



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](#)

석사학위논문

발전소 온배수를 이용한 시설온실의
에너지 및 블러드 오렌지
생육환경에 관한 연구

제주대학교대학원

에너지응용시스템학부 기계공학전공

김민지

2021년 2월

발전소 온배수를 이용한 시설온실의 에너지 및 블러드 오렌지 생육환경에 관한 연구

지도교수 현 명 태

김 민 지

이 논문을 기계공학 석사학위 논문으로 제출함

2021년 1월

김민지의 기계공학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 김남진
위 원 현명태
위 원 조영열

제주대학교 대학원

2021년 1월

A Study on Energy and Blood Orange Growth
Environment in Facility Greenhouse
Using Power Plant Thermal Effluent

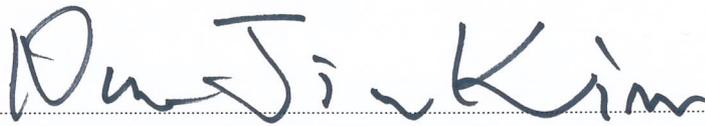
Min-Jee Kim

(Supervised by professor Myeng-Taek Hyun)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for the degree of Master of Science

2021. 01.

This thesis has been examined and approved.



.....
Thesis director, Nam-Jin Kim, Prof. of Mechanical Engineering



.....
Thesis director, Myeng-Taek Hyun, Prof. of Mechanical Engineering



.....
Thesis director, Young-Yeol Cho, Prof. of Major of Horticultural Science

.....
2021. 01.

Date

Department of Mechanical Engineering
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

Contents

List of Figures	ii
List of Tables	iii
Abstract	iv
I. 서론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	3
II. 실험 시스템 구축 및 방법	5
2.1 실증사이트 선정	5
2.2 온배수 시스템	7
2.3 IoT 기반 모니터링 시스템	12
III. 실험 결과 및 고찰	14
3.1 에너지 분석	14
3.2 환경적 측면에서의 경제성 평가	19
3.3 시설온실 대상작물 및 생육환경 분석	31
IV. 결론	40
References	42

List of Figures

Fig. 1 Thermal effluent energy reserve amount	4
Fig. 2 Subtropical fruit facility greenhouse using thermal effluent	6
Fig. 3 Conceptual diagram of thermal effluent system	6
Fig. 4 Heat plate pattern	8
Fig. 5 Heat exchanger drawing	9
Fig. 6 Pressure loss in water piping (Hazen-Williams)	10
Fig. 7 Measurement sensor plot plan	13
Fig. 8 Main energy flow chart for performance evaluation	19
Fig. 9 AWS temperature data and facility temperature data	32
Fig. 10 AWS humidity data and facility humidity data	32
Fig. 11 Operating state of the heat pump according to the set temperature	33
Fig. 12 Demonstration site A tree fruit size - 2019	34
Fig. 13 Demonstration site A tree fruit size - 2020	34
Fig. 14 Demonstration site B tree fruit size - 2019	34
Fig. 15 Demonstration site B tree fruit size	34
Fig. 16 Demonstration site C tree fruit size - 2019	35
Fig. 17 Demonstration site C tree fruit size - 2020	35
Fig. 18 Residual Plots - A Tree	35
Fig. 19 Residual Plots - B Tree	36
Fig. 20 Residual Plots - C Tree	37
Fig. 21 Average fruit size of each tree in the demonstration site - 2019 ..	38
Fig. 22 Average fruit size of each tree in the demonstration site - 2020 ..	38

List of Tables

Table 1 Basis for calculating storage tank capacity	7
Table 2 Design data	8
Table 3 Calculation of pipe diameter of thermal effluent pipe considering pressure loss	10
Table 4 Annual renewable energy production, energy savings, greenhouse gas reduction	21
Table 5 Daily production of cooling energy - Measurement period 2018.07.21.- 2018.08.31.	21
Table 6 Daily production of cooling energy - Measurement period 2019.08.01.- 2019.08.31.	22
Table 7 Daily production of cooling energy - Measurement period 2020.08.11.- 2020.08.31.	22
Table 8 Daily production of heating energy - Measurement period 2018.12.06.- 2018.12.31.	23
Table 9 Daily production of heating energy - Measurement period 2019.01.01.- 2019.02.16., 2019.11.01.~2019.12.31.	24
Table 10 Daily production of heating energy - Measurement period 2020.01.01.- 2020.06.09.	26
Table 11 Annual renewable energy production, energy savings, greenhouse gas reduction	30
Table 12 Average leaf size for A, B and C trees	39

Abstract

We used the thermal effluent discharged from the Jeju Power Headquarters of KOMIPO as a cooling and heating system to analyze the energy savings of the greenhouse facilities and conduct a study on the growth environment of blood orange using the power plant thermal effluent cooling and heating system.

Through the demonstration operation from 2018 to 2020, the cumulative renewable energy production of the power plant's thermal effluent system was 75.7TOE, and the energy savings were calculated as 22.89TOE, assuming only heating and 85% of the boiler efficiency. In addition, the amount of greenhouse gas reduction is calculated as 114.24tCO₂. When this system is operated for 8 hours for 100 days for heating and 11 hours for 150 days for cooling, the expected new and renewable energy production, energy savings and greenhouse gas reduction are calculated as 203.1TOE, 53.3TOE, and 265.8tCO₂ respectively. Therefore, it was confirmed that this system can reduce energy by 30% and greenhouse gas by 50% or more compared to conventional kerosene boilers.

In addition, the number of fruits in 2020 was 4.75 times more than in 2019, and the fruit diameter were 10.6% smaller and the fruit length was 5.1% smaller. The average leaf area in 2020 is 11.7% larger than in 2019, and the average fresh weight is 3.5% smaller, but the average dry weight is 26.6% larger, which is judged to contain a large amount of nutrients.

Through this study, when applied to the cooling and heating system of a greenhouse facilities using the power plant's thermal effluent, it can contribute to the competitiveness and income of farmers by reducing operating costs and increasing productivity by reducing heating costs. Also

reduction of carbon dioxide emissions is expected to contribute to national greenhouse gas reduction targets.

I. 서론

1.1 연구 배경

최근 시설온실 면적 증가 추세로 인한 농가에서의 에너지 사용이 급증하고 있으며, 고품질 작물의 생산 및 품질 향상을 위해서 난방비의 부담은 더욱 가중되고 있는 실정이다. 우리나라의 시설온실 농가 경영비 중 유류비가 차지하는 비중은 약 35~58%에 달한다.[1] 난방비 절감이야말로 시설재배 농가의 수익에 직결하는 상황으로 시설온실의 연간 겨울철 고액의 난방비를 절감할 수 있는 시스템 구축이 시급하다.

이를 위해 시설원에 농가가 이용하고 있는 에너지의 대체(신재생에너지) 및 보온시설, 화석연료 이용 등 농가의 에너지 절감방안 및 보온시설 이용에 대한 활용방안이 활발히 논의되고 있다. 특히 지구온난화에 대비한 세계기후협약에 대처하기 위하여 국가적 차원의 신재생에너지 보급정책이 이루어지고 있는 상황에서 시설재배 농가에 신재생에너지 확산은 중요한 요소이다.

발전소 온배수(Thermal effluent)는 화력발전소에서 냉각용으로 유입된 바닷물의 데워져 나오는 온수를 말한다.[2] 화력발전 과정은 랭킨사이클로 운용되며, 이 사이클을 유지하기 위해서는 터빈에서 나오는 작동유체를 냉각시켜야 하는데 주로 해수를 이용한다. 취수된 해수는 응축기를 거치는 동안 터빈에서 나오는 물과 수증기 혼합물을 응축하는 과정에서 열을 흡수하기 때문에 해수보다 수온이 상승된 채 방출하게 된다.

UN 해양법 협약상 온배수는 ‘직·간접적으로 인위적으로 해양환경에 유입되는 물질 또는 에너지로서 해양생물에 해롭거나, 해양의 쾌적한 이용을 저해시키는 오염물질’로 정의하고 있다.[3]

그러나 발전소 온배수는 바닷물보다 온도가 높아 난방용 에너지원으로 활용하기에는 적합하기 때문에 많은 선진국에서 에너지원으로 활용하고 있다. 우리나라

에서도 발전소 온배수열 활용사업이 2014년 3월에 ‘8대 에너지 신사업’으로 선정된 데 이어, 2014년 3월 온배수를 활용한 에너지 신산업 육성 방침에 따라 수열에너지(발전소 온배수)를 신재생에너지에 포함하도록 법령이 개정되어 제도화됨에 따라 이의 활용방안이 적극적으로 논의되고 있다.[4]

국내의 대표적인 발전소 온배수의 농업 이용 사례는 제주특별자치도 서귀포시 화순리의 시설원예 난방 시스템이다. ‘행복나눔영농조합법인’은 한국남부발전 남제주화력발전소 인근의 아열대작물 재배온실 난방을 위하여 폐열회수 히트펌프 시스템을 구축하였다.[5] 남제주 화력발전소의 온배수를 이송관로를 통해 온실까지 이송한 후 열펌프를 통해 55~60℃로 승온하여 축열조에 저장하며, FCU를 통해 난방에너지를 인근에 조성한 시설감귤 및 망고 등 아열대작물 재배온실에 활용하고 있다. 온실면적은 5,280㎡이며 발전소와 매우 근접한 위치에 조성되어 있어, 온배수를 150m 길이(왕복 총 길이 300m)의 노출 PE 파이프를 수송하여 저수조에서 열교환을 한다. 설계상 최대난방부하는 417kW이며, 이에 따른 히트펌프의 용량은 약 120RT이다. 행복나눔영농조합법인에서는 경우 대비 난방 에너지 비용을 87% 절감한 것으로 보고되고 있다. 이외에도 하동 화력발전소, 영동 화력발전소 등에서 온배수를 이용한 양식장을 운영하고 있는 등 발전소 온배수를 활용한 히트펌프 시스템이 지역농·어가 소득 제고와 온실가스 배출 저감에 기여하고 있다.

기존의 여러 실증을 통해 발전소 온배수를 이용하여 시설온실의 냉난방 시스템에 적용할 경우 난방비 절감으로 인한 경영비의 절감과 생산품의 품질 향상 및 재배시설 단위면적당 생산성 증대를 통해 농가의 경쟁력 및 소득을 제고할 수 있다. 또한, 이산화탄소 배출량 감축으로 2030 국가 온실가스 감축목표에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

1.2 연구 목적

기존 원예시설에서 사용되는 에너지원은 대체로 화석연료인데, 최근 국제 유가 상승 및 환경오염이라는 문제에 대처할만한 에너지원이 매우 시급한 실정이다.

발전소 온배수는 물이라는 특성으로 인한 열 회수 효율성이 높고 바다로 버려지는 에너지를 활용하여 환경보전에도 기여할 수 있다. 또한 공급 열원이 풍부하여 안정적인 난방을 할 수 있다.

농어촌 연구원의 분석에 따르면, 전국 연안 30개 발전소에서의 일일 온배수 배출 총량은 약 1억 3천만 톤에 이른다. 온배수의 온도가 평균 7℃ 상승하여 배출된다고 가정할 때, 국내 연간 총 온배수 배출량 479.95억ton/yr을 식(1)에 적용하여 계산하면 에너지원으로서의 부존량은 335,965Tcal/yr으로 추정된다.

$$E = \Delta t \times C_w \times W \quad (1)$$

여기서,

$$C_w = 1.0 \text{Mcal}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t = 7^\circ\text{C}$$

W : 연평균 온배수 배출량

이 중 농어촌지역의 발전소 온배수 에너지 부존량은 277,410Tcal/yr으로 전체의 83%에 이른다. 농어촌지역 에너지 부존량(E) 중 난방 이용 가능한 에너지량(E_h)은 온배수 에너지 부존량 118,370Tcal/yr에 COP를 고려하여 식(2)에 적용하여 계산하면 163,896Tcal/yr으로 시설하우스 18,709ha를 가온할 수 있는 규모이다. 여기서 COP는 신재생에너지 설비심사(GT101)의 물-물 열펌프유닛 최소 성능 기준인 3.6을 적용하였다.[6]

$$E_h = E \times \left[\frac{COP_h}{(COP_h - 1)} \right] \quad (2)$$

본 연구에서는 발전소 온배수 시스템을 원거리에 떨어진 시설온실의 냉난방 에너지원으로 활용하고, 이를 적용한 아열대과수의 생육환경에 관한 연구를 수행하였다. 또한 IoT 기반의 모니터링 시스템을 적용하여 화석연료 온실난방 대비 발전소 온배수열의 경제성 분석을 수행하였다.



Fig. 1 Thermal effluent energy reserve amount

II. 실험 시스템 구축 및 방법

2.1 실증사이트 선정

본 연구를 진행하기 위한 실증사이트 시설온실은 제주특별자치도 제주시 조천읍 신촌리 3224-2에 위치한다. Fig. 2에 제시한 것처럼 온배수 활용지는 한국중부발전 제주화력본부로부터 약 2km 원거리에 있다. 시설면적은 비닐하우스 약 0.5ha와 유리온실 약 0.5ha로 약 1ha의 규모의 시설온실로 백합과 만감류를 재배하고 있으며, 현재 유리온실에서 아열대작물인 블러드 오렌지를 재배하고 있다.

Fig. 3은 한국중부발전 제주화력본부 인근 시설온실에 구축된 온배수 시스템의 개념도를 보여준다. 우선 발전소 온배수를 저장하기 위한 저류조를 두었으며 여기에는 온배수와 수위차에 의해 자연스럽게 유입되도록 충분한 깊이로 저류조를 만들었다. 저류조에는 수중펌프를 설치하여 발전소 온배수가 지상으로 공급되도록 하였다. 발전소 온배수를 히트펌프와 직접 열교환하기 위해 농가까지 공급하기에는 혹시 모를 바닷물의 누수 피해도 있을 수 있기 때문에, 1차적으로 열교환기를 통해 담수에 열교환시키고, 담수가 열교환기와 히트펌프 사이를 관로를 통해 순환 공급되도록 하였다. 이를 위해 발전소 부지에 열교환기와 순환펌프가 위치한 제 1 기계실을, 실증사이트에는 히트펌프와 히트펌프에서 생산된 냉·온수를 저장하는 축열조와 시설온실에 공급하는 펌프류 등을 설치하는 제 2 기계실을 두었다.



Fig. 2 Subtropical fruit facility greenhouse using thermal effluent

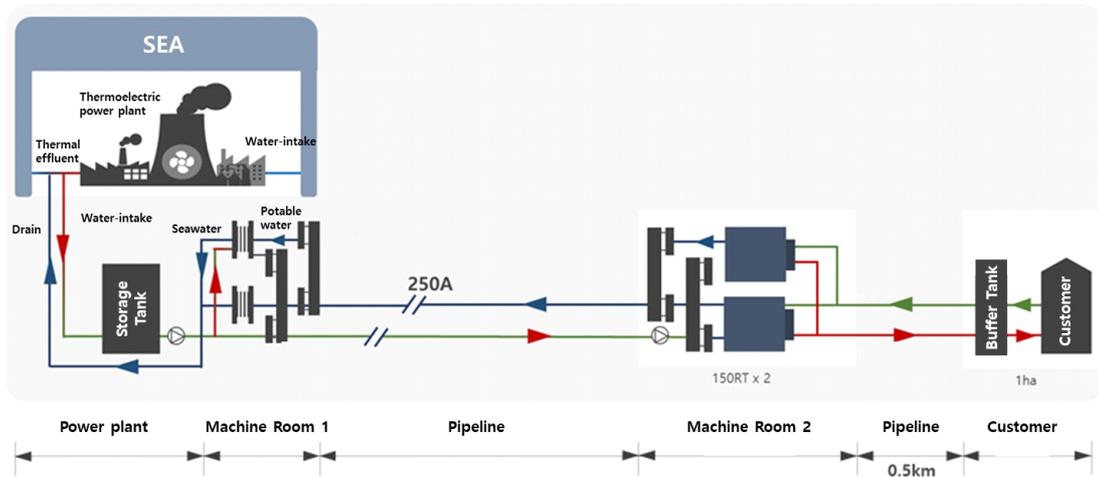


Fig. 3 Conceptual diagram of thermal effluent system

2.2 온배수 시스템

앞에서 설명한 것처럼 원거리 이송이므로 발전소 온배수 시스템은 저류조, 제 1 기계실, 관로, 제 2 기계실, 축열조로 이루어져 있다.

해수를 원거리 관로를 통해 이송하다가 누수가 발생할 경우 인근 경작지에 악영향을 미칠 가능성이 있어, 발전소 인근에 충분한 용량의 저류조를 설치하고 온배수 방류채널로부터 온배수를 공급받아 열교환 후, 담수를 원거리의 적용대상지로 수송하는 방안으로 최적화하였다.

Table 1과 같이 1ha와 10ha 부지에 대한 공급열량으로부터 분당 온배수의 순환유량을 계산함으로써 저류조의 규격을 산출하였다. 추후 적용대상지 확장을 고려하여 10ha에 대한 공급열량을 기준으로 하면, 온배수로부터의 열전달율은 3,000RT가 되어야 하며, 이는 10.5MW에 해당하는 수치이다. 온배수와 담수 간 열교환을 통해 온배수의 온도가 6°C 하강한 후 배수구로 배출될 것으로 가정할 경우 상기 열량의 공급을 위해 필요한 온배수의 분당 순환유량은 약 25ton이다.

저류조의 용량은 최소 1분간 10ha 부지에의 열량공급에 필요한 유량인 25ton 이상을 수용할 수 있는 규격으로 설계하였으며, 저류조의 폭과 너비를 2.5m로 설계했을 때, 저류조의 높이는 최소 4m 이상이 되어야 한다. 이는 저류조의 최저수위에 해당하며, 최고수위에 도달했을 때의 여유도까지 고려하여 저류조의 총 높이는 9m로 결정하였다.

Table 1 Basis for calculating storage tank capacity

Type		1 ha	10 ha
Heat transfer rate	[RT]	300	3,000
	[kW]	1,055	10,549
	[Mcal/hr]	908	9,076
Temperature difference	[°C]	6 °C	
Discharge	[m ³ /hr]	151	1,513
	[L/min]	2,521	25,212

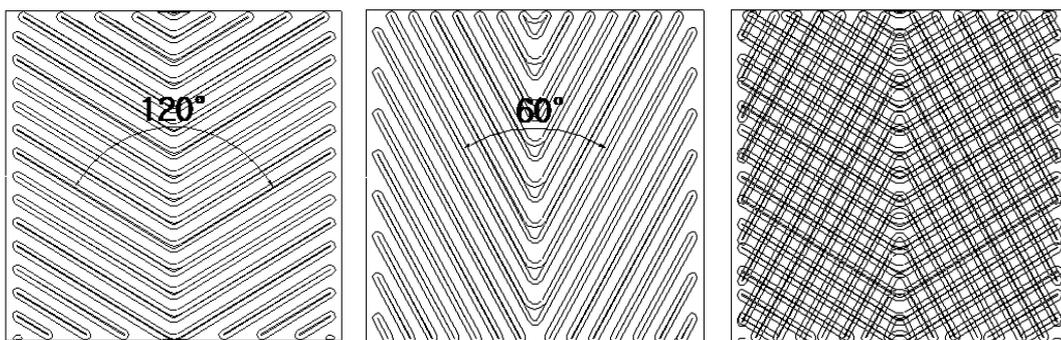
대규모 수용가에 에너지를 공급하기 위해서는 온배수 열회수 설비의 고집적화가 필요하며, 열전달계수 $5,000\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 급, 열교환 집적도 $200\text{kW}/\text{m}^2$, 최대 700kW 급을 목표로 하여 내부식성 및 저파울링 성능을 갖는 열교환기를 설계하였다.

열교환기 설계데이터는 발전소 온배수의 조건을 고려하여 Table 2와 같다. 판형 열교환기 설계코드는 ASME Section VIII Div.1을 따랐으며, 수요처의 난방을 목적으로 온배수 측(바닷물, 온수) 입구 온도를 22°C , 작동유체(담수, 냉각수)의 입구 온도를 13°C 로 설정하였다.

온배수의 최대 공급 압력이 5bar 이하로 설계 압력을 5bar로 하였으며, 1ha 온실에 필요한 난방부하를 계산하여 필요 열량을 523kW 이상으로 선정하여 설계하였다.

Table 2 Design data

Design code	ASME Section VIII Div.1	
Type	Plate heat exchanger(Plate & Frame type)	
Fluid used	Hot water side : Sea water	Cold water side : Clear water
Supply temperature	22.00°C	13.00°C
Design pressure	$5.0\text{ kgf}/\text{cm}^2\text{G}$	$5.0\text{kgf}/\text{cm}^2\text{G}$
Calorie	$450,000\text{ kcal}/\text{hr}$ (523 kW) ~ $630,000\text{ kcal}/\text{hr}$ (732 kW)	
Pipe diameter	150A-10K	
Installation area	Within 3.5m^2	



(a) H pattern

(b) V pattern

(c) H&V pattern

Fig. 4 Heat plate pattern

관형열교환기 전열관의 재질은 티타늄이며, 전열관의 형태는 Fig. 4 (a), (b)에서와 같이 전열관의 골과 골이 이루는 패턴별 각도를 달리하여 H형(세브론 각도 120°)과 V형(세브론 각도 60°) 형태로 설계하였다.

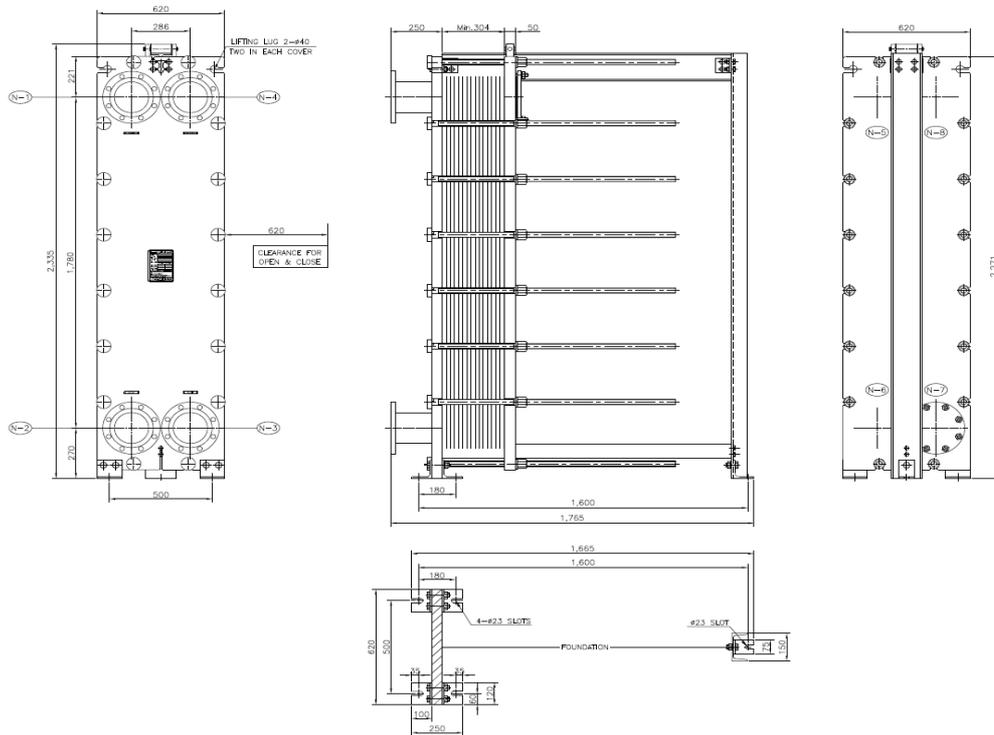


Fig. 5 Heat exchanger drawing

담수 수송관로는 발전소에서 수송가 근처까지 열원을 이송하기 위해 제 1 기계실과 제 2 기계실 사이에 구축된 관로로서, 추후 인근 농가에 확장성을 고려한 배관경을 산출하여 적용하였다. 배관의 압력손실을 고려하여 Fig. 6의 Hazen-Williams 실험식을 참조하여 Table 3과 같이 펌프 토출 측 유속을 최대 3.6m/s에서 각각의 관경에 따른 유량, 최대 사용범위를 산출하였다.

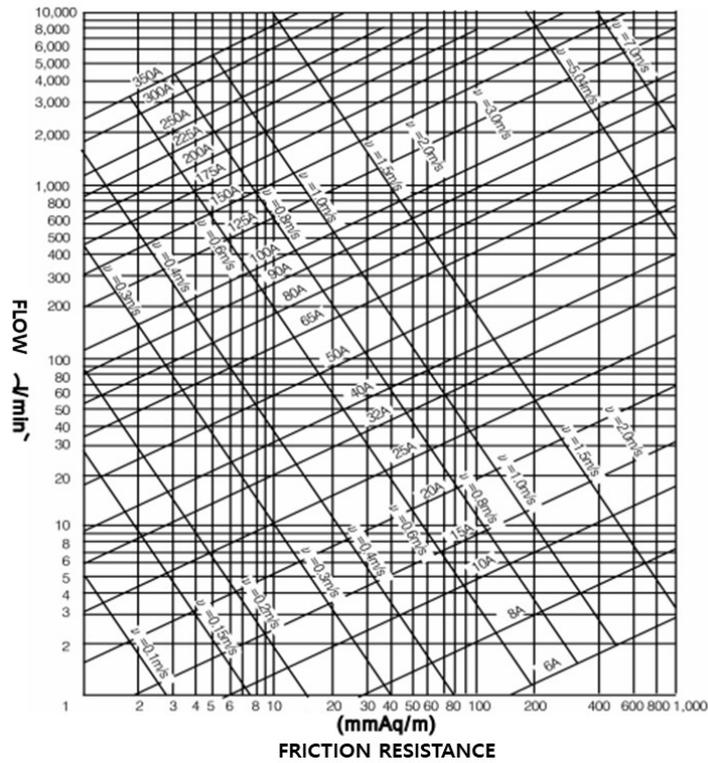


Fig. 6 Pressure loss in water piping (Hazen-Williams)

Table 3 Calculation of pipe diameter of thermal effluent pipe considering pressure loss

Diameter	Sectional area	Velocity of flow	Discharge			Allowable capacity	Allowable area
			m ³ /s	m ³ /h	ℓ /min		
A	m ²	m/s	m ³ /s	m ³ /h	ℓ /min	RT	ha
200	0.031416	3.6	0.11	407	6,786	595.25	1.97
250	0.049087		0.18	636	10,603	930.08	3.07
300	0.070686		0.25	916	15,268	1,339.31	4.43
350	0.096211		0.35	1,247	20,782	1,822.95	6.03
400	0.125664		0.45	1,629	27,143	2,381.00	7.87
450	0.159043		0.57	2,061	34,353	3,013.45	9.96
500	0.19635		0.71	2,545	42,412	3,720.31	12.30
550	0.237583		0.86	3,079	51,318	4,501.57	14.88
600	0.282743		1.02	3,664	61,073	5,357.24	17.71

온배수 수열원 활용 실증사이트 시설온실 규모는 약 1ha 가량이며, 발전소 온배수 이용 300RT 이상 규모 히트펌프의 열적 성능을 바탕으로 난방열량(응축열량)을 생산하기 위한 증발열량 840kW를 온도차(히트펌프 증발기) 5℃로 공급하였을 경우 필요 유량은 약 150m³/h이다. 300A의 수송관로를 선정할 경우 최대 유속에서 최대 4.4 ha(1,339RT)의 농가에 공급이 가능하며, 실증사이트 근처에 3~5ha 정도의 추가 공급이 가능한 농가를 고려할 시 250~300A관이 경제성과 효율성이 높아 최종 280A관을 선정하여 보온관으로 시공하였다.

제 1 기계실에서 열교환 후 수송된 담수로부터 열원을 회수하는 핵심기기인 히트펌프는 150RT 용량으로 설계되어, 두 대가 제 2 기계실에 설치되었다. 설치된 히트펌프는 스크롤형 히트펌프로써, 판형 열교환기가 적용되었다. 냉매로는 R-410A를 사용하였고, 순환수 배관경은 120A로 설계되었다.

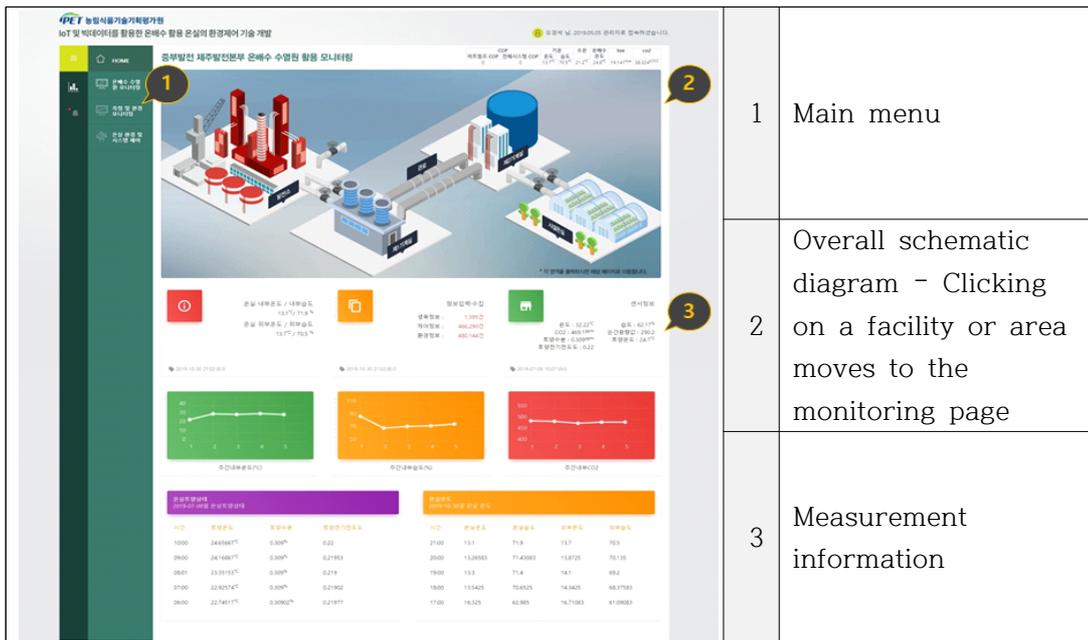
열원의 온도가 15℃, 부하의 온도가 40℃인 경우를 기준으로 난방 열량은 601kW(171RT), 난방 성능계수는 4.64를 달성하였으며, 냉방 운전 시에는 열원 측이 25℃, 부하 측이 12℃인 조건에서 성능계수가 4.58로 나타났다.

축열조는 일일 최대부하량 및 단위면적당 냉난방 열용량, 일일 최대운전시간을 고려하여 100ton으로 설계되었다.

2.3 IoT 기반 모니터링 시스템

IoT 기반 온배수 수열원 설비 및 관로, 시설온실 생육 및 환경 모니터링 시스템을 구축하여, 시설온실의 환경제어 및 통합관리가 가능하다.

해당 시스템에는 Fig. 7과 같이 온배수 온도 및 압력, 유량계 등의 온배수 수열원 모니터링을 위한 센서와 온실 내 온·습도, 토양수분함량, 광량 등 온실 환경 및 시스템 제어를 위한 센서들이 설치되어 있다. 관로 누수, 온배수 열원공급 실증운전 결과 및 전력 사용량 등 모니터링으로 실시간 데이터를 확인할 수 있으며, 시설온실의 냉난방 운전에 따른 환경 모니터링을 통해 실시간 제어가 가능하다. 또한, 시설온실 생육 모니터링을 통해 대상작물의 과실크기 및 계측 데이터를 표, 그래프 등으로 가시화가 되어 있으며, DB 및 자료처리, 통계 등을 자료화하여 서버에 저장이 가능하다.



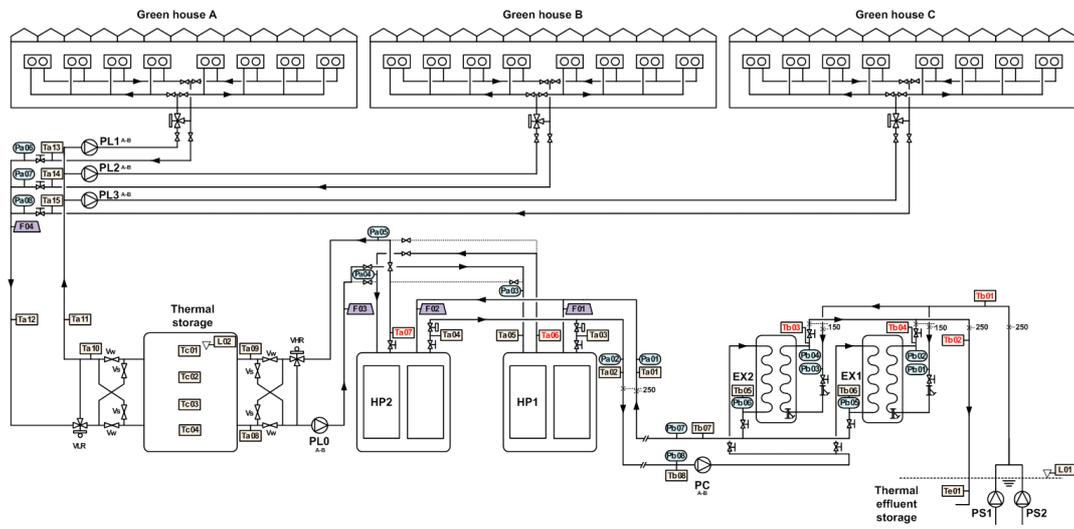


Fig. 7 Measurement sensor plot plan

Ⅲ. 실험결과 및 고찰

운영 결과분석을 통해 앞에서 설명한 실증사이트에서의 시스템 구축과 에너지 분석, 경제성 평가와 블러드 오렌지에 대한 생육분석을 진행하였다.

3.1 에너지 분석

온배수열 적용 실증사이트 시설온실은 4,587.54m²의 연동형 비닐하우스(A동, C동)와 4,843.53m²의 유리온실(B동)으로 이루어져 있으며, 각 동의 최대난방부하는 다음과 같이 계산된다.

1) A동

A동의 비닐하우스는 염화비닐필름의 피복재로 1중피복, 1층커텐으로 보온피복되어 있다. 난방부하 계산에 앞서, 외기와 접한 온실 표면적은 다음 식(3)과 같다.

$$Agh = Ar + Ag_1 + Ag_2 \quad (3)$$

여기서,

Agh : 온실표면적 [m^2]

Ar : 지붕표면적 [m^2]

Ag_1 : 전후면표면적 [m^2]

Ag_2 : 측면표면적 [m^2]

A동의 온실규모 및 규격은 용마루 높이 3.30m, 처마 높이 2.00m, 1SPAN 당 BAY 수 9개, 1동 온실 폭 51.60m, 1동 온실 길이 36.00m, 온실 동수 1동으로 이루어져 있으며, 식(3)에 대입하여 A동의 온실 표면적(2,501.97m²)을 산출하였다. 또한, A동의 온실면적은 1,857.61m²이다.

관류 열부하는 지붕을 통한 관류 열부하, 전·후면을 통한 관류 열부하, 양측면을 통한 관류 열부하가 있으며 식(4)와 같다.

$$q = h_t(T_s - T_d)(1 - fr) \quad (4)$$

여기서,

$$h_t : \text{열관류율} = 5.70 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$$

$$T_s : \text{온실 내 설정 온도} = 23.00 \text{ °C}$$

$$T_d : \text{설계 외기온도}(TAC\text{온도}) = -1.50 \text{ °C}$$

$$fr : \text{보온 피복재의 열절감율} = 0.40$$

A동의 각각의 관류 열부하는 83.79kcal/m²·h로 동일하다.

환기 전열부하는 식(5)와 같이 계산되며, 지중 전열부하는 식(6)과 같다.

$$qv = h_v(T_s - T_d) \quad (5)$$

$$qs = h_s(T_s - T_g) \quad (6)$$

여기서,

$$h_v : \text{환기 전열 계수} = 0.20 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$$

$$h_s : \text{지표면 전열 계수} = 0.244 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$$

$$T_g : \text{지중온도} = 9.05 \text{ °C}$$

식(5)와 (6)을 통해 환기 전열부하 4.90kcal/m²·h·°C, 지중 전열부하 3.41kcal/m²·h·°C를 계산하였다.

식(3)~(6)을 통해 최대난방부하는 다음 식(7)과 같이 계산된다.

$$Q_g = (A_r \cdot q_r) + (A_{g_1} \cdot q_{g_1}) + (A_{g_2} \cdot q_{g_2}) + (A_{gh} \cdot q_v) + (A_s \cdot q_s) \cdot f_w \quad (7)$$

여기서,

A_s : 온실면적 [m²]

f_w : 풍속에 따른 보정 계수 = 1.1

따라서, A동의 최대난방부하는 251,058kcal/h, 83.1RT, 292.7kW이며, 시스템 설치 용량은 안전계수를 고려한 175,741kcal/h, 58.2RT, 205.0kW로 식(8)과 같이 계산된다.

$$Q_h = Q_g \cdot \gamma \quad (8)$$

여기서,

Q_g : 최대난방부하 [kcal/h]

γ : 방열관 방열 방법에 따른 안전계수 = 0.7

2) B동

B동의 유리온실은 유리+염화비닐필름의 피복재로 1·2중피복되어 있으며, 폴리에틸렌 계열과 부직포 보온피복재, 1층 커튼으로 보온 피복되어 있다. 외기와 접한 온실 표면적은 식(3)과 같다.

B동의 온실규모 및 규격은 용마루 높이 5.00m, 처마 높이 4.50m, 1SPAN 당 BAY 수 11개, 1동 온실 폭 70.40m, 1동 온실 길이 68.80m, 온실 동수 1동으로 이루어져 있으며, 식(3)에 대입하여 B동의 온실 표면적(6,507.09m²)을 산출하였다.

또한 B동의 온실면적은 4,843.53m²이다.

관류 열부하는 지붕을 통한 관류 열부하, 전·후면을 통한 관류 열부하, 양측면을 통한 관류 열부하가 있으며, 식(4)를 적용하여 계산하면

$$qr = h_t(T_s - T_d)(1 - fr)$$

여기서,

qr : 지붕을 통한 관류 열부하

$$h_t = 5.30 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$$

$$T_s = 23.00 \text{ °C}$$

$$T_d = -1.50 \text{ °C}$$

$$fr = 0.30$$

$$qg_1 = h_t(T_s - T_d)(1 - fr)$$

$$qg_2 = h_t(T_s - T_d)(1 - fr)$$

여기서,

qg_1 : 전, 후면을 통한 관류 열부하

qg_2 : 양측면을 통한 관류 열부하

$$h_t = 3.20 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$$

$$T_s = 23.00 \text{ °C}$$

$$T_d = -1.50 \text{ °C}$$

$$fr = 0.25$$

B동의 지붕을 통한 관류 열부하는 90.90kcal/m²·h, 전·후면 및 양측면을 통한 관류 열부하는 58.80kcal/m²·h로 동일하다.

환기 전열부하는 식(5)와 같이 $4.90\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ 로 계산되며, 지중 전열부하는 식(6)과 같이 $3.41\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ 로 계산된다.

식(3)~(6)을 통해 최대난방부하 식(7)과 같이 계산되어 $647,220\text{kcal}/\text{h}$, 214.1RT , 753.9kW 의 값을 가지며, 시스템 설치 용량은 안전계수를 고려한 $453,054\text{kcal}/\text{h}$, 149.9RT , 527.9kW 로 식(8)과 같이 계산된다.

3) C동

C동의 비닐하우스는 A동의 피복재 및 보온피복과 같으며, 외기와 접한 온실 표면적은 식(3)과 같다.

C동의 온실규모 및 규격은 용마루 높이 3.50m , 처마 높이 2.20m , 1SPAN 당 BAY 수 11개, 1동 온실 폭 60.80m , 1동 온실 길이 44.90m , 온실 동수 1동으로 이루어져 있으며, 식(3)에 대입하여 C동의 온실 표면적($3,560.77\text{m}^2$)을 산출하였다. 또한, C동의 온실면적은 $2,729.93\text{m}^2$ 이다.

관류 열부하는 지붕을 통한 관류 열부하, 전·후면을 통한 관류 열부하, 양측면을 통한 관류 열부하가 있으며 식(4)와 같다.

C동의 각각의 관류 열부하는 $83.79\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ 로 A동과 동일하다.

환기 전열부하와 지중 전열부하는 식(5), (6)과 같이 계산되어 $4.90\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$, $3.41\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ 값을 가진다.

식(3)~(6)을 통해 최대난방부하는 식(7)과 같이 계산되어 $357,626\text{kcal}/\text{h}$, 118.3RT , 416.6kW 이며, 시스템 설치 용량은 안전계수를 고려한 $250,339\text{kcal}/\text{h}$, 82.8RT , 291.6kW 로 식(8)과 같이 계산된다.

3.2 환경적 측면에서의 경제성 평가

본 시스템의 신재생에너지 생산량, 에너지절감량, 온실가스저감량 평가를 위한 방법 및 절차는 다음과 같으며, 2018년 7월 21일부터 2020년 8월 31일까지의 실증 운전을 통해 계산하였다.

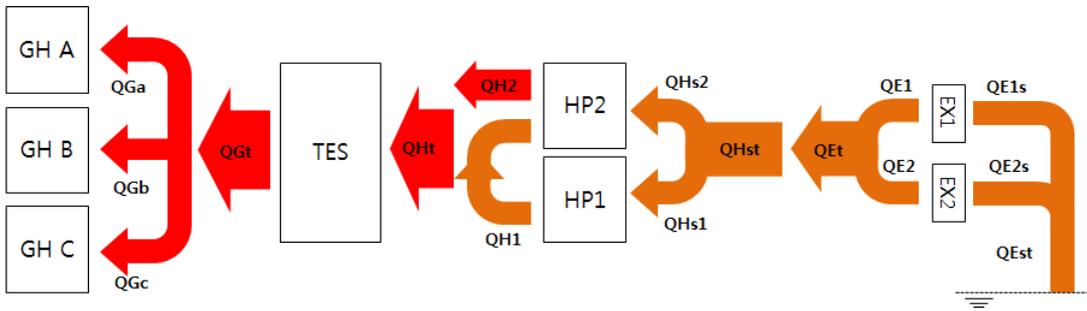


Fig. 8 Main energy flow chart for performance evaluation

신재생에너지 생산량 누적 Q_{Ht} 은 식(9)~(11)과 같이 계산된다.

$$Q_{Ht} = Q_{H1} + Q_{H2} \quad (9)$$

$$Q_{H1} = \rho \cdot \dot{V} \cdot C_p \cdot (T_{a.6} - T_{a.5}) \quad (10)$$

$$Q_{H2} = \rho \cdot \dot{V} \cdot C_p \cdot (T_{a.7} - T_{a.6}) \quad (11)$$

여기서,

$$1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}, 1 \text{ TOE} = 10^7 \text{ kcal}$$

식(9)~(11)을 통해 히트펌프 1은 152,762kWh, 히트펌프 2는 727,605kWh의 신재생에너지를 생산하였으며, 본 시스템의 누적 신재생에너지 생산량은 75.7TOE임을 알 수 있다.

에너지절감량은 와 히트펌프 1차에너지의 차로 식(12)~(14)와 같이 보일러 효율은 85%로 가정하였으며, 난방만 고려하여 계산하였다.

$$\text{등유보일러 1차에너지(TOE)} = \text{난방생산량(Gcal)}/0.85/10 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{히트펌프 총 소비전력(MWh)} = \\ \text{히트펌프 자체 소비전력} + \text{각 순환펌프 소비전력} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{히트펌프 1차에너지(TOE)} = \text{히트펌프 총 소비전력(MWh)} \times \\ 0.215(\text{TOE/MWh}) \end{aligned} \quad (14)$$

등유보일러의 난방생산열량은 625.74Gcal로 등유보일러 1차에너지(TOE)는 73.62TOE이며, 히트펌프 총 소비전력은 235.9MWh로 히트펌프 1차에너지(TOE)는 50.7TOE이다. 따라서, 에너지절감량은 22.89TOE로 계산되었다.

온실가스 저감량은 식(15), (16)의 차로 계산되며, 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{등유보일러 사용 시 CO}_2 \text{ 배출량} = \text{등유보일러 1차에너지} \times \text{환산계수} \\ [0.812 (\text{TC}/\text{TOE}) \times (44/12)(\text{tCO}_2/\text{TC})] \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{전기압축식 히트펌프 사용 시 CO}_2 \text{ 배출량} = \\ \text{히트펌프 총 소비전력} \times \text{환산계수} (0.4448)(\text{tCO}_2/\text{MWh}) \end{aligned} \quad (16)$$

식(12), (13)에 따라 등유보일러 사용 시 CO₂ 배출량은 219.18tCO₂이며 히트펌프 사용 시 CO₂ 배출량은 104.94tCO₂이므로, 온실가스 저감량은 114.24tCO₂로 계산된다.

년도별 누적 운전을 통한 신재생에너지 생산량, 에너지 절감량, 온실가스 저감량은 Table 4와 같다. Table 5 - 7은 실증 운전을 통한 년도별 냉방에너지 일일 생산량이며, Table 8 - 10은 년도별 난방에너지 일일 생산량이다.

Table 4 Annual renewable energy production, energy savings, greenhouse gas reduction

Year	Renewable energy production (TOE)	Energy savings (TOE)	Greenhouse gas reduction (tCO ₂)
2018	17.7	3.9	16.23
2019	12.2	3.72	20.53
2020	45.8	15.28	77.49

Table 5 Daily production of cooling energy - Measurement period 2018.07.21. - 2018.08.31.

Date	production of cooling energy (kWhth)	HP + Pump Power consumption (kWhp)
2018-07-21	4,582	1,029
2018-07-22	9,493	2,130
2018-07-23	11,544	2,866
2018-07-24	10,426	2,465
2018-07-25	10,273	2,620
2018-07-26	5,516	1143.48
2018-07-27	2,388	677
2018-07-28	5,998	1,240
2018-07-29	8,398	1,488
2018-07-30	5,191	1,057
2018-07-31	5,885	1126.68
2018-08-01	1,660	320.6
2018-08-07	929	0
2018-08-09	666	0
2018-08-12	300	0
2018-08-13	833	579.89
2018-08-14	5,005	1102.08
2018-08-15	4,431	998.38
2018-08-16	1,653	448.9
2018-08-17	1,197	261.99
2018-08-18	1,323	285.2
2018-08-19	1,861	550.2
2018-08-20	1,452	339.6
2018-08-21	1,485	485.8
2018-08-22	1,447	346.8

2018-08-24	35	0
2018-08-27	1,150	2007.6
2018-08-28	419	396.2
2018-08-29	4,250	1001.39
2018-08-30	2,364	609.3
2018-08-31	5,147	1221.18
Total	117,301 kWh	28,797.27 kWh

Table 6 Daily production of cooling energy - Measurement period 2019.08.01.
- 2019.08.31.

Date	production of cooling energy (kWth)	HP + Pump Power consumption (kWhp)
2019-08-02	134	0.09
2019-08-07	274	409.39
2019-08-22	1,007	67.18
2019-08-23	498	0
Total	1,913 kWh	476.66 kWh

Table 7 Daily production of cooling energy - Measurement period 2020.08.11.
- 2020.08.31.

Date	production of cooling energy (kWth)	HP + Pump Power consumption (kWhp)
2020-08-11	1,045	881
2020-08-12	1,930	631
2020-08-13	1,650	555
2020-08-14	2,205	720
2020-08-15	2,381	791
2020-08-16	2,300	750
2020-08-17	2,163	651
2020-08-18	2,465	925
2020-08-19	2,187	644
2020-08-20	2,103	739
2020-08-21	1,936	704
2020-08-22	1,883	578
2020-08-23	1,505	571
2020-08-24	1,598	511
2020-08-25	1,058	417

2020-08-28	1,689	573
2020-08-29	1,675	573
2020-08-30	1,502	506
2020-08-31	273	129.2
Total	33,548 kWh	11,849.2 kWh

Table 8 Daily production of heating energy - Measurement period 2018.12.06.
- 2018.12.31.

Date	production of heating energy (kWhth)	HP + Pump Power consumption (kWhp)
2018-12-06	452	693.1
2018-12-07	4,994	1,315
2018-12-08	7,353	1,963
2018-12-09	5,667	1,376
2018-12-10	2,668	742.9
2018-12-11	1,493	509.68
2018-12-12	3,403	973.7
2018-12-13	2,551	761.8
2018-12-14	4,670	1,229
2018-12-15	5,999	1,494
2018-12-16	2,551	713.2
2018-12-17	864	376.48
2018-12-18	2,776	769.5
2018-12-19	1,974	509.68
2018-12-20	339	165.69
2018-12-22	430	209.48
2018-12-23	1,566	586
2018-12-24	5,715	1,342
2018-12-25	4,237	1051.9
2018-12-26	2,391	674
2018-12-27	5,896	1,433
2018-12-28	8,206	1971.6
2018-12-29	6,233	962.4
2018-12-30	3,898	896.2
2018-12-31	2,537	982.1
Total	88,863 kWh	23,701.41 kWh

Table 9 Daily production of heating energy - Measurement period 2019.01.01.
- 2019.02.16., 2019.11.01. - 2019.12.31.

Date	production of heating energy (kWhth)	HP + Pump Power consumption (kWhp)
2019-01-01	2,548	776.2
2019-01-02	4,937	1333.8
2019-01-03	4,106	893.6
2019-01-04	1,612	674.8
2019-01-05	1,809	400.28
2019-01-06	1,905	529.08
2019-01-07	368	290.98
2019-01-08	408	0
2019-01-09	922	385.68
2019-01-10	386	301.78
2019-01-11	352	0
2019-01-12	125	359.58
2019-01-13	518	20.69
2019-01-14	704	350.08
2019-01-15	591	319.28
2019-01-16	1,534	625.4
2019-01-17	3,230	1094
2019-01-18	3,935	997.6
2019-01-19	2,745	779.8
2019-01-20	2,974	1041.1
2019-01-21	4,185	1155.6
2019-01-22	1,825	312.08
2019-01-23	1,122	567.59
2019-01-24	1,933	522.29
2019-01-25	3,024	995.6
2019-01-26	1,795	513.89
2019-01-27	1,275	474.89
2019-01-28	1,158	544.69
2019-01-29	1,486	441.79
2019-01-30	280	0
2019-01-31	1,958	833.2
2019-02-01	1,462	552.89
2019-02-02	567	227.98
2019-02-04	1,056	341.18
2019-02-05	932	507.59
2019-02-06	338	0
2019-02-07	1,039	669.29

2019-02-08	2,408	706.19
2019-02-09	1,876	549.09
2019-02-10	1,631	547.69
2019-02-11	1,702	811.4
2019-02-12	1,613	473.59
2019-02-13	1,018	296.38
2019-02-14	1,038	645.39
2019-02-15	559	0
2019-02-16	324	329.98
2019-11-29	323	189.28
2019-11-30	1,551	1069.5
2019-12-02	1,255	412.6
2019-12-03	1,812	629.8
2019-12-04	1,672	560.2
2019-12-05	3,203	861.4
2019-12-06	3,729	1221.6
2019-12-07	3,029	1046.68
2019-12-08	2,985	848.79
2019-12-09	2,424	791.98
2019-12-10	1,520	633.18
2019-12-11	1,171	542.28
2019-12-12	2,753	831.09
2019-12-13	2,976	1051.08
2019-12-14	1,590	723.78
2019-12-15	1,499	585.09
2019-12-16	282	265.19
2019-12-17	96	0
2019-12-18	1,190	829.88
2019-12-19	3,248	921.19
2019-12-20	2,384	905.28
2019-12-21	2,378	773.68
2019-12-22	1,362	775.88
2019-12-23	1,838	612.18
2019-12-24	2,376	725.68
2019-12-25	1,346	525.68
2019-12-26	1,794	734.68
2019-12-27	2,712	974.18
2019-12-28	2,206	761
2019-12-29	752	472.68
2019-12-30	1,443	704.68
2019-12-31	7,345	2186.1
Total	139,557 kWh	48,360.28 kWh

Table 10 Daily production of heating energy - Measurement period
2020.01.01. - 2020.06.09.

Date	production of heating energy (kWhth)	HP + Pump Power consumption (kWhp)
2020-01-01	5,848	1603.38
2020-01-02	5,383	1,478
2020-01-03	3,847	1,097
2020-01-04	4,889	1,542
2020-01-05	4,964	1485.98
2020-01-06	397	223.19
2020-01-08	5,874	1952.78
2020-01-09	5,834	1,597
2020-01-10	6,925	2,001
2020-01-11	8,147	2236.78
2020-01-12	7,813	2126.28
2020-01-13	6,891	1951.98
2020-01-14	10,248	2964.5
2020-01-15	6,527	1978.18
2020-01-16	5,630	1754.48
2020-01-17	5,993	1822.78
2020-01-18	6,038	1,850
2020-01-19	6,324	1,897
2020-01-20	5,775	1754.39
2020-01-21	6,357	1,864
2020-01-22	4,252	1,259
2020-01-23	3,647	1177.09
2020-01-24	3,475	1079.69
2020-01-25	3,731	1096.49
2020-01-26	4,356	1316.09
2020-01-27	6,938	2,010
2020-01-28	4,529	1434.58
2020-01-29	5,443	1793.18
2020-01-30	6,695	2117.49
2020-01-31	6,974	2170.58
2020-02-01	5,934	1884.38
2020-02-02	6,012	1974.19
2020-02-03	6,527	2221.78
2020-02-04	7,764	2365.78
2020-02-05	8,172	2630.59
2020-02-06	8,223	2419.79
2020-02-07	4,806	1501.28

2020-02-08	5,102	1669.38
2020-02-09	6,229	1970.48
2020-02-10	4,479	1331.98
2020-02-11	3,720	1217.68
2020-02-12	1,505	581.8
2020-02-13	1,972	684.98
2020-02-14	1,884	655
2020-02-15	738	393.2
2020-02-16	7,379	2291.48
2020-02-17	11,765	3493.4
2020-02-18	8,814	2677.6
2020-02-19	7,121	2192.89
2020-02-20	4,266	1482.09
2020-02-21	3,619	1182.88
2020-02-22	3,584	1201.88
2020-02-23	4,986	1555.09
2020-02-24	3,533	1236.78
2020-02-25	749	391.9
2020-02-26	1,677	632.5
2020-02-27	4,108	1368.88
2020-02-28	2,916	958.39
2020-02-29	2,583	898.09
2020-03-01	3,194	1077.39
2020-03-02	3,849	1250.38
2020-03-03	2,690	813.29
2020-03-04	2,551	916.99
2020-03-05	4,166	1363.48
2020-03-06	4,668	1456.18
2020-03-07	4,118	1284.98
2020-03-08	4,300	1329.88
2020-03-09	2,652	889.4
2020-03-10	6,037	1815.48
2020-03-11	5,157	1630.28
2020-03-12	4,469	1497.18
2020-03-13	1,617	577.9
2020-03-14	4,999	1605.98
2020-03-15	3,117	1020.99
2020-03-16	2,736	856.48
2020-03-17	328	0
2020-03-18	1,323	1239.19
2020-03-19	3,111	1110.89
2020-03-20	3,578	1151.39

2020-03-21	2,322	853.19
2020-03-22	1,161	410.3
2020-03-23	2,589	678.09
2020-03-24	2,128	801.08
2020-03-25	1,316	461.59
2020-03-26	201	157.18
2020-03-27	1,165	567.7
2020-03-28	1,066	361.49
2020-03-29	1,089	493.6
2020-03-30	999	428.4
2020-03-31	1,091	427.6
2020-04-01	1,016	380.8
2020-04-02	790	349.6
2020-04-03	1,401	504.1
2020-04-04	2,944	958.99
2020-04-05	3,797	1231.48
2020-04-06	3,532	1075.69
2020-04-07	2,735	920.19
2020-04-08	3,802	1086.68
2020-04-09	3,592	1078.09
2020-04-10	1,950	670.8
2020-04-11	2,157	745.38
2020-04-12	4,220	1423.98
2020-04-13	1,983	732.79
2020-04-14	3,440	1103.39
2020-04-15	2,145	777.89
2020-04-16	1,746	626.4
2020-04-17	1,158	474.9
2020-04-18	2,470	818.4
2020-04-19	3,052	1007.8
2020-04-20	1,601	563.9
2020-04-21	2,466	832.09
2020-04-22	3,564	1149.09
2020-04-23	3,421	1136.4
2020-04-24	3,515	1176.99
2020-04-25	1,820	534.28
2020-04-28	856	2726
2020-04-29	2,860	954.58
2020-04-30	2,070	711.29
2020-05-01	1,177	434.4
2020-05-02	702	254
2020-05-03	353	255.49

2020-05-04	665	318.1
2020-05-05	972	316.59
2020-05-06	928	495
2020-05-07	1,759	673.8
2020-05-08	916	309.8
2020-05-09	525	276.3
2020-05-10	1,181	481.8
2020-05-11	1,362	505.8
2020-05-12	1,087	414.5
2020-05-13	1,799	539.7
2020-05-14	1,260	441.1
2020-05-16	349	236.6
2020-05-17	891	357.6
2020-05-18	1,013	429.79
2020-05-19	1,815	658.3
2020-05-20	1,959	641.39
2020-05-21	1,821	567.9
2020-05-22	1,373	533.2
2020-05-23	1,128	387.8
2020-05-24	703	313.3
2020-05-25	324	184.28
2020-05-26	896	349.8
2020-05-27	941	384.5
2020-05-28	1,557	568.8
2020-05-29	873	257.08
2020-05-30	383	0
2020-05-31	191	0
2020-06-01	707	698.09
2020-06-02	1,597	565.39
2020-06-03	481	115.1
2020-06-04	312	332.09
2020-06-05	193	0
2020-06-06	104	195.49
2020-06-07	488	158.79
2020-06-08	497	230.79
2020-06-09	102	0
Total	499,185 kWh	163,863.41 kWh

2018년~2020년 실증 운전결과를 토대로 신재생에너지 생산량 75.7TOE, 에너지 절감량 22.89TOE, 온실가스 저감량(탄소배출저감량) 114.24tCO₂를 산출하였다.

본 시스템은 냉방기간 동안 시간당 836kWh, 난방기간안 시간당 1,026kWh의 열 에너지를 생산하였으며, 이를 토대로 난방 및 냉방 운전 스케줄을 각각 100일 8시간, 150일 11시간 운전으로 수행할 때 예상되는 신재생에너지 생산량, 에너지 절감량 및 온실가스 저감량은 각각 203.1TOE, 53.3TOE, 265.8tCO₂로 산출된다.

실증 운전결과로 기존 등유보일러 대비 본 시스템의 에너지 절감량은 약 30%, 온실가스 저감량(탄소배출 저감)은 약 50% 이상 절감됨을 확인하였다.

Table 11 Annual renewable energy production, energy savings, greenhouse gas reduction

Date	Renewable energy production (TOE)	Energy savings (TOE)	Greenhouse gas reduction (tCO ₂)
2018-2020 Demonstration results	75.7	22.89	114.24
Driving schedule Cooling: 8 hours a day for 100 days Heating: 11 hours a day for 150 days	203.1	53.3	265.8

3.3 시설온실 대상작물 및 생육환경 분석

시설온실에서 재배되고 있는 아열대만감류인 블러드오렌지를 대상으로 2018년 12월 6일 18시부터 시작하여 현재까지 자동난방운전을 하고 있으며, 제어운전 조건은 12℃에서 작동, 14℃에서 중지하도록 설정하였다.[7]

과실크기는 2019년 6월부터 12월까지, 2020년 6월부터 12월까지 한 달 간격으로 측정하였으며, 생육조사는 새 순이 나는 시즌(봄 순, 여름 순)에 동서남북 4방향으로 5개씩 총 20개의 잎을 채취하여 실시하였다. 조사방법은 발전소 온배수 시스템을 적용한 시설온실의 블러드오렌지 A, B, C 나무군을 대상으로 과폭, 과경, 엽장, 엽폭, 엽면적, 생체중 및 건물중을 조사하였다. 엽면적 측정은 엽면적 측정기(LI-3100, LI Cor., USA)를 이용하여 측정하였다. 생체중은 생체 무게를 건물중은 70℃ 이상에서 3일 건조 후 측정하였다. 과실의 당산도 비교 분석의 경우 당해연도 수확이 이루어지지 않아 본 연구에서는 제외하였다.

1) 난방운전

발전소 온배수를 이용한 시설온실의 난방운영을 검증하기 위해 실증사이트가 위치한 지점의 AWS 기상데이터와 시설온실 내부에 설치된 환경데이터의 분석을 진행하였다.

Fig. 9와 10 은 2018년 12월 6일부터 2018년 12월 8일 까지의 시설온실의 내부 온·습도와 실증사이트에서 가장 가까운 농업기술원 신촌리 AWS의 온·습도 데이터를 비교한 그래프이다. 시설온실의 내부온도는 평균 12.7℃로 신촌리 AWS 평균 5.5℃ 대비, 7.2℃ 가량 높게 나타났으며, 습도의 경우 시설온실의 내부습도가 51.1%, 신촌리 AWS 내부습도는 43.3%로 7.8% 가량 높게 나타난 수치를 보였다.

Fig. 11은 시설온실의 난방운전조건에 따른 히트펌프의 ON/OFF 상태를 나타내는 그래프로 2018년 12월 6일 18시부터 난방운전을 시작하여, 온도 설정값에 따라 12℃에서 작동하고 14℃에서 중지함을 확인하여 히트펌프가 정상 작동하였음을 확인할 수 있다.

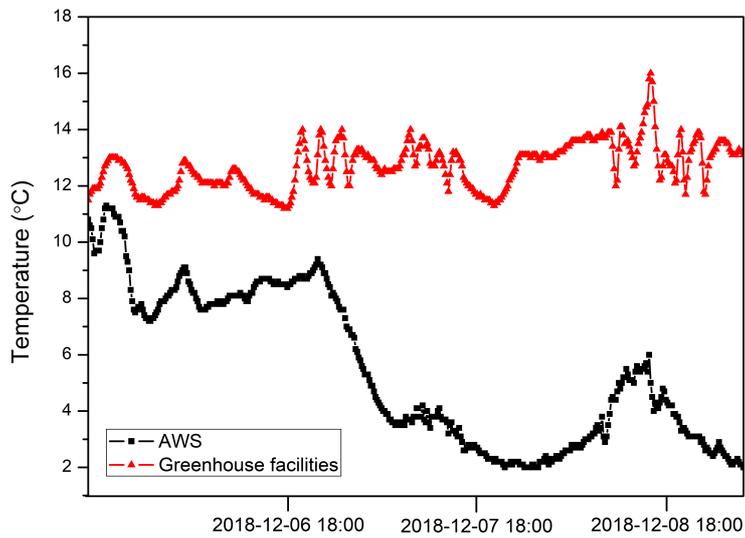


Fig. 9 AWS temperature data and facility temperature data

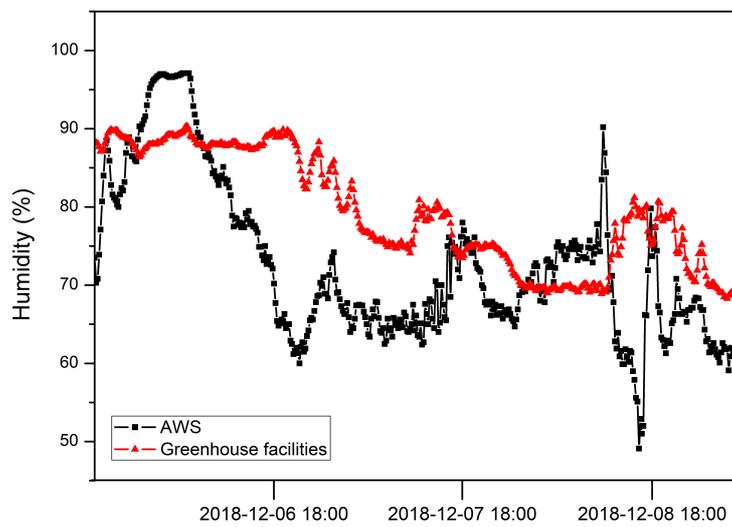


Fig. 10 AWS humidity data and facility humidity data

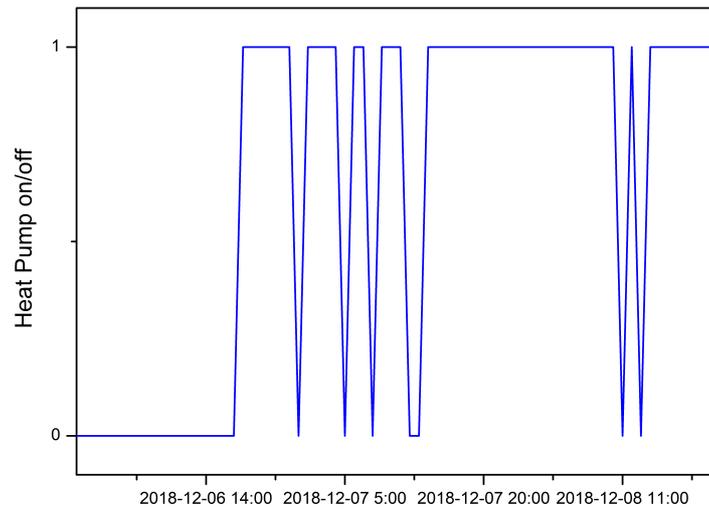


Fig. 11 Operating state of the heat pump according to the set temperature

2) 과실크기

Fig. 12는 시설온실 A 나무군의 2019년도 과실크기를 산점도로 나타낸 그래프이다. A 나무의 과실 개수는 총 109개로 측정기간 동안 총 43개의 낙과가 발생하였으며, 과경의 평균 성장률은 10.04%이고 과폭의 평균 성장률은 9.47%로 나타났다.(기준) Fig. 13은 시설온실 A 나무군의 2020년도 과실크기를 산점도로 나타낸 그래프로, 과실 개수는 총 432개로 작년 대비 4배의 과실이 달렸으며 측정기간 동안 총 76개의 낙과가 발생하였다. 2020년도의 A나무 과경과 과폭의 성장률은 9.75%, 8.09%으로 작년과 비슷한 성장률을 보였다.

Fig. 14는 B 나무군의 2019년도 과실크기 그래프이며, 과실 개수는 총 88개로 측정기간 동안 총 45개의 낙과가 발생하여, 2019년도 나무군 중 가장 낙과율이 큰 것으로 나타났다. 반면, 과경과 과폭의 평균 성장률은 12.11%, 10.85%로 2019년 시설온실 나무군 중 가장 큰 성장률을 보였다. Fig. 15는 B 나무군의 2020년도 과실크기 그래프이며, 과실 개수는 총 281개로 작년 대비 3.2배의 과실이 달렸으며 측정기간 동안 총 156개의 낙과가 발생하여, 전체 기간 중 낙과율이 55.5%로 가장 큰 수치를 보였으나, 과경과 과폭은 10.03%, 8.29%로 2020년 시설

온실 나무군 중 가장 큰 성장률을 보였다.

Fig. 16은 2019년 시설온실 C 나무군의 과실크기를 산점도로 나타낸 그래프이며, 과실 개수는 총 10개로 A 나무군 과실 개수의 10%에도 미치지 못하였으며, 측정기간 동안 1개의 낙과가 발생하였다. 또한, 과경 및 과폭의 평균 성장률은 11.18%, 11.16%로 나타났다. Fig. 17은 2020년 시설온실 C 나무군의 과실크기 산점도 그래프이며, 과실 개수는 작년 대비 25.6배나 많은 256개가 달렸으며 측정기간 동안 낙과는 총 33개가 발생하였다. 과경의 성장률은 8.84%, 과폭의 성장률은 8.12%로 작년 대비 0.8배의 성장률을 보였다.

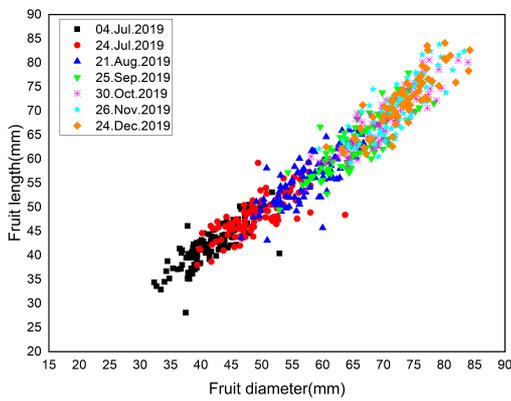


Fig. 12 Demonstration site A tree fruit size - 2019

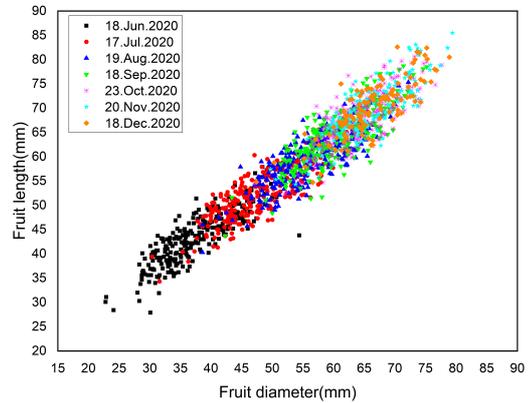


Fig. 13 Demonstration site A tree fruit size - 2020

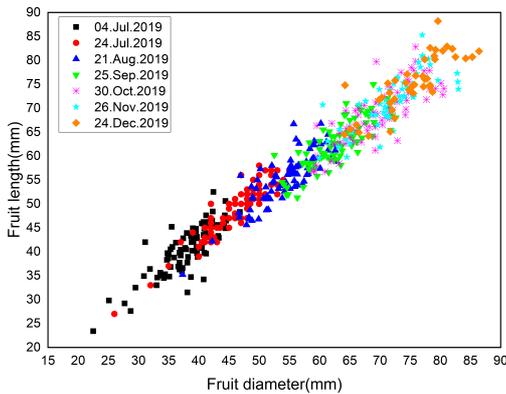


Fig. 14 Demonstration site B tree fruit size - 2019

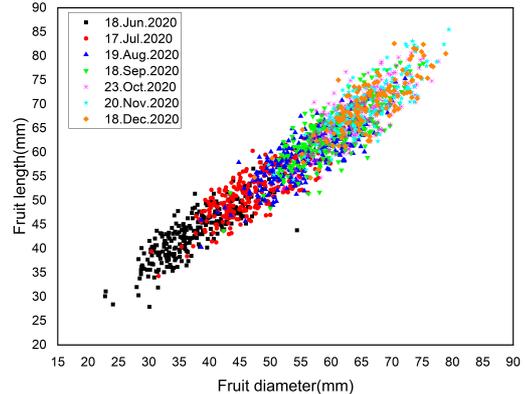


Fig. 15 Demonstration site B tree fruit size - 2020

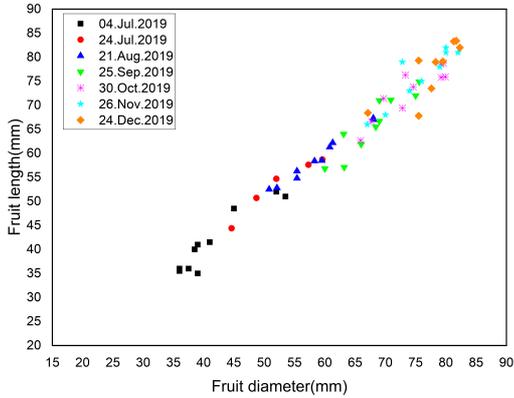


Fig. 16 Demonstration site C tree fruit size - 2019

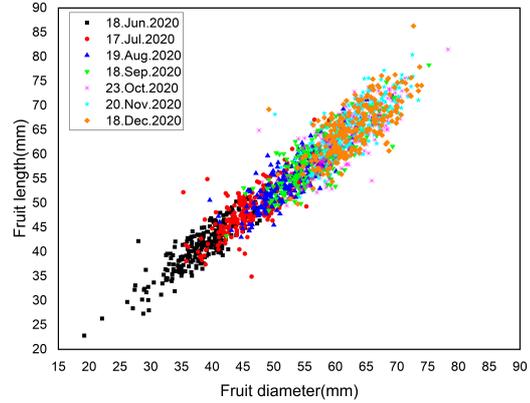


Fig. 17 Demonstration site C tree fruit size - 2020

Fig. 18~20은 시설온실 2019년도와 2020년도 과실 크기의 회귀분석을 통한 잔차 그래프이다.

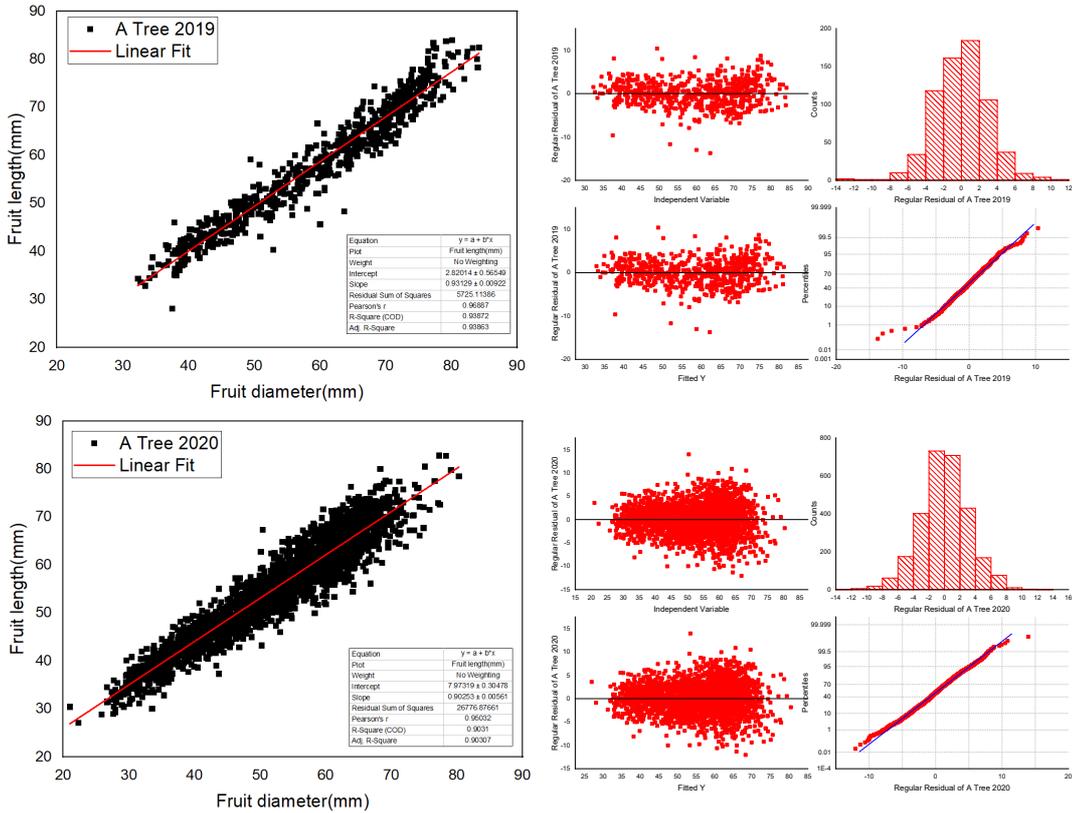


Fig. 18 Residual Plots - A Tree

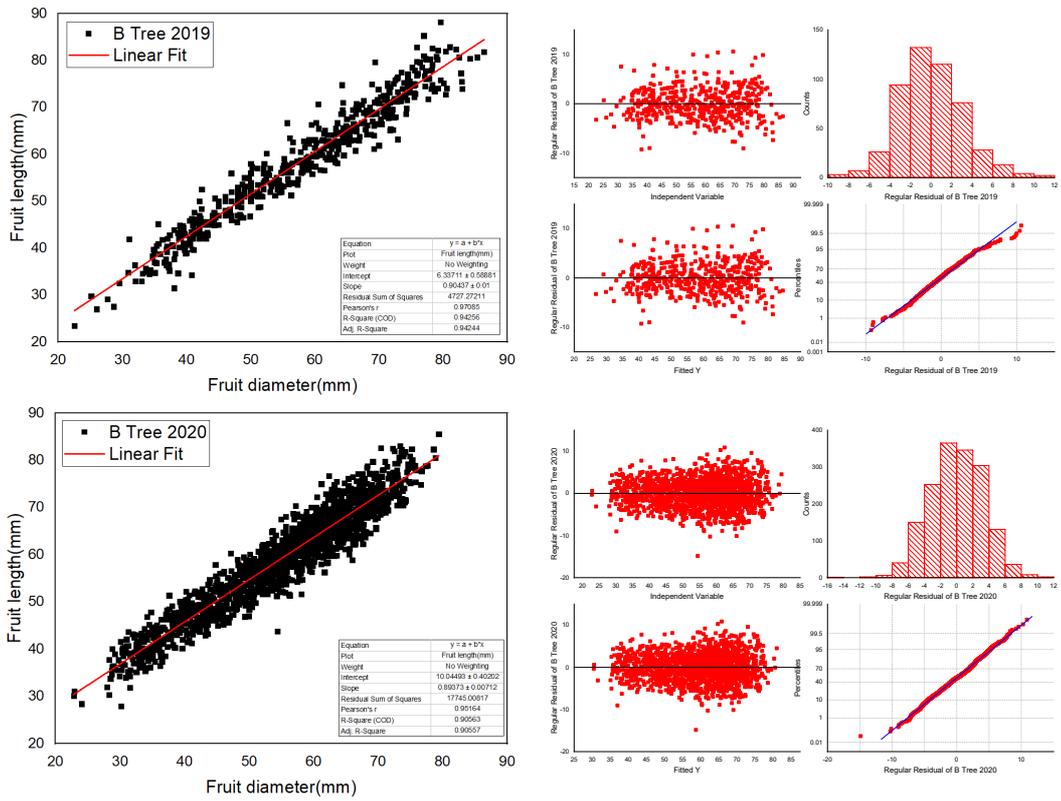


Fig. 19 Residual Plots - B Tree

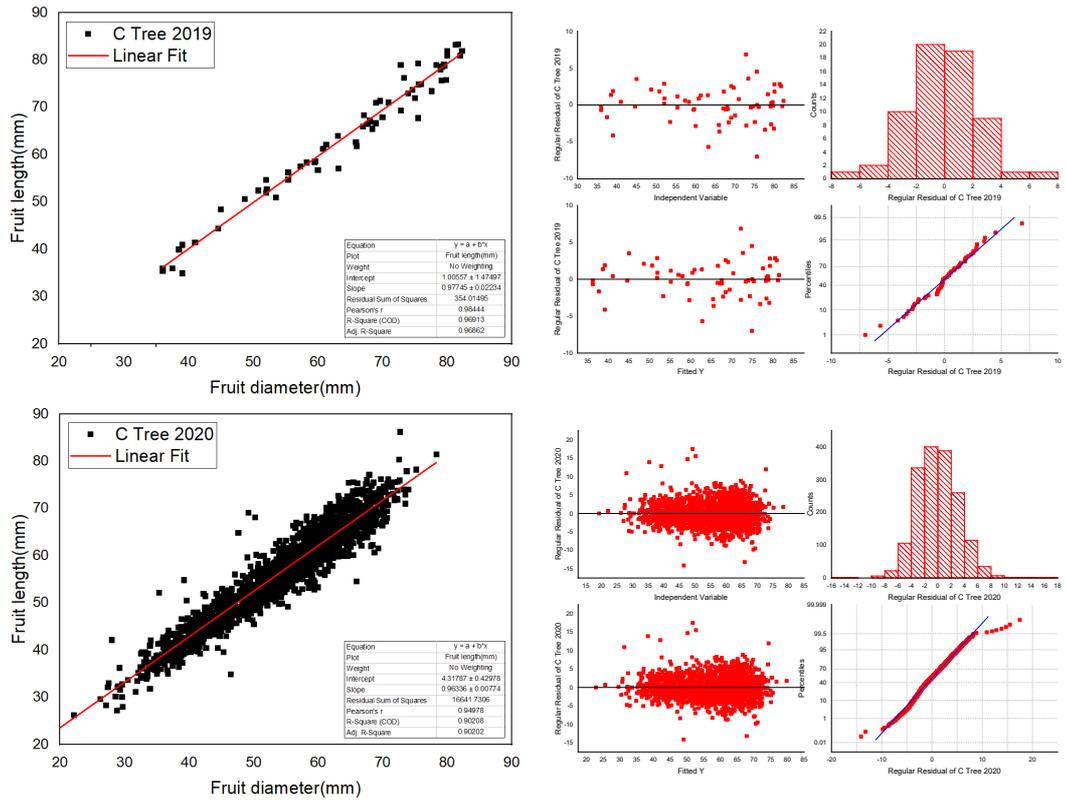


Fig. 20 Residual Plots - C Tree

Fig. 21과 22는 각 나무의 평균 과경 및 과폭을 나타내는 그래프이다. 2020년도 과실이 작년 대비 개수가 약 4.8배 많았으며 크기 또한 작년과 비슷한 수치를 보였다. 2019년도 나무군 중에서는 C 나무군의 과실크기가 가장 크고 B 나무군의 과실크기가 가장 작았다. 반면, 2020년도 나무군 중에서는 B 나무군의 과실크기가 가장 크고 A 나무군의 과실크기가 가장 작았다. 또한, 당해연도 평균 과실 크기는 작년과 같은 수치로 나타났다.

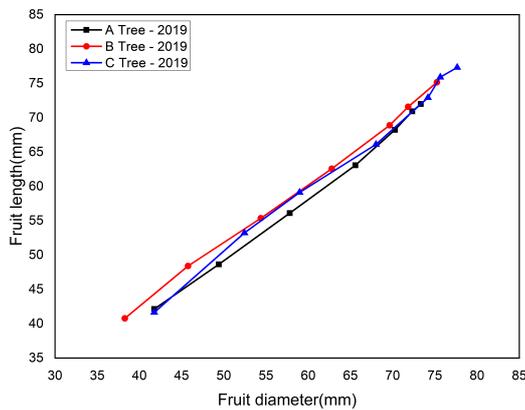


Fig. 21 Average fruit size of each tree in the demonstration site - 2019

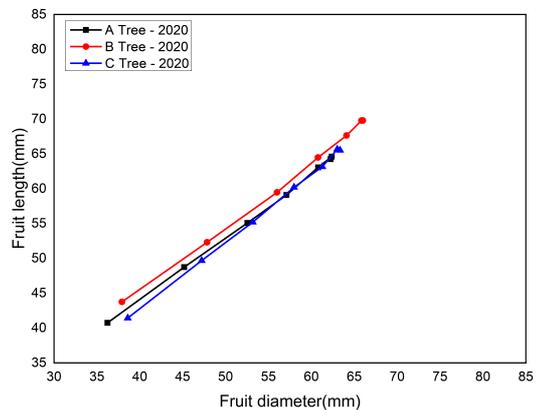


Fig. 22 Average fruit size of each tree in the demonstration site - 2020

2) 잎 크기

Table 4는 2019년도, 2020년도 시설온실의 나무군의 평균 잎 크기를 나타낸 표이다.

2019년 7월 24일, 2020년 6월 18일에 채취된 봄 순의 경우 2020년 C나무의 평균 엽면적이 34.45cm²으로 가장 크며, 2020년 A나무의 평균 엽면적이 25.15cm²로 가장 작았다. 또한, 2020년도 나무의 평균 엽면적은 30.70cm²으로 2019년도 나무의 평균 엽면적보다 12%의 큰 수치를 나타낸다. 반면, 2020년도 A나무의 평균 생체중은 0.60g으로 가장 작았다. 2020년도 나무의 평균 생체중은 0.71g, 평균 건물중은 0.31g으로 작년 대비 12%, 31% 더 높게 나타났다.

2019년 9월 25일, 2020년 8월 19일에 채취된 여름 순의 경우 2020년 C나무의 평균 엽면적이 37.83cm²로 가장 크며, 2019년 B나무 평균 엽면적이 27.24cm²로 가장 작았다. 평균 생체중은 2019년도 C나무가 0.82g으로 가장 컸으며, 2020년도 A나무가 0.56g으로 가장 작았다. 2020년도 나무의 생체중은 0.64g으로 2019년도 나무보다 16% 작지만, 평균 엽면적과 평균 건물중은 35.17cm², 0.35g으로 12%, 27% 더 높게 나타났다.

Table 12 Average leaf size for A, B and C trees

Date	Classification	Leaf size				
		Leaf width(cm)	Leaf length(cm)	Leaf area(cm ²)	Fresh weight(g)	Dry weight(g)
24.Jul.2019	A	4.78	8.36	25.32	0.62	0.2278
	B	4.85	8.67	26.77	0.63	0.2333
	C	5.22	8.84	30.35	0.67	0.2551
	ABC_Avg	4.95	8.62	27.48	0.64	0.2387
25.Sep.2019	A	5.68	9.71	34.67	0.81	0.3071
	B	4.93	8.66	27.24	0.68	0.2459
	C	5.40	9.46	32.49	0.82	0.2948
	ABC_Avg	5.33	9.27	31.47	0.77	0.2826
18.Jun.2020	A	4.43	8.44	25.15	0.60	0.2704
	B	5.01	9.76	32.49	0.76	0.3444
	C	5.29	9.78	34.45	0.78	0.3263
	ABC_Avg	4.91	9.32	30.70	0.71	0.3137
19.Aug.2020	A	5.12	9.98	30.83	0.56	0.3224
	B	5.15	11.38	36.84	0.74	0.3717
	C	5.48	11.18	37.83	0.63	0.3454
	ABC_Avg	5.25	10.85	35.17	0.64	0.3465

IV. 결론

본 연구는 발전소 온배수 시스템을 이용한 시설온실의 냉난방 에너지를 절감할 수 있는 기술을 소개하고, 고가 연료비에 따른 농가의 어려움을 해소하고자 시설 온실의 에너지 절감량 분석 및 발전소 온배수 난방시스템을 적용한 아열대과수의 생육환경에 대하여 비교·분석을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

- 1) 2018년 7월 21일부터 2020년 8월 31일까지 냉난방운전을 통해 발전소 온배수 시스템의 누적 신재생에너지 생산량은 75.7TOE이며, 에너지 절감량은 난방만 고려하였으며 보일러 효율은 85%로 가정하여 22.89TOE로 계산되었다. 또한, 온실가스 저감량은 114.24tCO₂로 계산된다. 이를 토대로 난방 및 냉방 운전 스케줄을 각각 100일 8시간, 150일 11시간 운전으로 수행할 때 예상되는 신재생에너지 생산량, 에너지 절감량 및 온실가스 저감량은 각각 203.1TOE, 53.3TOE, 265.8tCO₂로 산출된다. 따라서 본 시스템은 기존 등유보일러 대비 에너지 절감량 30%, 온실가스 저감량 50% 이상을 절감할 수 있는 시스템을 확인할 수 있으며, 농가에 적용하여 냉난방비 및 전기료 절감에 기여할 수 있다.
- 2) 발전소 온배수를 활용하여 냉난방운전을 진행한 실증사이트는 IoT 기반의 모니터링 시스템으로 최적의 생육조건을 위한 제어운전을 통해 2020년도 과실이 작년 대비 개수가 4.75배 많았으며, 과경은 10.6% 더 작고, 과폭은 5.1% 더 작은 수치를 보였다. 2020년도 봄 순의 엽면적은 2019년도보다 11.7% 더 크고 생체중과 건물중은 11.9%, 31.4% 더 크게 나타났다. 여름 순의 경우에도 2020년도 엽면적은 봄 순과 마찬가지로 2019년도보다 11.7% 더 크고, 생체중은 16.2% 작지만, 건물중의 경우 22.6% 더 크게 나타났다. 2020년도의 평균 엽면적은 2019년도보다 11.7% 더 크며, 평균 생체중은 3.5% 작지만, 평균 건

물중은 26.6% 더 큰 것으로 보아 영양성분을 다량 함유된 것으로 판단된다.

위와 같은 결과로 발전소 온배수를 이용하여 시설온실의 냉난방 시스템에 적용할 경우 난방비 절감으로 인한 경영비의 절감과 생산성 증대를 통해 농가의 경쟁력 및 소득을 제고할 수 있으며, 이산화탄소 배출량 감축으로 2030 국가 온실가스 감축목표에 기여할 것으로 사료된다. 이를 정량적으로 구체화시키기 위해서는 지속적인 데이터 측정과 분석이 요구된다.

References

- [1] 농촌진흥청, “농업에너지 절감 및 신재생에너지 기술의 확대 보급기반조성을 위한 현장실증”, 2010
- [2] 김은정, “발전시설과 온배수 관리를 위한 제도 개선에 관한 연구, 환경법과 정책”, pp.79-100, 2018
- [3] UN Convention on the Law of the Sea, 1994
- [4] 이연건, 허재혁, 이동원, 현명택, “제주 시설온실 냉난방을 위한 발전소 온배수 활용 열펌프 시스템 구축 및 냉방성능 평가”, 한국에너지학회, pp.70-79, 2018
- [5] 김진욱, 박미란, “버려지는 발전소 온배수, 원예시설 난방에너지원으로 활용”, 한국농어촌연구원, 2015
- [6] 유영선, 유영선, 강연구, 장재경, 김영화, 김종구, 강금춘, “화력발전소의 온배수를 열원으로 이용하는 시설원예 난방용 히트펌프 시스템의 열교환기 설계 기준 설정”, 생물환경조절학회지, pp.372-378, 2012
- [7] 김민지, 임연주, 현명택, “발전소 온배수 난방시스템을 적용한 아열대과수의 생육정보에 대한 연구”, 한국기계기술학회지, pp.671-677, 2020