,774
12 / 18	44.6	49.8	19.0	18.1	44.3	50.4	19.9	17.6	920
12 / 19	43.9	47.3	19.8	20.4	43.6	48.3	20.9	19.6	1,367
12 / 20	44.3	49.3	20.5	20.3	44.1	50.3	21.5	19.2	1,561
12 / 21	43.9	49.5	20.3	19.9	44.0	50.3	21.2	18.8	1,731
12 / 22	44.5	50.0	20.2	19.4	44.4	50.9	20.6	18.1	1,930
12 / 23	44.9	50.7	19.8	18.5	44.9	51.5	20.5	17.8	2,621
12 / 24	46.1	53.3	19.6	16.8	46.5	54.1	19.7	16.1	2,638
12 / 25	46.4	53.4	19.6	17.0	46.7	54.2	19.6	16.0	2,869
12 / 26	46.4	54.1	19.5	16.4	46.8	55.0	19.5	15.5	1,921
12 / 27	45.2	51.8	20.0	19.2	46.1	53.0	20.6	17.6	1,801
12 / 28	45.5	51.8	19.3	18.8	46.2	53.1	20.5	17.5	1,916
12 / 29	44.3	50.0	19.5	18.1	44.2	50.9	19.9	17.3	2,661
12 / 30	46.4	53.9	19.1	16.8	47.1	55.1	19.4	15.6	3,141
12 / 31	46.6	54.2	18.6	14.7	46.7	54.8	18.4	14.4	2,771
mean	45.4	51.6	20.6	19.5	45.8	52.6	21.0	18.1	2,010

Table 17. Daily temperatures(°C) of the water coming in and out of the heat pump in January 2011.

date	Heat pump 1				Heat pump 2				Power C. (kw)
	Tsout	Tsin	Hsout	Hsin	Tsout	Tsin	Hsout	Hsin	
01 / 01	46.1	53.2	18.3	15.4	46.5	53.9	18.2	14.7	2,250
01 / 02	45.1	50.7	18.3	16.1	44.6	51.5	18.0	15.3	2,362
01 / 03	46.1	52.9	19.5	17.7	46.7	54.0	19.7	16.4	2,641
01 / 04	46.0	53.8	20.0	17.8	46.8	54.9	20.3	16.4	2,388
01 / 05	45.9	53.2	20.1	18.4	46.8	54.4	20.6	17.0	2,380
01 / 06	46.5	54.2	19.8	16.5	46.9	55.0	19.8	15.8	2,323
01 / 07	45.5	52.0	19.5	17.4	45.7	52.8	19.7	16.6	2,249
01 / 08	45.3	51.5	19.6	17.5	45.4	52.1	19.7	16.9	2,516
01 / 09	46.4	53.7	19.0	16.9	46.9	54.8	19.5	15.7	2,469
01 / 10	45.5	51.7	18.8	16.1	45.2	52.2	18.6	15.6	2,805
01 / 11	46.0	53.3	19.4	16.4	46.3	53.9	19.4	15.8	2,452
01 / 12	45.9	52.9	19.3	16.9	46.3	53.7	19.5	16.1	2,301
01 / 13	47.1	54.5	19.6	17.4	47.8	55.7	19.8	16.2	2,072
01 / 14	44.5	50.3	19.7	18.7	44.8	51.2	20.4	17.9	2,620
01 / 15	45.9	53.1	18.8	16.2	46.3	53.8	18.9	15.4	2,851
01 / 16	45.5	52.9	18.1	15.0	45.7	53.6	18.2	14.3	2,510
01 / 17	45.6	52.0	18.9	16.3	45.5	52.5	18.9	15.8	2,599
01 / 18	46.0	53.3	19.5	17.0	46.6	54.1	19.6	16.1	2,284
01 / 19	45.3	51.2	18.6	16.0	44.9	51.8	18.9	16.1	2,757
01 / 20	46.1	53.8	19.2	16.6	46.7	54.7	19.4	15.5	2,577
01 / 21	46.2	52.5	18.5	15.7	46.0	53.1	18.3	15.1	2,136
01 / 22	44.6	50.1	18.8	16.9	44.1	50.6	18.7	16.2	2,029
01 / 23	45.1	50.9	19.4	17.9	45.0	51.8	19.5	16.8	2,423
01 / 24	46.2	52.7	18.7	16.5	46.5	53.4	18.7	15.6	2,703
01 / 25	46.2	53.1	18.8	15.8	46.4	53.8	18.8	15.3	2,695
01 / 26	45.9	52.6	18.5	15.5	45.9	53.2	18.5	15.1	2,484
01 / 27	44.8	50.9	18.1	15.2	44.4	51.4	17.9	14.8	2,514
01 / 28	46.1	52.4	18.5	15.8	46.0	52.9	18.4	15.4	2,694
01 / 29	45.5	52.3	17.8	14.7	45.7	52.9	17.7	14.4	2,935
01 / 30	46.0	53.4	17.9	14.4	46.3	53.8	17.7	14.1	2,665
01 / 31	45.5	52.3	17.8	14.7	45.7	53.0	17.8	14.5	2,939
mean	45.8	52.5	18.9	16.4	45.9	53.2	19.0	15.7	2,504



2) 발전소 온배수열 이용이 하우스감귤과 망고의 실내온도 및 생육에 미치는 효과 분석

일반적으로 하우스감귤을 출하단경기인 5~8월에 출하하기 위해서는 극조기 또는 조기가온 재배를 하는 데, 11월부터 5월까지 생육적온인 18~24℃를 유지해 주어야 한다. 특히 7~8월 고온기에 수확할 경우에는 고온 때문에 감귤착색이 지연될 수 있어서 하우스온도를 25℃이하로 처리하여 줄 수 있다면 더욱 효과적으로 고품질 하우스감귤을 생산할 수 있다. 본 논문에서 세부적인 저온처리 데이터는 생략하였지만, 노지감귤원을 그대로 활용 비닐하우스를 시설하여 생육기를 5개월 정도 앞당기는 작형이기 때문에 화아분화 촉진을 위하여 9월 15일부터 10월 하순까지 하우스내 야간온도를 13~15℃로 저온 처리할 수 있었다. 본 열펌프 시스템은 냉·난방을 동시에 사용할 수 있기 때문에 작물의 출하조절에 유용하게 사용할 수 있는 장점이 있다.

11월 15일부터 가온을 실시한 결과 11월 27일에 야간 23℃ 조건에서 개화가 시작되었으며, 11월 28일부터 야간온도 24℃를 유지하여 관리한 결과 12월 2일에 만개하였으며, 만개이후에는 생리낙과를 최소화하기 위하여 다시 온도를 매일 1℃씩 낮추어주는 방식으로 관리하여 12월 7일부터 1월 25일까지는 17℃, 1월 1일부터 1월 25일까지는 16℃, 1월 26일부터 2월 5일까지는 17℃, 2월 6일부터 2월 17일까지는 18℃로 관리하여 착과가 최대한 많이 되도록 유도하였다.

이는 노지감귤을 하우스감귤로 바꾸면서 생육기의 변화를 유도하고 있어서 착과가 불안정 할 수 있기 때문이었다. 감귤하우스 온도를 올리는 과정에서도 하우스감귤 첫 해이기 때문에 수세 불안정과 1, 2차 생리낙과 시기에도 최대한 많은 착과를 위하여 2월 18일 19℃, 2월 24일 20℃, 3월 9일 21℃, 3월 20일 22℃, 4월 10일 23℃ 형태로 서서히 온도를 올리는 방식으로 관리하였다.

이후에는 5월 5일까지 24℃로 유지 관리하다가 수확예정일을 50여일 앞두고 착색기에 접어들면서 5월 6일 부터는 다시 온도를 낮추는 방식으로 관리하여(5월 6일 23℃, 5월 7일 22℃, 5월 13일 21℃, 5월 16일 20℃, 5월 23일부터 수확기까지 18℃), 6월말~7월상순에 13톤의 하우스감귤을 수확 출하였다.

Fig. 19, 20과 21에서 보는 바와 같이 2010년 11월 15일 가온처리 이후부터 2011년 1. 31일까지 최저기온 -5.1℃ 외기온도에도 불구하고 감귤하우스 내 온도

를 재배자가 원하는 온도를 지속적으로 유지할 수 있어서 발전소 온배수 열에너지 이용 시스템이 하우스감귤 재배에 안정적인 시스템임을 확인할 수 있었다.

이는 Table 18에서 보는 바와 같이 본 실증시험의 가온착수 1차년도 감귤원 개화시는 11월 27일, 만개기는 12월 2일, 수확기는 6월말로 일반재배 하우스감귤 작형과 비교하여 빠르게 생육이 진행된 것으로 11~12월 수확 작형인 노지감귤에서 6~7월 수확작형인 하우스감귤로 전환한 첫해이지만 비교적 나무 생리가 잘 적응된 것으로 사료되었다.

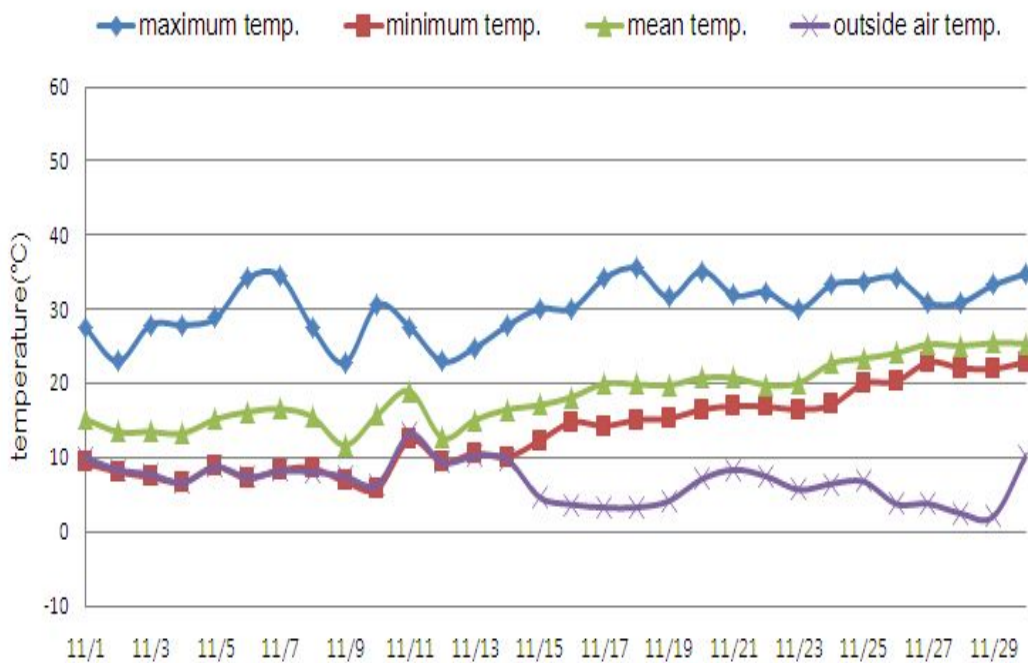


Fig. 19. Effect of hot waste water on the temperature inside the mandarin greenhouse in November 2010.



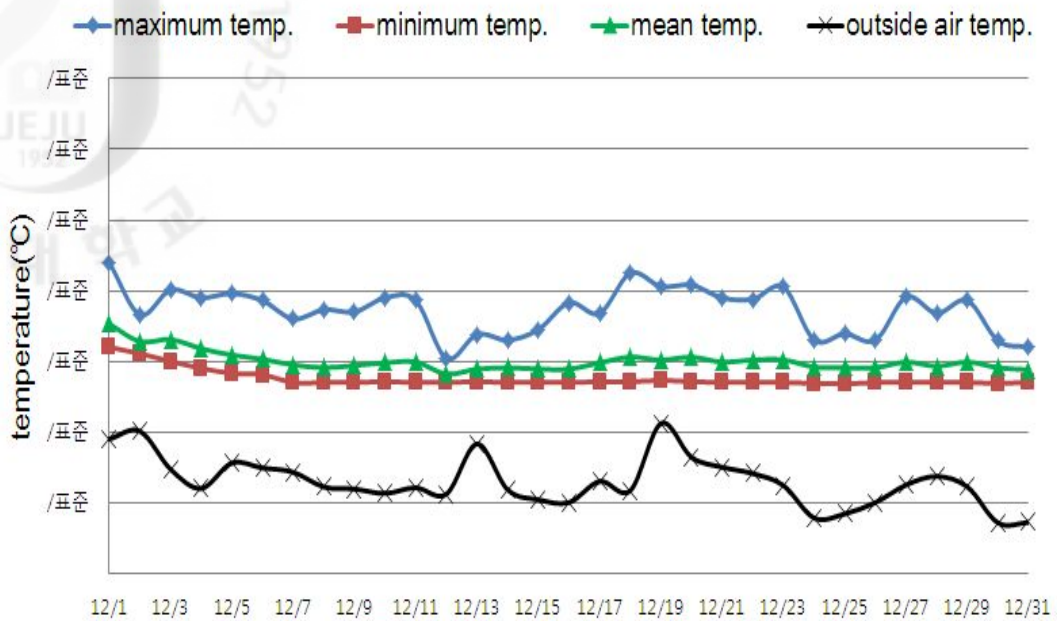


Fig. 20. Effect of hot waste water on the temperature inside the mandarin greenhouse in December 2010.

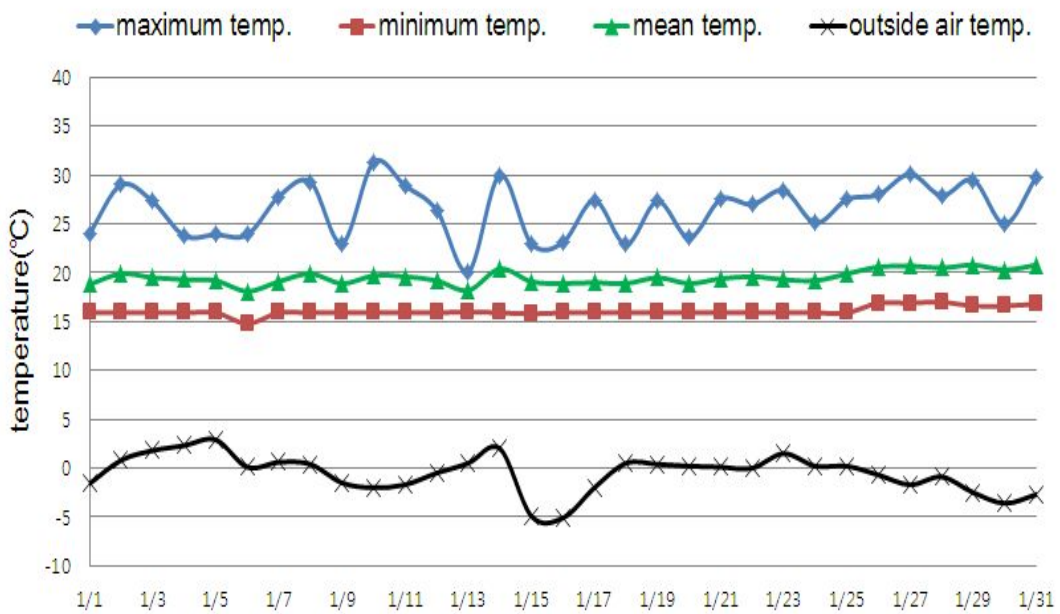


Fig. 21. Effect of hot waste water on the temperature inside the mandarin greenhouse in January 2011.

Table 18. Dates of major growth stages of Satsuma mandarin grown under the hot water heating system<sup>z</sup>.

Description	Date
Flowering	Nov. 27th
Full bloom	Dec. 2th
Maturation	Late June

<sup>z</sup> Started of heating on Nov.15th.

열대과수인 망고(*Mangifera indica* L.)는 가을이나 초겨울에 일장이 짧아지는 시기에 개화가 시작되며, 일장 이외에는 온도요인이 개화에 영향을 미친다. 란그라, 브라마시아 품종을 8시간의 단일처리로 개화를 유도했으나 실패하였고 nunez-elisea와 davenport는 주간온도가 18℃, 야간온도가 10℃일때 개화가 유도되는 결과를 도출하였으며, 제주지역 일반농가에서 망고재배는 2년의 유묘기간을 거쳐 3년 정도 생육을 한 후 생식생장을 한다(제주특별자치도농업기술원, 2010년)고 하였다.

Table 19에서 보는바와 같이 제주특별자치도농업기술원 상귀농업연구센터 시험포장에서 2004년부터 2006년까지 애플망고 Irwin 품종 5년생을 공시하여 최저가온온도 7℃, 출퇴시기 18℃, 개화기 이후에는 20℃ 내외를 관리한 결과 개화시는 2월 16일이었다고 하였는 데, 본 시험에서는 개화시가 11월 3일로서 106일정도 빠른 것으로 조사되었다.

또한 본 실증시험에서는 일반농가에 비해 성장속도가 빨랐는데, 이는 제주지역 망고재배 농가의 겨울철 관리는 유류비 부담 때문에 유묘기에는 10℃, 성목기에는 5~7℃ 정도로 생육유지를 위한 최저온도 관리를 하지만, 본 실증시험온실에서는 온배수 에너지를 이용하여 난방비 부담이 적으므로 겨울철에도 망고 생육 적온인 24℃(최저 22℃)를 유지시켜 줌으로서 겨울철에도 지속적 성장이 가능한 원인으로 사료된다.

망고 Irwin품종 4년생을 공시하여 최저온도 15℃를 유지하여 재배한 결과 신초

발생횟수는 3.1회라고 하였는 데, 본 시험에서 신초발생 횟수는 4.9회로서 1.8회가 많이 발생한 것으로 조사되었다(제주도농업기술원, 2003).

2010년 6월 20일 망고묘목 정식시 묘목은 초장 35~45cm, 엽수 20~25개 이었으며, 2011년 11월 20일까지 17개월 성장시킨 망고나무는 초장 150~180cm, 엽수는 240~360개 크기로 성장하였으며, 2011년 9월 20일부터는 저온처리와 상자 내 토양수분 스트레스를 통하여 개화를 유도하여 11월초 개화기에는 20℃, 이외 기간에는 연중 24℃를 유지 관리함으로서 11월 15일 전후가 만개기로서, 12월 31일 현재는 쉬파리를 활용한 수분수정이 완료된 비대기로서 2012년 4월에 수확이 가능할 것으로 예상되었다.

이렇게 함으로써 일반농가에 비하여 수확기간을 1년 이상 단축할 수 있었을 뿐만 아니라, 좋은 가격을 기록하는 단경기 수확을 통하여 보다 안정적인 농가소득이 가능한 작형으로 판단되었다.

Fig. 22, 23과 24에서 보는 바와 같이 2010년 11월 1일 부터 2011년 1. 31일까지 최저기온 -5.1℃ 외기온도에도 불구하고 망고하우스 내 온도를 재배자가 원하는 온도를 지속적으로 유지할 수 있어서 발전소 온배수 열에너지 이용 시스템이 하우스망고 재배에 안정적인 시스템임을 확인할 수 있었다.

본 실증시험 결과 온배수열 이용 시스템 장점은 하우스내 냉·난방 처리를 고온과 저온에 관계없이 재배자가 원하는 온도를 자유롭게 조절할 수 있기 때문에 식물의 화아분화와 생육시기별 적온유지, 출하기 조절, 고온기에 인위적인 저온처리에 의한 착색증진 등이 가능하였으며, 특히 일반유류(경유) 난방비의 13% 수준으로 냉·난방을 처리할 할 수 있기 때문에 냉·난방비에 대한 농가부담을 최소화 하면서 단경기 출하로 고소득을 올릴 수 있는 시스템임을 확인할 수 있었다.

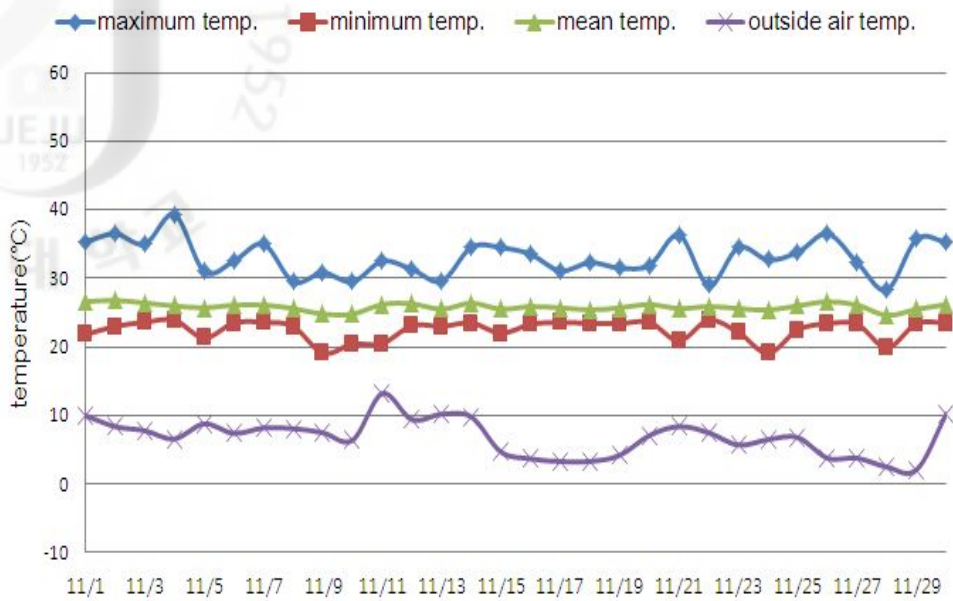


Fig. 22. Effect of hot waste water on the temperature inside the mango greenhouse in November 2010.

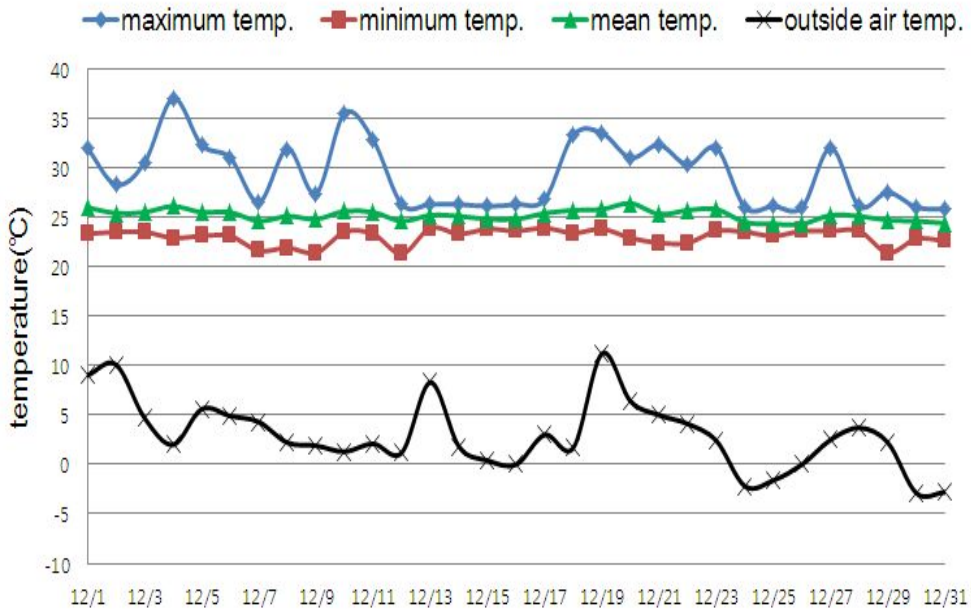


Fig. 23. Effect of hot waste water on the temperature inside the mango greenhouse in December 2010.

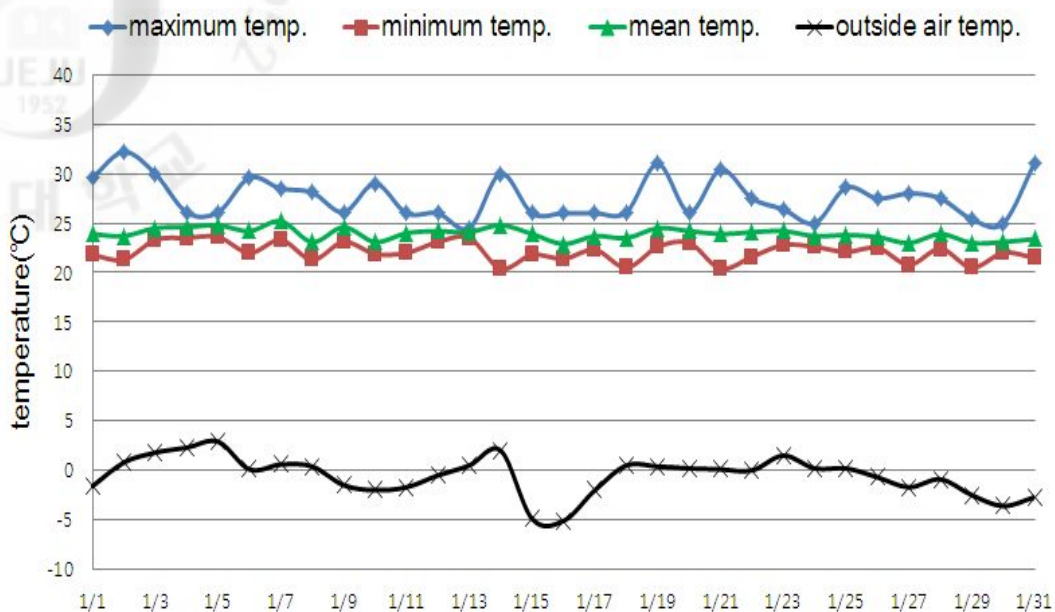


Fig. 24. Effect of hot waste water on the temperature inside the mango greenhouse in January 2011.

Table 19. Comparison of arriving dates at the major growth stages affected by different heating systems for mango.

Description	Date	
	General heating system	Hot waste water heating system
Flowering	Feb. 16th	Nov. 3th
Full bloom	Feb. 28th	Nov. 15th
Maturation	July 10th	Expected in early April

- Started of heating on Oct.11th

#### 4. 경제성 분석

##### 1) 발전소 폐열이용 온실난방 시스템 난방비 절감효과 분석

본 실증시험에 사용된 온실은 5,265m<sup>2</sup> 으로서 재배작물은 ‘궁천조생’ 온주감귤 3,050m<sup>2</sup>, ‘애플망고’ 2,215m<sup>2</sup> 이었으며, 분석에 활용된 난방비 데이터는 난방을 많이 실시하는 2010년10월15일부터 2011년2월28일까지 5개월을 분석대상 기간으로 하여 면세경유 대비 난방에너지 비용 절감율을 계산하였다.

분석결과, 대상기간 동안 본 폐열이용 난방시스템의 전력사용량은 226,641 kwh 이었고, 이에 따른 전력요금은 9,975,124원이었다. 반면, 같은 량의 에너지를 온풍난방기 사용으로 공급하였을 경우 면세경유 사용량은 76,013 L, 면세경유 구입비용은 76,013천원이 되는 것으로 조사되었다. 이를 환산하면 본 시스템 사용으로 난방에너지 비용 절감율은 87%(면세경유 대비) 이었다.

※ 난방비 절감분석에 사용된 기준

- 면세경유가격 : 1,000원/L 기준
- 전력요금 : 농업용(병) 36.4원/kwh
- 경유발열량 : 9,050kcal/L
- 난방기 열이용효율 : 85%

이용효과로는 기존 열풍난방기 대비 87%의 유류비가 절감되는 것 뿐 아니라 본 시스템의 가장 큰 장점은 겨울철에 저렴한 비용으로 충분한 에너지를 원하는 만큼 난방을 할 수 있을 뿐만 아니라 또한 여름철에도 냉방을 통하여 착색효과 등 출하시기를 자유롭게 조절할 수 있다는 점이 장점이었다.



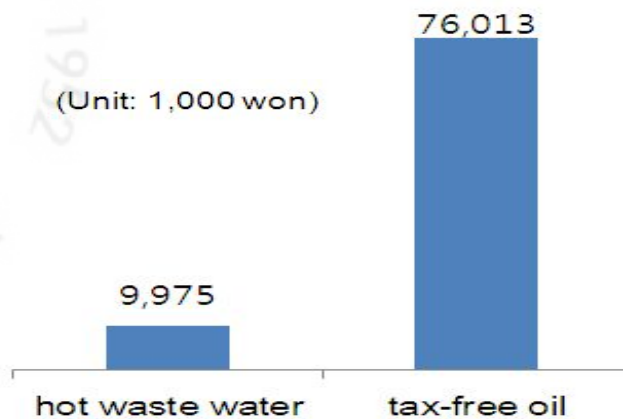


Fig. 25. Effectiveness of hot waste water and tax-free oil.

## 2) 경제성 및 투자비용 회수기간 분석

경제성분석은 현재 우리나라 시설농업에서 가장 많은 연료를 사용하는 작물중 하나인 수출용 파프리카 시설재배를 기준으로 작성한 농촌진흥청(2010) 지열히트펌프 효율성 자료에 본 실증시험 결과에서 도출된 온배수열 이용 난방비 절감율 87%를 적용하여 비교 평가하였다.

분석비용 단가적용은 지열 히트펌프 시설은 2011년도 농림어업에너지이용효율화사업(농림수산식품부) 사업비 13억원/ha를 적용하였고, 온배수열 이용 시설은 본 연구에서 최초로 설계되고 있으므로 아직 정형화된 사업 메뉴얼은 없어 본 실증시험을 근거로 2011년도 사업이 진행 중인 온배수열 이용 사업에 대하여 한국농어촌공사 제주지사에서 설계한 시설비용 ha당 10억원을 기준으로 본 경제성 분석을 실시하였다.

시설농업에 온배수열을 이용한 열펌프 설치 시 기존의 경유 온풍난방 방식에 비해 초기비용이 많이 드나, 에너지 사용비용이 적게 들어 3.19년이면 온배수열 에너지이용 시설비용 회수가 가능할 것으로 분석되었다. 또한 지열히트펌프 시설은 투자비 회수기간이 4.26년이 소요되는 것으로 분석되었다(Table 20).

열펌프 시설은 수명이 반영구적이므로 초기시설비 부분만 해결되면 농가에서는 장기적이고 안정적으로 냉·난방 에너지를 자유롭게 활용할 수 있기 때문에 작물의 출하조절 등 보다 과학적이고 안정적으로 농업을 영위할 수 있을 것으로

사료되었다.

지열히트펌프 사업은 지식경제부와 농림수산식품부에서 국가적인 시설원에 화석연료 문제를 해결하고자 2009~2014년까지 매년 2,000억원, 총 1조원 예산이 투자되는 사업으로 추진되고 있다. 지열히트펌프 난방비 절감율은 75~78% 정도로 조사 보고되고 있으며 가장 효율성이 높은 시스템으로 평가(U.S. Department of Energy, 2001)되고 있는 데, 본 연구결과 온배수열 이용시스템 난방비 절감율은 87%로 지열보다 10% 정도 절감효과가 높은 시스템으로 확인되었으며, 분석 결과 투자비 회수기간도 온배수열 이용시스템이 지열활용 시스템보다 1.07년(25%)을 앞당길 수 있을 것으로 평가되었다.

Table 20. Cost/benefit analysis of the heat pump using hot waste water(Unit: 1,000 won, ha)

Description		Hot waste water	Geothermal
Investment cost	Equipment cost	1,000,000	1,300,000
Cost retrieval	Annual reduction in energy expenses	197,490	189,000
	Increased annual income *due to increased crop	105,000	105,000
	CO <sub>2</sub> reduction (306ton/year)	11,000	11,000
	Subtotal	313,490	305,000
Payback period	Equipment cost	3.19년	4.26년

- 연간 에너지비용 감소와 연평균 소득증가로 하우스시설을 제외한 온배수 열 에너지 이용 설치비용은 약 3.19년이면 회수가 가능

· 온배수열 이용시설 : 1,000백만원 ÷ (197.49 + 105 + 11백만원) = 3.19년

· 지열 이용시설 : 1,300백만원 ÷ (189 + 105 + 11백만원) = 4.26년

※ 분석자료 근거 및 기준

· 설치비용 및 연간 에너지비용 : 농촌진흥청 표준소득조사(2010년)



- 단가기준 : 농업용 전기 40원/kwh, 면세경유 1,000원/ℓ
- 시설비 : 온배수열 이용 10억원, 지열 이용 13억원/ha
- 연간 에너지 비용 : 파프리카 경유 사용 227천천원/ha
- 연평균 소득 : 열펌프 설치시 여름철 냉방이 가능하여 파프리카 연간 생산량 30% 증가하는 것으로 조사, 파프리카 농가 '08년 ha당 평균 조수익 근거
- CO<sub>2</sub> 감축 자료 : 주식회사 에코아이 제공

발전소 온배수 열에너지 이용 시설은 집단화 할수록 에너지 이용효율이 높고, 온배수 송·배수관 및 저류조 시설비용 등이 절감되기 때문에 가능한 발전소 인근에 집단적으로 보급되는 것이 바람직하다. 앞으로 얼마만큼 온배수 또는 온배수열을 이동할 경우 경제성이 맞을 것인지 추가적인 연구가 뒤따라야 하겠지만 본 연구자의 판단으로는 송수관을 보온 피복하여 지하로 매설할 경우 온배수부터 10km 내에서는 경제적인 활용이 가능하리라 사료된다. 송·배수관 길이가 길어지면 Table 21에서 보는바와 같이 시설비용이 많아지는 데, 시설비용은 1km 기준 386,313천원 정도이다(농어업·농어촌특별대책위원회, 2009).

Table 21. Investment cost into the pipeline system using hot waste water from power plant. (Unit : 1,000 won)

Length of pipes (m)	1,000m	1,500m	200mm in diameter
Double PE insulation panel, material cost (2 lines)	136,000	204,000	68,000 won/meter
Double PE insulation panel, construction cost (2 lines)	59,194	88,791	29,597 won/meter
Pump to supply saltwater (2 units)	34,000	34,000	25kw for saltwater pump
Excavation and recovery of the road	100,000	150,000	100,000 won/meter
Installation of electric facilities and pumps	22,000	22,000	
Profit, incidental expenses	35,119	49,879	(material+labor)×10%
<b>Total</b>	<b>386,313</b>	<b>548,670</b>	

- Source : Special Commission on Agriculture, Fisheries and Rural Policies, 2009.

### 3) 발전소 온배수열 이용시 시설농업의 CO<sub>2</sub> 배출 저감효과 분석

지구온난화로 인하여 탄소배출 저감문제가 국제사회의 시대적 과제가 되고 있으며, 2002년 세계 최초로 영국에 탄소배출권 시장이 개설된 이래 서유럽 전역에 많은 탄소배출권 거래가 이루어지고 있다. 교토의정서 발효 이후 탄소배출권 시장 규모는 유럽을 중심으로 2005년 109억달러에서 2008년 1,263억 달러로 약 12배 증가하고 있으며, EU 및 미국시장을 중심으로 20여개 이상 탄소배출권거래소가 설립되어 운영되고 있다(한국은행 부산지점, 2010).

우리나라도 CO<sub>2</sub> 저감에 앞장서고자 2020년 30% 저감목표로 정책을 추진하고 있으나 실질적인 성과는 매우 부족한 실정이다. 에너지경제연구원에 의하면 2020년의 CO<sub>2</sub> 발생량을 1995년 수준으로 안정화시켜야 할 경우, 1억 1천만 TC(탄소톤)을 감축해야 하며 CO<sub>2</sub> 1톤당 저감비용은 6백90달러가 소요되므로 우리나라 CO<sub>2</sub> 감축에 소요되는 GDP는 2020년에 약 9조2천억원이 소요될 것으로 전망하

였다.

우리나라 1차 에너지 중 화석에너지가 차지하는 비중은 87.5%(한국에너지기술연구원, 1997년)로서 시설농업에서는 대부분 경유 등을 사용하고 있어서 구조적인 개선이 시급한 실정이다. 우리나라 시설농업에서 난방용으로 사용하고 있는 에너지는 대부분 경유 또는 등유를 사용하므로 경유와 등유를 발전소 폐열로 대체하였을 경우 온실가스 저감량을 산출하였다. Table 22에서 보는 바와 같이 시설농업 10ha에 온배수 에너지로 경유 에너지를 대체할 경우 연간 3,063 t CO<sub>2</sub>가 저감되는 것으로 분석되었다.

Table 22. The effect on the reduction in CO<sub>2</sub> emission by the use of hot waste water from power plants.

Acreage	Consumption of fossil oil		CO <sub>2</sub> reduction due to hot waste water
1 ha	Diesel	116,784 L	306.3 tCO <sub>2</sub> /yr
10 ha	Diesel	1,167,840 L	3,063 tCO <sub>2</sub> /yr
1 ha	Heavy oil (boiler)	116,784 L	293.9 tCO <sub>2</sub> /yr
10 ha	Heavy oil (boiler)	1,167,840 L	2,939 tCO <sub>2</sub> /yr

- Source: Planning & Marketing Team at Ecoeye (Co), 2010

※ 연료사용에 의한 온실가스 배출량 산출방법(1ha)

- 경유사용 : 116,784 L/yr × 0.0000354TJ/L × 74.1tCO<sub>2</sub>/TJ = 306.3 tCO<sub>2</sub>/yr
- 등유사용 : 116,784 L/yr X 0.0000350TJ/L X 71.9tCO<sub>2</sub>/TJ = 293.9 tCO<sub>2</sub>/yr
- 순발열량 적용기준 : 경유 - 8,450 kcal/L, 0.0000354 TJ/L.

등유(보일러) - 8,350 kcal/L, 0.0000350 TJ/L

♪ 출처 : 에너지기본법 제5조 1항 관련 에너지열량환산기준

- 배출계수 적용기준 : 경유 - 74.1 tCO<sub>2</sub>/TJ. 등유(보일러) - 71.9 tCO<sub>2</sub>/TJ

♪ 출처 : 2006 IPCC Guideline Chapter 1 Table 1, 4

## V. 종합고찰

본 연구에서는 많은 열에너지 자원인 발전소 온배수를 시설농업에 효율적으로 활용함으로써 시설농가 냉·난방에 따른 경영비를 대폭 줄이고, CO<sub>2</sub> 발생을 줄여 국가의 저탄소 녹색성장에 기여코자 수행하였다.

우리나라 온배수 배출량은 473.3억톤으로서 1Twh의 전력을 생산하는데 평균 1.38억톤의 온배수를 배출하였으며 해역별 연간 배출량은 서해안이 206.9억톤(인천·경기해역 34.3, 태안·보령해역 98, 영광해역 74.6억톤) 이었다. 남해안에는 총 73.5억톤이 배출되었으며 제주해역에는 2.3억톤이 배출되었다. 동해안에는 총 189.9억톤(동해중부해역 66.4, 동해남부해역 123.5억톤)이 배출되었다.

화력발전소 열효율성은 40% 정도로서 제주지역 온배수 폐열 부존량은 남제주 화력발전소 69,400TOE/yr, 제주화력발전소 73,700TOE/yr로서 약 143천TOE/yr이다. 한림복합발전소는 전력 부족시에 가동하는 냉각탑방식 발전소로서 온배수가 발생되지 않았으며, 남제주화력발전소 온배수 평균온도는 2010년 12월 27.46, 2011년 1월 25.57, 2월 24.71, 3월 24.83℃로서 최저수온 시기는 2월이었고, 최고수온 시기는 8월 32.64℃로서 연평균 28.20℃이었다. 유입되는 바닷물과의 온도차는 2010년 12월 9.16, 2011년 1월 9.10, 2월 9.30, 3월 9.44℃로서 연평균 8.15℃이었다.

발전소 온배수열 에너지이용 시설원에 냉·난방 장치 실험을 위하여 실증온실 5,000m<sup>2</sup>, 외기온도 -5.0℃, 온실온도 20℃를 기준으로 하였을 때, 최대난방부하량은 480,937kcal/hr이었으므로 실증시험 열펌프 설계용량을 120RT, 축열조 용량은 난방용 80TON, 냉방용 50TON 규모로 설계 시공하였고 온실내부에 열을 공급하는 방열기는 풍량 56m<sup>3</sup>/min 용량의 FAN MOTER를 사용하였으며, 제주지역 온배수 폐열부존량은 143.1천 TOE/yr으로 시설원에 작물을 최저기온 20℃로 난방시 1,028ha, 24℃로 난방할 경우에도 631ha의 시설난방이 가능한 엄청난 에너지량으로 확인되었다.

금속재질의 열회수장치를 활용한 냉·난방시스템 실험에서 열회수장치는 발전

소 점검기간을 활용하여 온배수조 내부에 설치하였으며 열회수장치 제원은 부식을 고려하여 SUS 316 재질을 사용하였으며 중량은 1,950kg, 용량은 열펌프 90RT에 공급될 수 있도록 300천Kcal/hr로 제작하였다. 열펌프 30RT는 PE 파이프를 이용한 실증시험으로 추진하였다. 송배수관은 175m로 거리가 짧고 20~25℃ 정도의 저온수를 이동시키는 관계로 도로부분을 제외하고는 지상부에 노출시켜 누수여부 확인이 용이하도록 하였고 별도 보온처리는 하지 않았으나, 장거리 이동시 송수관에 대해서는 가능한 보온처리 후 지하매설 하는 것이 열이용 효율이 높을 것으로 사료되었다.

PE파이프 열회수장치를 활용한 효율성 검증에 사용된 PE 파이프 총길이는 2,800m, 30RT 규모로서 난방성능계수를 측정하기 위하여 105kw급 히트펌프시스템에 전력량계, 유량계, 온도센서 등을 설치하여 시험한 결과 증발기측 열매체 입구온도가 21.3℃, 응축기측 열매체 입구온도가 45.3℃일때 증발열량은 108.1kw, 응축열량은 144.9kw, 소비전력은 37.2kw, 난방성능계수는 3.9로 나타났다.

PE파이프 열회수장치를 활용한 시스템의 특징은 발전소 온배수의 부식성과 온도 특성을 고려한 가변형 폐열 회수장치라는 점이다. PE 파이프를 Roll 형태로 제작함으로써 내부식성을 향상시킬 수 있고, PE 파이프를 사용함으로써 제작비를 절감할 수 있으며, 장기 사용시 내구성을 고려한 열펌프의 안전제어방법을 채택할 수 있는 등 여러 가지 장점이 있는 것으로 사료되었다.

PE파이프 열회수장치를 활용한 발전소 온배수열 이용 시설원에 냉·난방 시스템 설치활용 방법은 다음과 같다. ①열에너지를 이용할 시설원에 단지 내에 온배수를 담아 둘 수 있는 온배수조를 지하에 시설하고, 온배수조 내에 열회수용 PE관이 최대한 많이 설치되도록 차곡차곡 롤 형태로 쌓아서 시설한 뒤, 송·배수관(Φ 200~250mm)을 통하여 온배수조에 온배수를 끌어올려 가득 채운다. ②PE관 내에 물을 순환시켜 온배수 열을 회수하고 열이 회수된 물을 열펌프에 연결, 열펌프에서 물 온도를 45~55℃로 올리거나 또는 8~10℃로 낮추어 각각 온수탱크와 냉수탱크에 저장하여 둔다. ③뜨거운 또는 차가운 물을 하우스내에 설치된 환유닛을 통하여 하우스 공기를 냉·난방 활용한다. ④온실냉·난방을 자동제어하고 열펌프 입·출구 및 축열조 온도, 온실 각각 내부온도, 투입전력량 등을 자동제어 및 데이터 저장 시스템에 저장한다.

하우스감귤과 하우스망고에 직접 온배수열 열펌프를 설치하여 작물재배 가능성과 효율성을 조사한 결과 외기온도가  $-5^{\circ}\text{C}$  내외로 떨어지는 2011년 1월 15일~16일에도 축열조 평균온도는  $48.3^{\circ}\text{C}$ 를 유지함으로서 온실에 충분하게 에너지를 공급할 수 있는 시스템 용량으로 판단되었다. 2011년 1월중 증발기와 응축기의 입출구 물온도 변화를 조사한 열펌프의 증발기에서  $16.1^{\circ}\text{C}$ 의 물이 온배수덕트로 가면  $19.0^{\circ}\text{C}$ 로 데워져서 다시 증발기로 들어옴으로서 약  $2.9^{\circ}\text{C}$ 의 온배수 열에너지를 활용한 것으로 분석되었다. 또한  $45.9^{\circ}\text{C}$ 인 축열조의 물이 열펌프의 응축기로 들어가면  $52.9^{\circ}\text{C}$ 로 데워져서 다시 축열탱크로 들어감으로서 평균  $7.0^{\circ}\text{C}$ 가 온실에 사용된 것으로 조사 분석되었다.

발전소 온배수 이용 하우스감귤 1차년도 생육기는 가온시작 11월 15일, 개화시 11월 27일, 만개기 12월 2일, 성숙 수확기는 6월 하순으로 조생온주 감귤  $3,050\text{m}^2$ 에서 13톤의 감귤을 수확 출하하였으며, 애플망고 Irwin 품종 2년생을 공시하여 실험한 결과 개화시가 11월 3일로서 일반농가(최저온도  $7^{\circ}\text{C}$ , 출회시기  $18^{\circ}\text{C}$ , 개화기 이후  $20^{\circ}\text{C}$  내외 관리) 보다 106일정도 빠른 것으로 조사되었다. 또한 본 실증 시험에서는 온배수 에너지를 이용하여 난방비 부담이 적으므로 겨울철에도 망고 생육적온인  $24^{\circ}\text{C}$ (최저  $22^{\circ}\text{C}$ )를 유지시켜 줌으로서 겨울철에도 지속적 성장이 가능하여 최저온도  $15^{\circ}\text{C}$ 를 유지한 일반재배에서는 신초 발생횟수는 3.1회인 반면 본 시험에서 신초발생 횟수는 4.9회로서 1.8회가 많이 발생한 것으로 조사되었다.

발전소 폐열이용 온실난방 시스템 난방비 절감효과 분석은 온실  $5,265\text{m}^2$ 에서 ‘궁천조생’ 온주감귤  $3,050\text{m}^2$ , ‘애플망고’  $2,215\text{m}^2$ 를 재배하면서 2010년 10월 15일부터 2011년 2월 28일까지 5개월을 분석대상 기간으로 하여 면세경유 대비 난방 에너지 비용 절감율을 계산한 결과 폐열이용 난방시스템의 전력사용량은 226,641 kwh 이었고, 이에 따른 전력요금은 9,975,124원이었다. 반면, 같은 량의 에너지를 온풍난방기 사용으로 공급하였을 경우 면세경유 사용량은 76,013 L인 것으로 조사되었고, 면세경유 구입비용은 76,013천원이 되는 것으로 조사되었다. 이를 환산하면 본 시스템 사용으로 난방에너지 비용 절감율은 87%(면세경유 대비) 였다.

투자비용 회수기간 분석은 시설농업에 온배수열을 이용한 열펌프 설치 시 기존의 경우 온풍난방 방식에 비해 초기비용이 많이 드나, 에너지 사용비용이 적게 들어 3.19년이면 온배수열 에너지이용 시설비용 회수가 가능할 것으로 분석되었



으며, 지열히트펌프 시설은 투자비 회수기간 보다 1.07년 정도 시설비 회수기간이 단축되는 것으로 분석되었다.

발전소 온배수열 이용시 시설농업의 CO<sub>2</sub> 배출 저감효과 분석은 시설농업 1ha에 온배수 에너지로 경유 에너지를 대체할 경우 연간 306.3 t CO<sub>2</sub>가 저감되는 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 발전과정에서 발생하는 많은 온배수 폐열(투입에너지의 화력발전소 60%, 원자력발전소 64% 내외)을 회수하여 시설농업에 활용하였다. 발전소 냉각수인 온배수는 바닷물 인입온도와 배출온도 차를 최소화하기 위하여 많은 동력을 들여서 많은 바닷물을 끌어올려 냉각수로 활용하고 있으나, 에너지를 활용하는 측면에서는 높은 열원이면 좀더 효율적으로 발전폐열을 이용할 수 있으므로 발전소 내에서 냉각수 과정을 거치기 전 단계에서 발전소 폐열에너지를 회수하는 방법이 연구되면 국가 이익에 크게 기여할 수 있을 것으로 사료된다. 이는 발전소 시스템을 변경해야 되는 사항이므로 정부·관련 학계·발전소 관계자의 공동연구로 추진되어야 할 것이다. 더 나아가서 이러한 발전폐열 회수 시스템을 연구하고 그 결과를 관련법에 반영하여 추후 신규 발전소 건립시(또는 기존 발전소에도 보완시설)는 반드시 효율적인 폐열회수 시스템이 발전소 설계에 반영되어 국가 에너지 수급에 도움이 되어야 한다.

또한, 발전소 폐열 회수에너지 이동거리에 관한 추가 연구가 필요하다. 본 연구에 활용된 장소는 발전소 온배수조로부터 175m 지점에 위치하고 있으며 송·배수관은 열손실이 적을 것으로 판단되어 무 보온 지상노출 방식을 채택하여 설치하였으나, 앞으로 보다 안정적으로 폐열을 이용하기 위해서는 몇 km까지 온배수 열을 경제적으로 이동할 수 있을지 추가적인 연구가 이루어져야 할 것이다. 본 연구자의 의견으로는 열펌프 인입전 물 온도는 20~25℃ 정도의 저온이기 때문에 지하매설과 송수관의 보온이 이루어질 경우 수 km까지는 충분히 활용이 가능하리라 사료되었다.

본 시스템의 확대보급에 가장 걸림돌은 시설비용의 문제이다. 지구온난화에 따른 화석연료 문제는 시급하게 해결해야할 과제이다. 이러한 문제 해결의 방법인



태양열, 지열, 해수열 등을 활용하는 신재생에너지 분야에서 경영비 절감과 소득액에 의한 단편적인 경제성 분석은 의미가 적다고 할 것이다. 국가를 운영하는 기반조성 차원에서 국가는 예산을 지원하고 권장해야 할 것이다. 다행히 정부에서는 태양열, 지열, 해수열, 폐열 등을 농업부문에 활용할 경우 신·재생에너지 권장 정책으로 정부보조 80%(국가 60%, 지방자치단체 20%), 농가 자부담 20% 비율로 사업이 추진되고 있으므로 이 사업을 활용하면 농가에서는 큰 부담을 줄일 수 있다.

발전소 온배수 이용은 지열히트펌프 방식과 유사하나 지열이 아닌 온배수에서 열 회수를 한다는 점이 다른 점이며 온배수는 지열보다는 온도가 높고 물이기 때문에 열 회수 효율성이 높다. 단점으로는 발전소가 사업장과 거리가 멀수록 시설비가 많이 소요된다는 점과 티타늄·SUS-316, PE파이프 등 부식방지용 재를 사용해야 한다는 점이다. 우리나라 발전소는 대부분 바닷가에 위치하기 때문에 시설농업 여건이 불충분하거나 토양이 척박하다면 양액베드를 만들어 시설농업에 활용할 수 있고, 상자를 이용한 열대과수 재배도 가능하다.

온배수의 열 에너지는 매우 많기 때문에 겨울철에도 원하는 높은 온도를 이용하면서 자신있는 시설농업을 영위할 수 있는 장점이 있다. 또한 열펌프 방식은 냉방과 난방이 동시에 가능하기 때문에 저온처리를 통한 작물의 출하시기를 조절할 수 있어 과학영농 실천에도 기여할 것이다. 바다로 버려지는 발전소 온배수 이용은 CO<sub>2</sub> 배출량을 줄여 저탄소 녹색성장 정부 목표에도 부합되고 발전소와 인근 농업인간의 대립적인 관계에서 협력적인 관계로 발전할 수 있으며 무엇보다도 농가 경영비 부담을 줄여 보다 안정적인 소득창출이 가능하다. 발전소 온배수 에너지를 대량으로 활용할 경우 바다에 방출되는 온도를 낮출 수 있어 해양환경을 보전하는 데에도 효과가 있을 것으로 기대되고 있다.

프랑스 전력공사는 1976년 이후 온배수 이용에 대한 연구개발에 관심을 갖고 이용가능성의 지속적인 모색과 관련분야 사업에 온배수 이용을 적극적으로 장려하고 있으며, 사업자가 온배수를 이용하는 경우 원전에서 온배수를 무상으로 공급하고 온배수 이용관련 기술적 부분과 제반시설에 드는 비용은 사업자가 부담하는 것을 원칙으로 추진하고 있는 프랑스 정책에 관심을 가질 필요가 있다.

정부는 그동안 발전소 온배수 관련 어민들의 민원 보상으로 1980년 이후 약

3,230억원(원자력발전소 1,771억원 기력발전소 1,459억원) 이상을 사용하면서 온배수 이용방법 연구와 근본적인 해결방안에는 관심이 적은 것 같다. 어쩔 수 없이 발생하는 발전소 폐열이지만 귀중한 열원이기 때문에 활용방안이 앞으로 다각적으로 검토되어야 할 것이다. 발전소 온배수 폐열 재활용은 안정적이고, 친환경적이며, 매우 활용하기 쉬운 열원으로서 저탄소녹색성장을 지향하는 우리나라에 꼭 필요한 사업이므로 본 연구를 바탕으로 정부의 적극적인 정책수립이 필요하다.

## VI. 적 요

본 연구에서는 최근 우리나라 국가시책에 반영되어 활발하게 보급되고 있는 지열에너지와 온배수열 에너지의 이용 효과를 비교 분석하여 많은 열에너지 자원인 발전소 온배수를 시설농업에 효율적 활용효과를 밝힘으로서 시설농가 냉·난방에 따른 경영비를 대폭 줄이고, CO<sub>2</sub> 발생을 감소시켜 국가의 저탄소녹색성장 정책에 부응하는데 목적을 두고 수행하였다.

우리나라 온배수 배출량은 1Twh의 전력을 생산하는데 평균 1.38억톤의 온배수를 배출하고 있으며 총 배출량은 연간 473.3억톤 이상으로 제주해역에는 연간 2.3억톤, 약 143천TOE(tonnage of oil equivalent)에 해당하는 에너지가 배출되고 있다. 남제주화력발전소 온배수온도는 겨울철 25~28℃(최저 2월), 여름철 32~35℃(최고 9월)로 조사되었다. 우리나라 화력발전소 온배수 폐열배출량은 388천 GWh 이상 될 것으로 추정되며, 연간 온실난방 소요 에너지가 13,217GWh(시설난방면적 13천ha, 경유 소비량 1,256천kl 에너지)이므로 발전폐열의 3.4%에 해당되는 량이다. 제주지역 온배수를 이용하여 시설 냉·난방이 가능한 면적은 최저기온 20℃ 난방시 1,028ha, 24℃ 난방시 631ha로 분석되었다.

금속재질의 열회수장치는 바닷물 부식을 고려하여 SUS 316 재질을 사용 제작하였으며 중량은 1,950kg, 용량은 300천 Kcal/hr로 90RT에 사용될 용량으로 제작하였다. 실증시스템을 2010. 7.27일 준공하여 2011. 2.28일까지 6개월간 실증연구를 추진한 결과 시스템은 정상적으로 운영되었고 열 이용효율이 높았다. 단, 발전소 온배수조 내에 열회수장치를 설치함으로써 시설의 유지관리가 어렵다는 점과 열회수장치를 연결하는 쇠사슬 고리와 장치를 지지하는 받침대가 바닷물에 부식되어 고정부분에서 이탈되는 문제점을 발견할 수 있었다.

발전소 온배수열 회수 및 효율적 활용을 위하여 기존의 금속재질의 열회수장

지에서 PE 파이프를 활용한 발전소 온배수열의 에너지를 이용하는 시설원에 냉·난방시스템을 개발하여 효율성을 검증하였다. PE파이프 열회수장치를 활용한 효율성 검증에 사용된 PE 파이프 총길이는 2,800m, 30RT 규모로서 난방성능계수를 측정하기 위하여 105kW급 히트펌프시스템에 전력량계, 유량계, 온도센서 등을 설치하여 시험한 결과 증발기측 열매체 입구온도가 21.3℃, 응축기측 열매체 입구온도가 45.3℃일때 증발열량은 108.1kw, 응축열량은 144.9kw, 소비전력은 37.2kw, 난방성능계수는 3.9로 나타났다.

PE 파이프를 사용함으로써 부식의 문제를 해결하였으며, 제작비를 27% 이상 절감할 수 있었다. 앞으로는 온배수조를 농장 내에 설치하면 열회수장치의 확대, 고장수리 등 작업을 수시로 진행할 수 있는 장점이 있을 것으로 사료되었다.

2010년 11월 1일부터 2011년 1월 31일까지 분석기간 동안에 서귀포시 안덕면 화순리 지역의 외기온 최저온도는 2011년 1월 -5.1℃ 이었으며, 외기온 변화에 따른 축열조 최저온도는 2010년 11월 43.6℃, 12월 45.0℃, 2011년1월 44.2℃로서 축열조 온도는 외기온 변화와 하우스감귤, 하우스망고 온실에 사용한 에너지량에 관계없이 일정한 온도를 유지하였다. 또한 외기온 -5.1℃일 때 하우스망고 실내최저온도는 다른 일자와 동일한 22℃정도를 유지하여 외기온 변화에 관계없이 열에너지를 공급할 수 있는 안정된 시스템임을 확인하였다.

본 실증시험 결과 온배수열 이용 시스템 장점은 하우스내 냉·난방 처리를 고온과 저온에 관계없이 재배자가 원하는 온도를 조절할 수 있기 때문에 식물의 화아분화와 생육시기별 적온유지, 출하기 조절, 고온기에 인위적인 저온처리에 의한 착색증진 등이 가능하였으며, 특히 일반유류(경유) 난방비의 13% 수준으로 냉·난방을 처리할 할 수 있기 때문에 냉·난방비에 대한 농가부담을 최소화 하면서 단경기 출하로 고소득을 올릴 수 있는 시스템임을 확인할 수 있었다.

발전소 온배수 이용 하우스감귤 1차년도 생육기는 가온시작 11월 15일, 개화시 11월 27일, 만개기 12월 2일, 성숙 수확기는 6월 하순으로 조생온주 감귤 3,050㎡

에서 13톤의 감귤을 수확 출하 하였다.

발전소 온배수 이용 하우스망고는 2,215m<sup>2</sup>에 2년생 애플망고 Irwin 품종 묘목을 200ℓ 플라스틱 상자에 심어 실증시험을 추진하였다. 년 4.9회 새순을 발생시켰으며 출퇴기는 10월 11일, 개화시는 11월 3일, 만개기는 11월 15일로서 일반농가에 비하여 수확기간을 1년이상 단축할 수 있었다.

본 실증시험 온실 5,265m<sup>2</sup>(조생온주 감귤 3,050m<sup>2</sup>, 애플망고 2,215m<sup>2</sup>)에서 2010년 10월 15일부터 2011년 2월 28일까지 5개월 동안 온배수열 이용 난방시스템의 전력사용량은 226,641 kwh 이었고, 이에 따른 전력요금은 9,975,124원이었다. 반면, 같은 량의 에너지를 온풍난방기 사용으로 공급하였을 경우 면세경유사용량은 76,013L인 것으로 조사되었고, 면세경유 구입비용을 1,000원/ℓ으로 적용할 경우 76,013천원이 되는 것으로 조사되었다. 이를 환산하면 본 시스템 사용으로 난방 에너지 비용 절감율은 87%(면세 경유 대비) 이었다.

과프리카 시설재배를 대비하여 경제성 및 투자비용 회수기간을 분석한 결과 시설농업에 온배수열을 이용한 열펌프 설치 시 3.19년이면 온배수열 에너지이용 시설비용 회수가 가능할 것으로 분석되었다. 이는 지열이용 시스템보다 1.34년(25%)을 앞당길 수 있을 것으로 평가되었다.

시설원에 1ha에 온배수 열에너지로 경유 에너지를 대체할 경우 연간 306.3 t CO<sub>2</sub>가 저감되는 것으로 분석되었다.

## VII. 인용문헌

- Ayder, E., Braembussche, R. A. and J. J. Brasz. 1993. Experimental and theoretical analysis of the flow in a centrifugal compressor volute. ASME J. of Turbomachinery. 115:582-589.
- Ball, D. A. and R. D. Fisher. 1983. Design Methods for Ground-Source Heat Pumps", ASHRAE Trans. Vol. 89, Part 2Bm pp.416-440.
- Bose J. E. 1984, "Closed-loop ground-coupled heat pump design manual, Stillwater, OK". Oklahoma State University.
- Braembussche, R. V. D., Ayder, D. and T. Elholm. 1992. Experimental study of the swirling flow in the volute of a centrifugal pump, ASME J. of Turbomachinery, 114:366-372.
- 최미영, 고명진, 김용식, 박진철, 이연구. 2009. 지열히트펌프 시스템의 국내 적용 현황 조사 및 분석. 설비공학논문집 21(5):267-272.
- Dultton, J. C., Piemsomboon, P. and P. E. Jenkins. 1986. Flowfield and performance measurements in a vaned radial diffuser. ASME J. of Fluids Engineering. 108:141-147.
- Eckardt, D. 1976. Detailed flow investigation within a high speed centrifugal compressor impeller. ASME J. Fluid Engineering. 98:390-402.
- 에너지경제연구원. 2008. 화력발전소 열효율. 에너지통계연보 pp.196.
- 에너지경제연구원. 2010. 한국의 지구온실가스 배출과 저감정책 도입방안연구.
- 한국농촌경제연구원. 2011. 농업부문 신재생에너지 이용실태와 보급확대 방안 세미나 자료. pp.3-25.
- 한국은행 부산지점. 2010. 탄소배출권 시장의 현황 및 시사점. pp.1-36.

IEA. 2009. CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion Highilght edition. IEA Statistics. pp.10-82.

장기창. 2008. 해수이용 냉·난방 시스템 개발 최종보고서. 한국에너지기술연구원 (지식경제부).

제주도농업기술원. 2004. 망고 품질향상 및 안정생산 재배기술 확립. 시험연구보고서. pp.181-182.

제주특별자치도. 2008. 지하수열을 이용한 난방에너지 등 미활용에너지 자원조사. pp.19-195.

제주특별자치도농업기술원. 2006. 열대과수 품질 및 생산성 향상에 관한 연구. 시험연구보고서 pp.182-187.

제주특별자치도농업기술원·농촌진흥청 국립농업과학원. 2011. 화력발전 폐열이용 시스템개발 전국 평가회 자료. pp.1-5.

강연구, 이용범, 이재한, 유영선. 2005. 지열 히트펌프를 이용한 온실냉·난방 효과. *Journal of Bio-Environment Control*, 14(II):211-216.

강용혁, 이상남, 윤환기, 조덕기, 유창균, 김진수, 강명철, 허태현. 2004. 태양열 온수시스템이 시설원에 난방적용 실증연구. 산업자원부

강한기. 2005. 지열히트펌프 시스템 설치사례. 지열에너지저널. 1(2):66-74.

Kavanaugh. S. P. 1998. "Development of design tolls for ground-source heat pump piping", ASHRAE Trans. Vol. 104, Pt. 1, pp.932-937.

Kavanaugh. S. P. and K. Rafferty. 1997. "Ground-source heat pumps: design of geothermal systems for commercial and insitutional buildings, ASHRAE. pp.129-185.

김종만, 박철원. 2009. 발전소 온배수를 이용한 농업과 수산업 활용. 농어업·농어촌특별대책위원회



- 김성수. 2010. 지열에너지를 이용한 히트펌프 시스템에 관한 연구, 경상대학교대 학원 박사학위논문.
- 김옥중. 2005. 지열이용 열펌프 시스템이 열성능 해석. 재한설비공학회 동계학술 발표대회 논문집 pp.167-172.
- 김영일. 2005. 지열 열펌프 시스템의 경제성 분석. 지열에너지저널. 1(1):26-32.
- 김영환. 2000. 발전소 온배수와 해양생태계. 전파과학사. pp.5-201.
- Langford, T. E. 1990. *Ecological Effects of Thermal Discharges*. Elsevier Applied Science. London and New York. pp.59-142.
- 이창식. 1979. 地熱에너지資源의 이용과 展望. 공기조화·냉동공학. 8(2):89-94.
- 임효재, 송윤석, 공형진, 박성구. 2004. 지열 냉·난방시스템의 성능 및 경제성 평가. 한국에너지공학회지. 13(4):296-300.
- 이장길. 2011. 기후변화와 녹색성장 사회. 한국신재생에너지학회 2011 춘계학술대 회. pp.41-45
- 이재한, 이용범, 권준국, 강남준, 김학주, 최영하, 박진면, 이한철. 2006. 지열-열펌 프 시스템의 온실냉방 및 육묘효과. *Journal of Bio-Environment Control* 15(3):211-216.
- 이건우. 2009. 지열히트펌프 활용을 통한 전력계통 부하율 향상 및 CO<sub>2</sub> 감축. 서 울산업대학교대학원 석사학위 논문.
- 이순길. 2008. 해양생태계 보전을 위한 온배수 관리방안 연구 최종보고서. 해양수 산부.
- 농촌진흥청 농업공학연구소. 2005. 대체에너지 농업적 이용현황 및 기술개발 전략 심포지움. pp.169-199.
- 박종일. 2009. 시설원예 지열설비 설계 및 시공방법. 지열에너지저널. 5(2):46-49.

- 박준택, 이영수, 윤형기, 박성룡, 장기창, 백영진, 나호상. 2007. 미활용에너지 자원조사 최종보고서. 산업자원부.
- 박용정. 2007. 온실용 수평형 지열 히트펌프 시스템의 성능분석. 지열에너지저널. 3(2):19-28.
- 박용정, 강신형. 2007. 시설원예용 수평형 지열히트펌프 시스템 실증연구. 한국신·재생에너지학회 추계학술논문집. pp.505-510.
- 박용정, 유영선. 2009. 수평식 지열시스템 온실 적용사례. 설비저널. 38(1):61-66.
- Rodger, C. 1982. The performance of centrifugal compressor channel diffusers. ASME Papers 82-GT-10.
- Shin, H. J., Ahn, C. H. and C. S. Cho. 1995. "Overview for the effective use of geothermal energy", Air-Conditioning and Refrigeration Engineering. 24(4):409-419.
- 송현갑, 금동혁, 유관희, 이기명, 이종호, 정구호. 1996. 시설원예 자동화. 문운당. pp.128-143.
- 송영길. 2001. 신편 전력공학. 동아출판사. pp.151-194.
- Wu, C. H. 1952. A general theory of three-dimensional flow in subsonic or supersonic turbomachines of axial-, radial-, and mixed-flow type. NACA TN 2604. pp.37-91.
- 유영선, 강연구, 김태원. 2008. 지열을 이용한 농업시설 냉난방 시스템 개발. 농촌진흥청.
- 유영선, 강연구, 감금춘, 김영중, 백이. 2008. 시설원예를 위한 수평형 지열히트펌프의 냉방성능 해석. *Journal of Bio-Environment Control*, 17(2):90-95.

### 참고자료

Appendix 1. Blueprint for a system using hot waste water from a power plant.

기호	명칭	비고	기호	명칭	기호	명칭	
	급수관			감압밸브		45. 핸드	
	급환관			2방전동밸브		Y 가지관	
H.W.S	난방수 공급관	물리대칭면 압력 2중 배관		차압밸브		YT 가지관	
H.W.R	난방수 환수관	물리대칭면 압력 2중 배관		전차압밸브		동경률보우	
H.H.S	히트펌프 난수 공급관	물리대칭면 압력 2중 배관		경수위 조절밸브		급수가항	
H.H.R	히트펌프 난수 환수관	물리대칭면 압력 2중 배관		자동감기 용기 밸브			
H.C.S	히트펌프 냉각수 공급관	물리대칭면 압력 2중 배관		용기 흐름 장치			
H.C.R	히트펌프 냉각수 환수관	물리대칭면 압력 2중 배관		스트로커 이너			
				온전밸브			
	물보우			온도계			
	타이			압력계			
	타이 및 물보우			계량기(용량량기)			
	축소, 확대관			방열기			
	물밸브			신속이동(발포우조절복식)			
	자동경유량밸브			신속이동(루프형)			
	체크밸브			유니온			
	THREE-ONE 체크밸브			반약위소재구			
	그로브밸브			반약밀소재구			
	게이트밸브			육상용기구			
	버티컬라이밸브			벽용기구			
	프크밸브			반약배수구			
	온도조절밸브			90. 핸드			

Fig. 26. Legend.

폐열 회수 히트 펌프

기호	수량	명칭	형식	용량 (HP)	열량 (Kcal/hr)	압축기				증발기			응축기			사용냉매	외형치수			비고	
						종류 (MM)	전원 (# / V / Hz)	형식 (TYPE)	용량 (HP)	종류 (MM)	형식 (TYPE)	소용량	배관(IN-OUT)	형식 (TYPE)	소용량		배관(IN-OUT)	높이 (MM)	폭 (MM)		길이 (MM)
☉	1	폐열 회수 히트 펌프	HHW - AQ40SH1	40	174,000	30	3 / 380 / 50	ZK250HC	55	10	shell&tube	22#/H	K310K-65A	PLATE TYPE	17#/H	K310K-40A	R-22	1,250	1,000	2,480	
☉	1	폐열 회수 히트 펌프	HHW - AD50SH1	50	220,000	60	3 / 380 / 50	ZK310HC	55	10	shell&tube	34#/H	K310K-80A	PLATE TYPE	22#/H	K310K-65A	R-22	1,250	1,000	2,480	

탱크류

기호	수량	명칭	형식	용량 (표)	규격 (Dmm x Hmm)	재질	비고
☉	1	온수 저장 탱크	보온	80,000	5,800x3,000	FRP	고관용 50T 무결함 보온
☉	2	냉수 저장 탱크	보온	40,000	4,110x3,000	FRP	고관용 50T 무결함 보온
☉	1	유류 저장 탱크	비보온	2,000	900-600-580	철재	

열교환기류

기호	수량	명칭	형식	용량 (kcal/hr)	규격 (Wmm x Lmm x Hmm)	재질	비고
☉	1	온회수 열교환기	개방 플러시	300,000	570*1480*2212	STS-316L	냉각수용액 살균용량 유지
☉	34	병정기	온프릴 유니트	400W(모터)	548*800*558	대연도	

펌프류

기호	수량	명칭	형식	유량 (l/hr)	양정 (m)	동력 (HP)	전원 (# / V / Hz)	구경 (mm)	비고
☉	3	냉수 순환 펌프	라인형	30	29	7.5	3 / 380 / 50	85	120 배비 (냉각수 순환용)
☉	4	온수 순환 펌프	라인형	15	18	3	3 / 380 / 50	50	200 배비 (온수 순환용)
☉	3	냉각수 순환 펌프	라인형	30	18	5	3 / 380 / 50	85	120 배비 (AGU용 냉각수 순환용)
☉	2	냉각수 순환 펌프	라인형	80	18	7.5	3 / 380 / 50	80	120 배비 (AGU용 냉각수 순환용)
☉	1	보일러 온수 순환 펌프	라인형	30	18	5	3 / 380 / 50	85	비상용

Fig. 27. List of equipment.

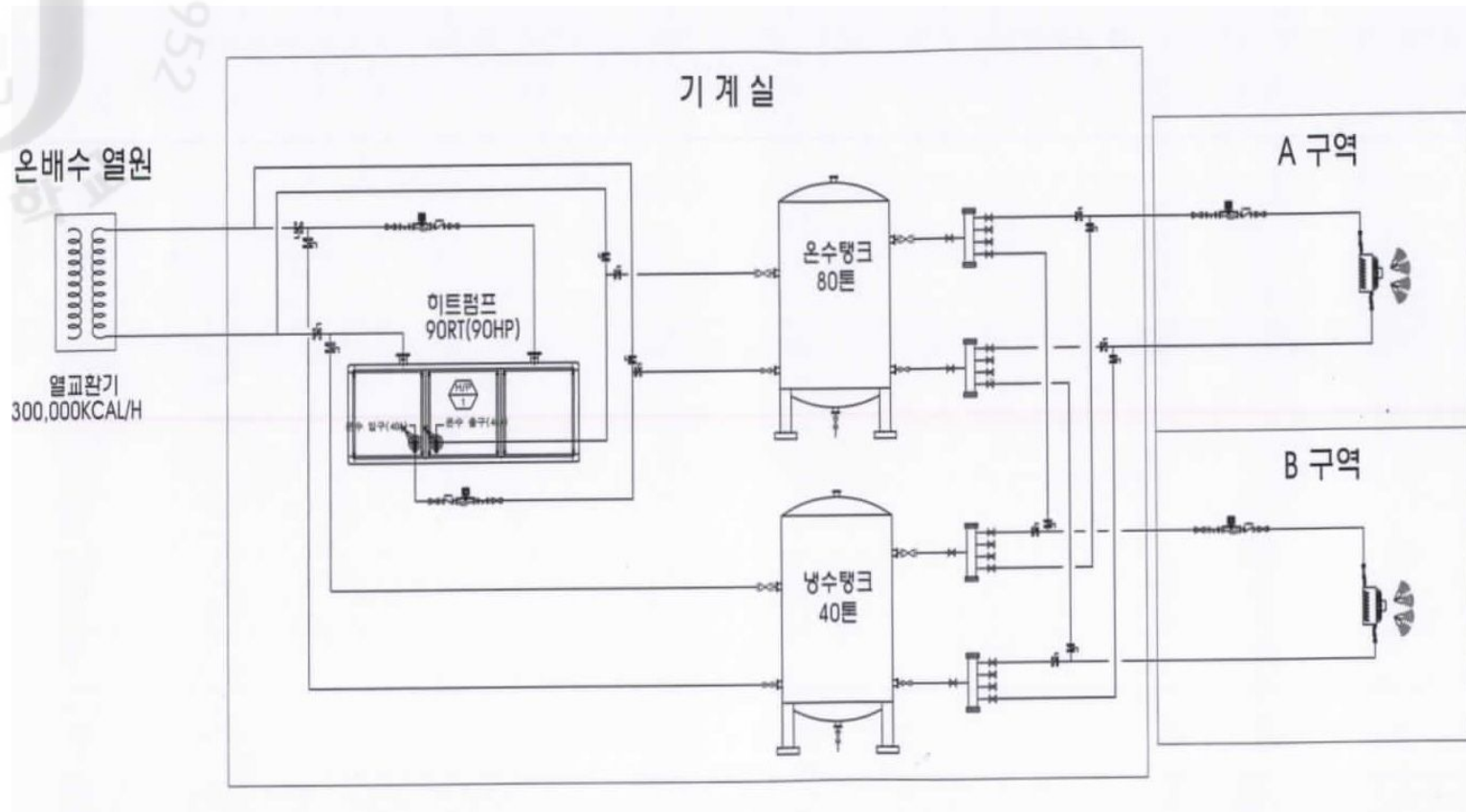


Fig. 28. Concept modules of the system.



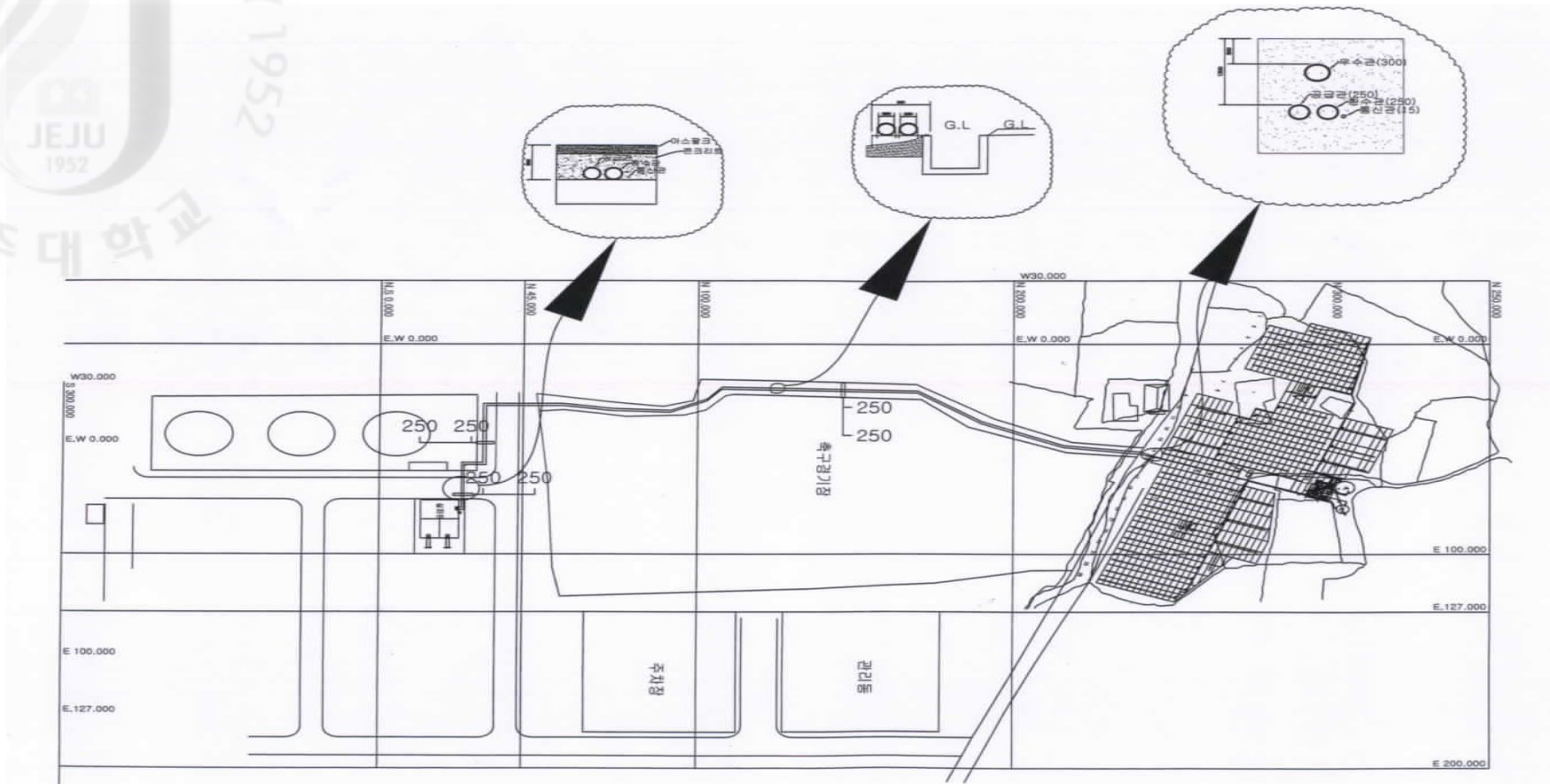


Fig. 29. Layout of the facilities.

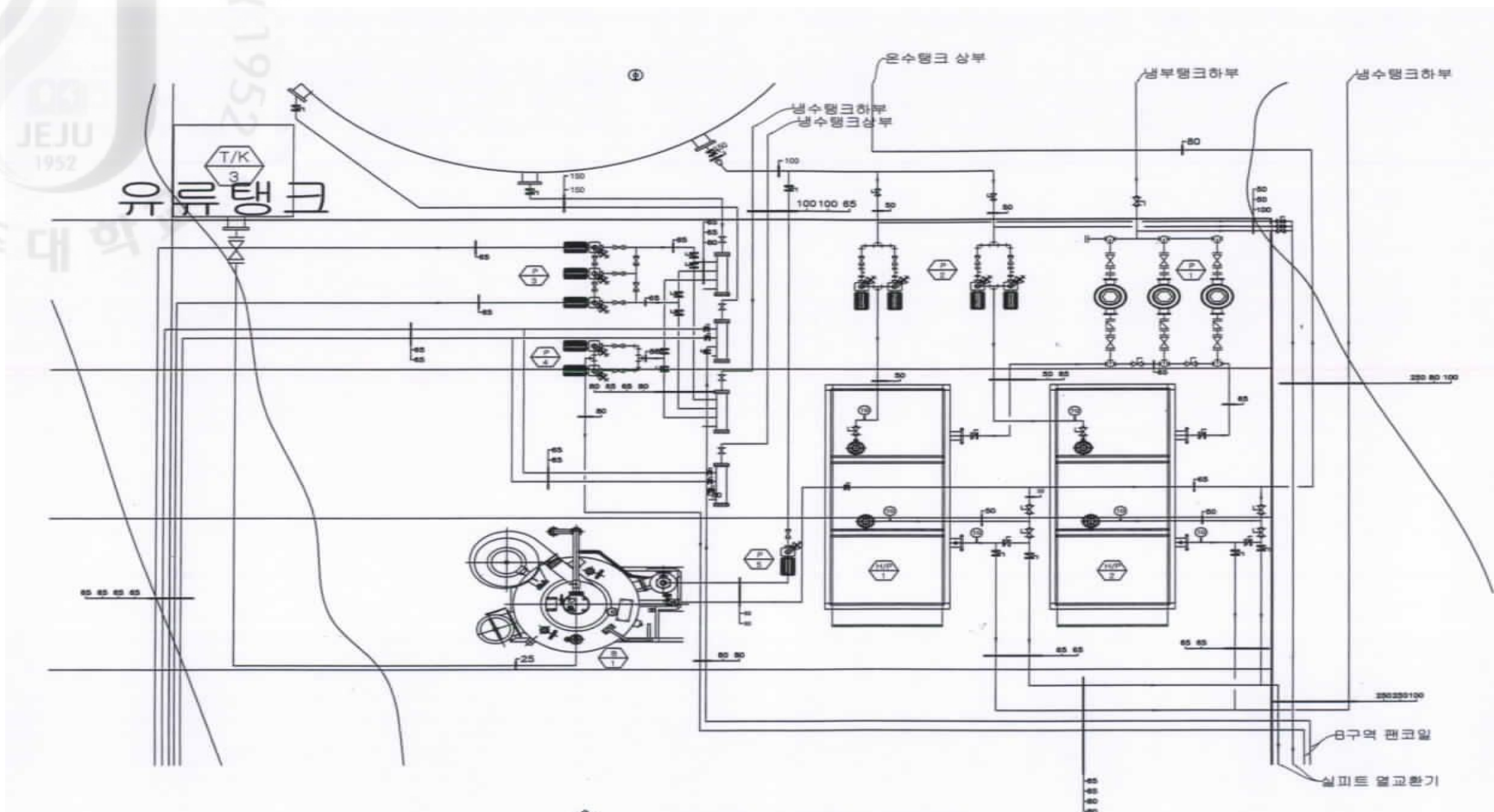


Fig. 30. Floor plan of the machine room for the heat pump.



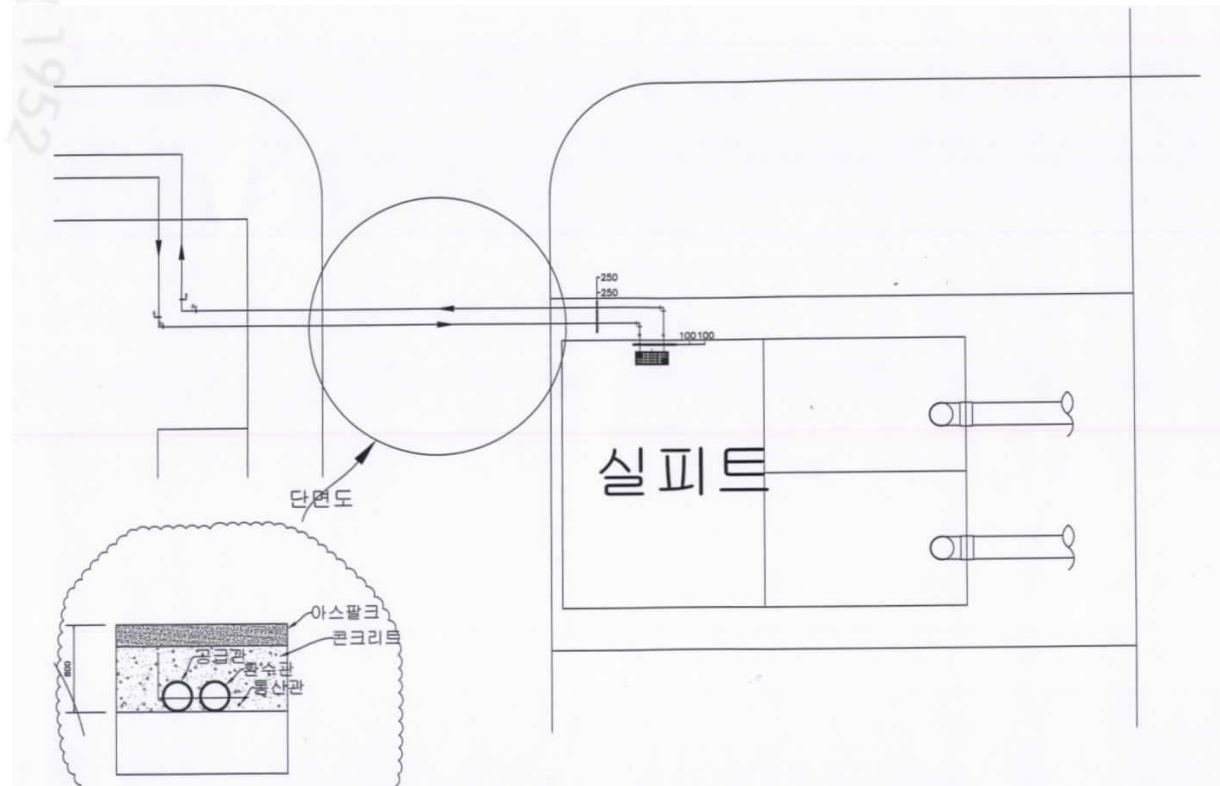


Fig. 31. Detail plan around of hot waste water tank.

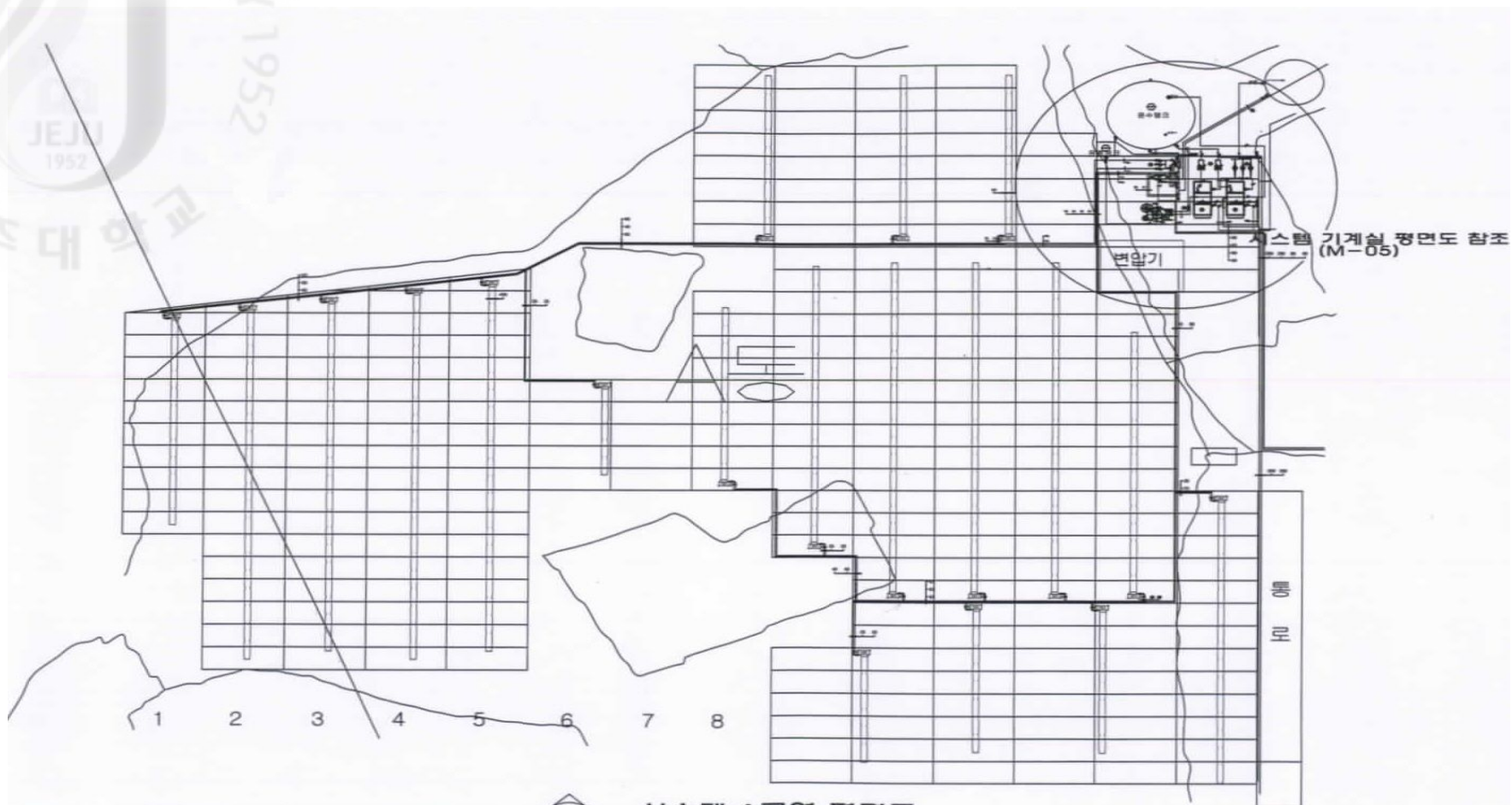


Fig. 32. Floor plan of the area A in the greenhouse.

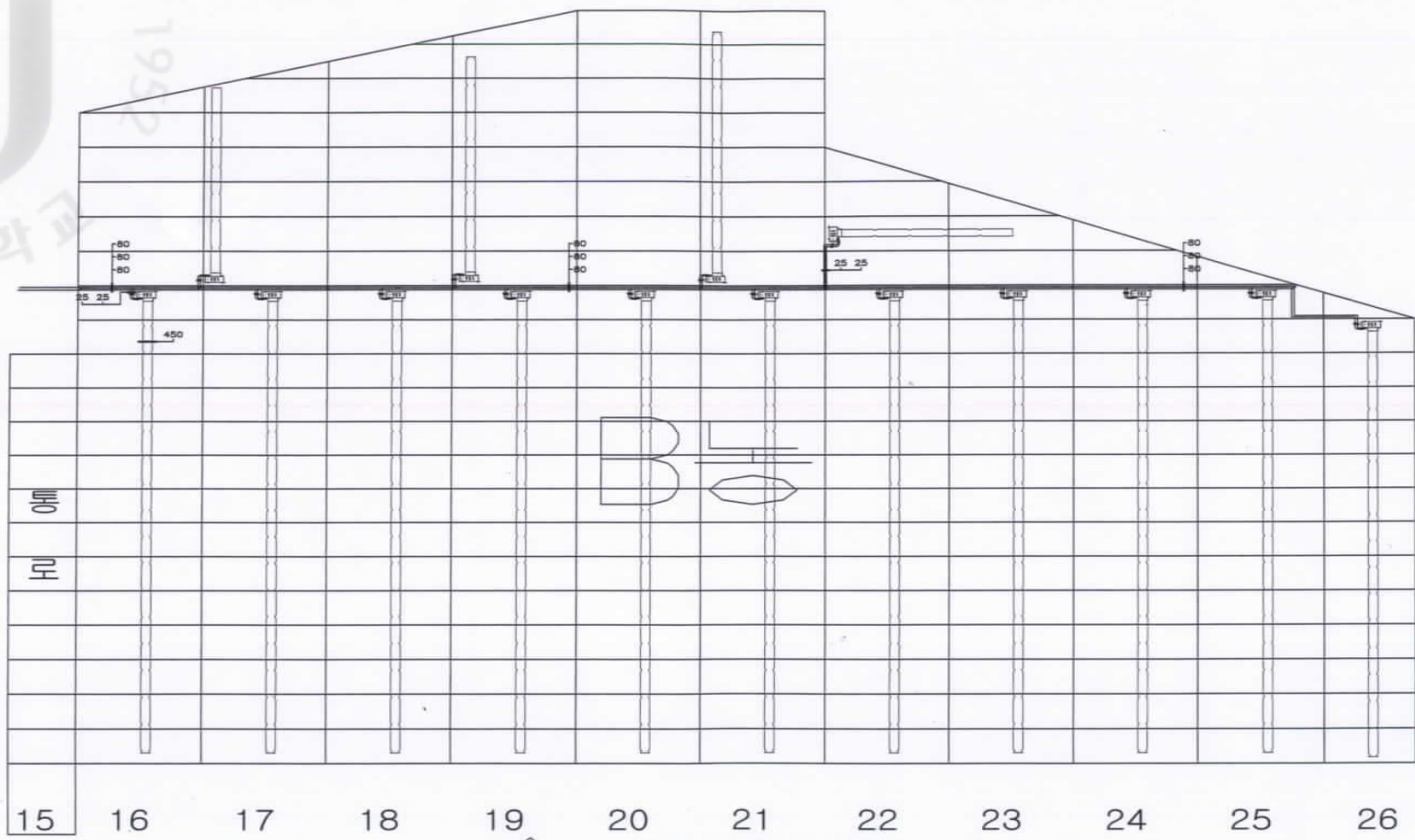


Fig. 33. Floor plan of the area B in the greenhouse.

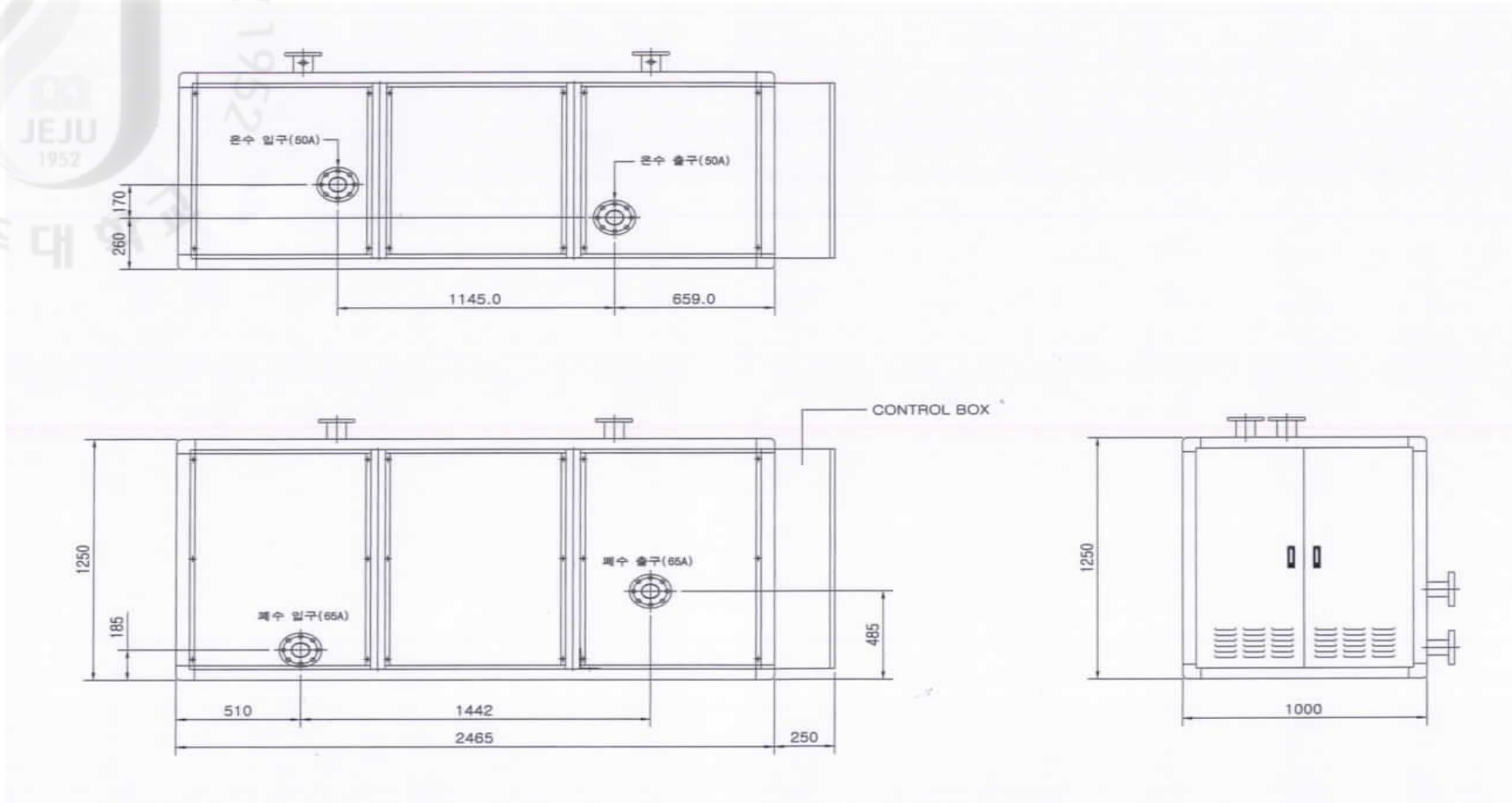
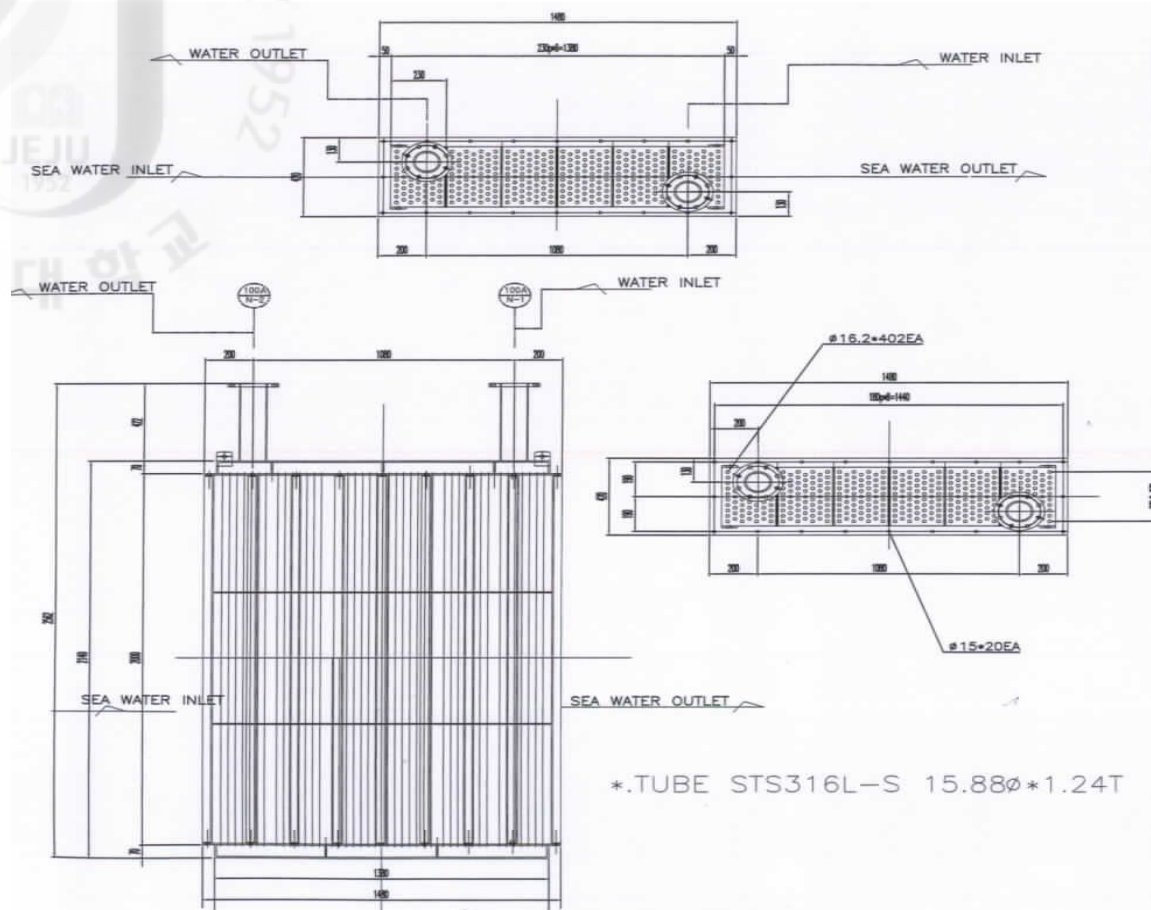


Fig. 34. Exterior plan of the heap pump.



NO.	DESCRIPTION	SIZE	MAT'L	Q'TY	REMARKS
N1	WATER INLET	100A	STS316L	1	JIS10K FF
N2	WATER OUTLET	100A	STS316L	1	JIS10K FF
N3					
N4					
N5					
N6					
N7					

SPECIFICATION		
	SHELL SIDE	TUBE SIDE
FLUID	SEA WATER	WATER
FLUID ENTERING	199,390 kg/hr	59,780 kg/h
TEMP.	INLET	21 °C
	OUTLET	19.5 °C
	DESIGN	30 °C
PRESS.	INLET	0.01 kPa
	DESIGN	0.02 kPa
	TEST(HYD.)	0.9 MPa
	TEST(PNEU.)	0.9 MPa
TRANSFER SURFACE		40 m <sup>2</sup>
WEIGHT		1950 kg
HEAT DUTY	300,000 Kcal/hr	

17				
16				
15				
14				
13				
12				
11	-	-	-	-
10	-	-	-	-
9	-	-	-	-
8	BOLT/NUT/W	M12	STS316L	40
7	BAFFLE	4t	STS316L	2
6	BAFFLE	4T	STS316L	5
5	LIFTING LUG	8T*65*100	STS316L	4
4	NOZZLE NECK	100A	STS316L	2
3	HEADER	8T	STS316L	2

Fig. 35. Detail plan of the heat exchange system (using metal pipe).

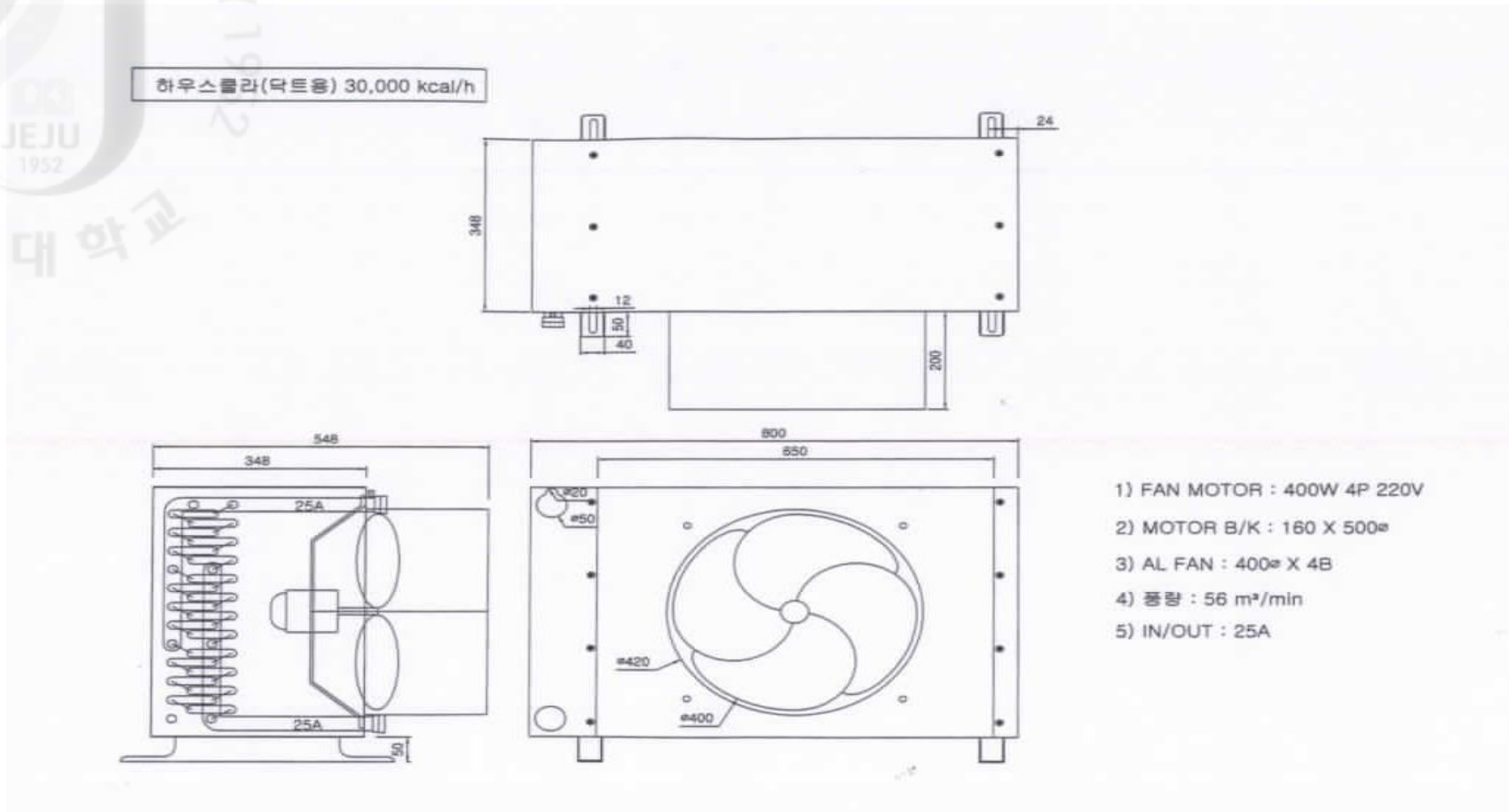


Fig. 36. Detail plan of the radiator.



## 감사의 글

오래전에 박사과정을 수료하고 학위논문을 쓰지 못하였던 이유는 박사학위에 걸맞는 소양이 부족하였기 때문이었습니다. 소인섭 교수님께서는 그러한 저에게 종종 강의 기회를 주시며 능력을 키워주셨고, 교수님을 뵈 때마다 논문작성을 독려하여 주신 덕택에 용기를 내어 부족한 학위논문을 마무리하게 되었습니다.

소인섭 교수님께 머리숙여 감사를 올립니다.

바쁘신 중에도 부족한 논문의 틀을 바로잡아 주시고 수차례 내용을 점검하여 보완하여 주신 원예학과 송관정 교수님과 조영열 교수님, 공과대학 박윤철 교수님, 국립농업과학원 농업공학부 유영선 박사님께 감사드립니다. 특히, 많은 조언을 주셨지만 부족한 채로 논문을 마무리하게 되어 박윤철 교수님과 송관정 교수님께 송구스러운 마음 가득합니다.

석사과정을 지도하여 주시면서 늘 원칙과 성실을 가르쳐주신 박용봉 명예교수님, 대학원 진학을 권장하여 주시고 삶의 멘토를 하여주신 문정수 박사님, 최종 논문을 교정하여 주신 김용덕 박사님께 지면을 빌어 감사의 말씀을 올립니다.

전국최초로 추진한 발전소 온배수 활용 시설원에 실증은 많은 예산이 수반되는 일이지만 사업에 반영하여 주시고 격려하여 주신 제주특별자치도농업기술원 강용철 원장님, 고성준 원장님, 이상순 국장님, 강성근 국장님, 이수일 소장님, 양태준 과장님께 감사의 인사를 올립니다. 또한 직접 사업을 수행하면서 논문작성에 도움을 주신 서부농업기술센터 동료, 행복나눔영농조합법인 양신석 대표님, 강태욱 총무님, 그린이엔티 김재휘 대표님께도 이 자리를 빌어 감사의 인사를 드립니다.

그동안 가르쳐 주시고 이끌어 주신 크신 은혜를 평생 잊지 않고 국가와 사회에 보답하며 살아가겠습니다.

늘 밝은 모습으로 부족한 남편을 칭찬하여 주는 아내 고영미님, 맑고 예쁘게 성장한 자랑스러운 딸 성인, 우리 집안에 훈훈한 활력을 주는 귀염둥이 레아와 함께 작은 영광을 나누면서, 허수준 동생의 국문학 박사학위 논문이 하루빨리 완성되어 부모님 영전에 나란히 바칠 수 있기를 기대해봅니다. 모두 사랑합니다.

2011 신묘년 끝자락에서.. 허태현 올림