



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](#)

2017년 2월
석사학위논문

제어 기법에 따른 수직 밀폐형
심부지열 순환 시스템의 난방 성능
분석에 관한 연구

조선대학교 대학원

기계공학과

배정형

제어 기법에 따른 수직 밀폐형
심부지열 순환 시스템의 난방 성능
분석에 관한 연구

A Study on Heating Performance Analysis of
Vertically Closed Deep Geothermal Circulation System
according to Control Technique

2017년 2월 24일

조선대학교 대학원

기계공학과

배정형

제어 기법에 따른 수직 밀폐형
심부지열 순환 시스템의 난방 성능
분석에 관한 연구

지도교수 정 상 화

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 10월

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

배 정 형

배정형의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 장완식 印

위원 조선대학교 교수 정재강 印

위원 조선대학교 교수 정상화 印

2016년 11월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	III
LIST OF FIGURES	IV
ABSTRACT	VI
제1장 서 론	1
제1절 연구 배경	1
제2절 연구 동향	3
제3절 연구 내용 및 방법	5
제2장 이론적 고찰	7
제1절 시스템 난방 성능	7
제3장 심부지열 시뮬레이터 시스템	9
제1절 심부지열 시뮬레이터 제작	9
제2절 심부지열 순환 시뮬레이터 실험	19
1. 시뮬레이터의 성능 계수 실험 조건	19
2. 실험 결과 분석	21
가. 수조 내 수온 변화에 따른 시스템의 성능 계수	21
나. 수중 펌프의 주파수 변화에 따른 시스템의 성능 계수	24
다. 순환 펌프 On-off 제어에 따른 시스템의 성능 계수	27

제4장 심부지열 현장 실증 실험	34
제1절 심부지열 현장 시스템	34
제2절 실증 데이터 결과 분석	37
1. 실험 방법 및 순서	37
2. 실증 실험 결과 분석	41
가. 장기 운전 일자별 시스템 난방 성능 실험	41
나. 수중 펌프의 변속 운전 시스템 난방 성능 실험	44
다. 순환 펌프 On-off 제어 운전 시스템 난방 성능 실험	46
라. 온실 외기 온도 고정 일자별 시스템 난방 성능 분석	49
 제5장 결 론	 51
1. 연구 결과	51
2. 향후 연구 방향	52
 참 고 문 헌	 53

LIST OF TABLES

Table 3-1 Specification of submerged pump	12
Table 3-2 Specification of AC variable speed drive	14
Table 3-3 Specification of circulation pump	16
Table 3-4 Specification of simulator	17
Table 3-5 Results of temperature variation experiment in water tank	23
Table 3-6 Result of frequency variation experiment for submerged pump	26
Table 3-7 Results of on-off control experiment for circulation pump	33
Table 3-8 Comparison of COP_t values	33
Table 4-1 Specifications of experimental equipment	36

LIST OF FIGURES

Fig. 1-1 Schematic diagram of geothermal open loop system	4
Fig. 2-1 Position of thermometer around heat exchanger for simulator	8
Fig. 3-1 Block diagram of monitoring system	9
Fig. 3-2 Monitoring and control concept of simulator	10
Fig. 3-3 Flow chart of monitoring system	10
Fig. 3-4 Schematic diagram of simulator	11
Fig. 3-5 VVVF Control of submerged pump	11
Fig. 3-6 Submerged pump used in the experiment(IP-210)	12
Fig. 3-7 Photograph of VVVF inverter	13
Fig. 3-8 On-off control of circulation pump	14
Fig. 3-9 Circulation pump used in the experiment(PB-43)	15
Fig. 3-10 Flow chart for On-off control of circulation pump	15
Fig. 3-11 Photograph of simulator	18
Fig. 3-12 Front panel of monitoring system	19
Fig. 3-13 Sensing program	20
Fig. 3-14 Data saving program	20
Fig. 3-15 On-off program of circulation pump	20
Fig. 3-16 Heat gain according to temperature of water in water tank	22
Fig. 3-17 COP data according to temperature of water in water tank	22
Fig. 3-18 Flow rate according to frequency variation of submerged pump	25
Fig. 3-19 COP data according to frequency variation of submerged pump	25
Fig. 3-20 Temperature and flow rate for circulation pump with on-off controller at $T_1=42\text{ }^\circ\text{C}$	28
Fig. 3-21 Temperature and flow rate for circulation pump with on-off	

controller at $T_1=51\text{ }^\circ\text{C}$	29
Fig. 3-22 Temperature and flow rate for circulation pump with on-off controller at $T_1=55\text{ }^\circ\text{C}$	30
Fig. 3-23 Power consumption of circulation pump with on-off controller according to temperature of water in water tank	31
Fig. 3-24 COP data according to temperature of water using circulation pump with on-off controller	32
Fig. 4-1 Schematic diagram of overall deep geothermal system	34
Fig. 4-2 Photograph of data logger in container	35
Fig. 4-3 Input frequency variation by inverter	38
Fig. 4-4 On-off control operating condition of circulation pump	38
Fig. 4-5 Deep-geothermal system equipment of naju-site	39
Fig. 4-6 Position of thermometer around heat exchanger	40
Fig. 4-7 Temperature difference of overall system according to time	42
Fig. 4-8 Outside temperature of green house according to time	42
Fig. 4-9 Heat gain of overall system according to time	43
Fig. 4-10 COP data according to time	43
Fig. 4-11 Consumption power according to frequency variation of submerged pump	44
Fig. 4-12 Flow rate of primary system according to frequency variation of submerged pump	45
Fig. 4-13 COP data according to frequency variation of submerged pump	45
Fig. 4-14 Temperature difference of overall system according to time	46
Fig. 4-15 Outside temperature of green house according to time	47
Fig. 4-16 Heat gain of overall system according to time	47
Fig. 4-17 COP data according to time	48
Fig. 4-18 Heat gain of overall system according to time	49
Fig. 4-19 COP data according to time	50

ABSTRACT

A Study on Heating Performance Analysis of Vertically Closed Deep Geothermal Circulation System according to Control Technique

Bae, Jung Hyeong

Advisor : Prof. Jeong, Sang-Hwa, Ph.D.

Department of Mechanical Engineering,

Graduate School of Chosun University

Shallow geothermal system uses a water temperature of 15 °C through borehole depth of 150 ~ 200 m. The heat pump must be used in order to supply sufficient energy to the heating horticulture of facility. Shallow geothermal system requires the use of heat pump, which results in high maintenance costs. In addition, the heat pump consumes a large amount of power and degrades the system performance. On the other hand, in deep geothermal vertical closing systems, high temperature can be attained in a single borehole and a heat pump is not required this reduces the power consumption and improves the system performance.

In this study, the circulation simulator was designed in order to analyze circulation system's heating performance of deep geothermal facilities for a 2,002 m borehole in Naju-Sanpo-myeon.

Temperature variation, flow rate and power consumption of variables that affect the heating coefficient of the system were measured. VVVF control system was applied to the submerged pump and on-off control system to the circulation pump. In addition, the

heating performance of system was analyzed.

The submerged pump was operated by VVVF control on the simulator. When the submerged pump was operated at 40 Hz, system coefficient of performance recorded 28.95. The circulation pump was operated by on-off control on the simulator. When temperature of water in tank is 55 °C, system coefficient of performance was 27.32.

Demonstration data of heating performance was acquired at 2,002 m borehole. As a result, the coefficient of heating system when the system operated for one month was kept from 7 to 12.5. The experimental results of variable speed control for submerged pump was showed the same trend of experiments in the simulator. The coefficient of heating performance when submerged pump was operated at 45 Hz recorded 18. When the outside temperature of greenhouse was greater than 12 °C and the circulation pump was operated by on-off control, coefficient of heating performance recorded from 7 to 8.5.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경

지난 20세기 동안 급격한 산업 발전으로 인류의 생활수준이 높아지며 지구 환경 보전에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. 산업혁명 이후 이산화탄소 배출량은 꾸준히 증가하여 산업혁명 이전보다 이산화탄소의 농도가 25% 가량 증가하였고, 향후 지속적으로 배출량이 증가할 것으로 예상되고 있다^[1]. 이산화탄소, 메탄, 이산화질소, 염화불화탄소(CFC) 등의 온실가스의 영향으로 인하여 지구 온난화의 주원인인 온실 효과가 증가하고 있다. 이러한 문제로 1987년에는 세계 기상기구와 유엔환경계획이 기후 변화 정부간 패널을 설치함으로써 기후변화에 대처하고자 국제적인 노력이 시작되었고, 1997년 12월에는 교토 회의를 통해 선진국들에 대한 구체적인 감축목표가 설치되었다^[2-4]. 이러한 이산화탄소의 증가 원인은 화석 연료의 사용으로 인함이다. 인류는 손쉽게 에너지를 얻을 수 있는 화석 연료에 의존해왔고 무분별한 화석 연료의 소비로 인해 석유 및 천연가스 등 주요 에너지 자원의 평균가채연수(reserve-to-production-ratio)가 각각 40.5년과 63.3년 정도로 고갈 현상이 가속화 되고 있다^[5-6].

이에 대안으로 최근 세계적으로 지열, 태양광 등 신재생 에너지에 대한 관심이 높아지고 있으며 국내에서도 신재생 에너지에 관련된 기술개발 및 보급 등에 심혈을 기울이고 있다^[7]. 최근 정부에서는 지열 에너지를 이용하는 기술 개발을 대안으로 내놓았으며 2009년부터는 에너지절감시설을 지원하는 정책으로 농어업에너지 이용효율화 사업을 추진하고 있다. 그 중 하나인 정책으로 원예시설에 지열 냉난방시스템을 도입하여 난방 비용을 절감하고 있다. 국내의 원예시설 면적은 2012년 통계기준 56,095 ha에 이르고 있으며, 2013년 기준 대형비닐하우스나 유리온실에 천부지열 냉난방 시스템이 시설된 면적은 116.9 ha에 이르고 있다^[8].

지열 에너지는 보어홀의 깊이에 따라 천부지열과 심부지열로 구분된다. 천부지열은 10 ~ 20 ℃의 온도를 이용하며, 심부지열은 40 ℃ 이상의 온도를 이용한다^[9]. 또한 지열히트 펌프 시스템은 지중 열교환기의 형상에 따라서 수평형과 수직형 시스템으로 나뉜다^[10]. 현재 국내 원예시설에 보급된 지열 시스템은 보어홀의 깊이가 150 ~ 200 m인 천부 지열에 해당하고 대부분 수평형 지중 열교환기와 히트 펌프 난방 설비

를 갖춘 시스템이다. 천부지열 시스템의 경우에는 지하 150 ~ 200 m의 천공을 통해 15 °C 정도의 온도 에너지를 사용해야 하므로 원에시설에 충분한 난방에너지를 공급하기 위해서는 히트 펌프를 사용해야 한다. 이러한 천부지열 시스템은 온실 면적에 따라 난방 부하가 커질 때 지중 열교환기를 설치하기 위해 많은 보어홀 공사로 큰 부지가 필요하며, 히트 펌프의 사용으로 전기 사용량이 많고 압축기 등의 고장과 보수에 따른 설비 유지비 등이 발생하기 때문에 막대한 자본이 많은 비용이 소모되게 된다. 또한 전기 사용량이 증가함에 따라 시스템의 난방 성능은 현저히 떨어지게 되는 단점을 가지고 있다.

그러나 보어홀의 깊이가 1,000 m 이상인 심부지열 시스템의 경우에는 천공 부지 확보 및 대규모의 장비 투입으로 초기 비용은 많이 들지만 한 개의 보어홀에서 고온의 열에너지를 취득할 수 있기 때문에 히트 펌프 설비가 없어도 충분한 열량을 얻을 수 있고 전력 소비가 줄어들어 난방 성능이 증가하는 장점을 가지고 있다^[11].

지금까지 국내에서 지열 히트펌프 시스템에 대한 연구는 주로 천부 지열히트 펌프 시스템에 대한 연구들이 진행되었다. 깊이가 약 200 m인 보어홀에 수평형 지중열교환기를 설치하여 단독 주택에 적용하여 난방 성능을 분석한 연구도 있었으며, 지열히트 펌프 시스템을 일체형 건물에 적용하여 난방 성능을 분석하거나 개방형 지중열교환기를 설계하고 시설 난방에 적용하여 성능을 분석한 연구들이 진행되었다^{[7],[10],[12]}. 2010년에는 멀티 히트펌프(multi-heat pmp)를 설치하여 난방 성능을 분석한 연구도 수행되었다^[13]. 그러나 지열히트 펌프가 필요하지 않은 심부지열을 이용한 시스템에서 난방 성능 평가에 관한 연구는 전무한 실정이다.

본 논문에서는 현재 나주시 산포면에 위치한 2,002 m 시추공의 심부지열 순환 시스템의 난방 성능을 분석하기 위해서 심부지열 순환 시뮬레이터를 설계 및 제작하였다. 시뮬레이터를 통해 시스템의 난방 성능 계수에 영향을 미치는 변수인 온도변화, 유량, 소비 전력을 측정하였고, 수중펌프에 가변 전압 주파수 제어 시스템과 순환 펌프에 On-off 제어 시스템을 적용하여 시스템의 난방 성능을 평가하였다. 또한, 2,002 m 시추공의 심부지열 순환 시스템에서 난방 성능 실증 데이터를 측정하였으며 시뮬레이터와 현장 장비 간의 데이터를 비교 및 분석하였다.

제 2 절 연구 동향

신·재생 에너지 설비로 많은 관심을 받고 있는 지열 히트펌프(Ground- coupled heat pump, GCHP) 시스템은 크게 지중열교환기와 히트펌프로 구성된 냉난방 겸용 시스템이며 외기에 거의 영향을 받지 않는 항온성을 가지고 있기 때문에 효율이 높은 시스템이다^[14]. 또한, 기존 냉난방 설비와 비교하면 온실효과 가스를 상대적으로 적게 배출하기 때문에 친환경적인 시스템이다. 여름과 겨울이 확연하게 구분되는 국내에서는 에너지 절감 방안으로 활용가능성이 매우 우수하다고 할 수 있다. 지열 히트펌프 시스템은 설계 단계에서 에너지 부하 및 사용량을 정확하게 산정한 후 설계되어야 한다. 건물 부하와 연계한 지중 열교환기 최적 설계방법을 포함한 성능 해석등과 관련된 다양한 방법과 결과들이 제시되었다^[15-16]. 2011년부터 지열 히트펌프 시스템을 지역난방에 적용하고 난방 성능을 분석하는 다양한 연구들이 진행되고 있다.

지열을 이용하는 시스템은 연중 안정된 지중열원을 이용하여 냉난방의 효율을 증가시키는 기술로서 열에너지가 안정적으로 수급되므로 인기가 높다. 그리고 지열 시스템은 2004년 대체에너지법 개정 이후, 공공건물의 신재생에너지 이용 설비 의무화가 시행되면서, 관련 시장 및 보급률이 급격하게 증가하였고 친환경에너지의 대표적 기술로서 각광받고 있다.

지열 시스템은 지중 열교환 방식이 직접 방식과 간접 방식으로 나뉘어지며, 지중열교환기의 파이프 형상에 따라 개방형 시스템(Open loop system)과 밀폐형 시스템(Closed loop system)으로 나뉜다. 개방형 지열시스템의 개략도는 Fig. 1-1에 나타내었다.

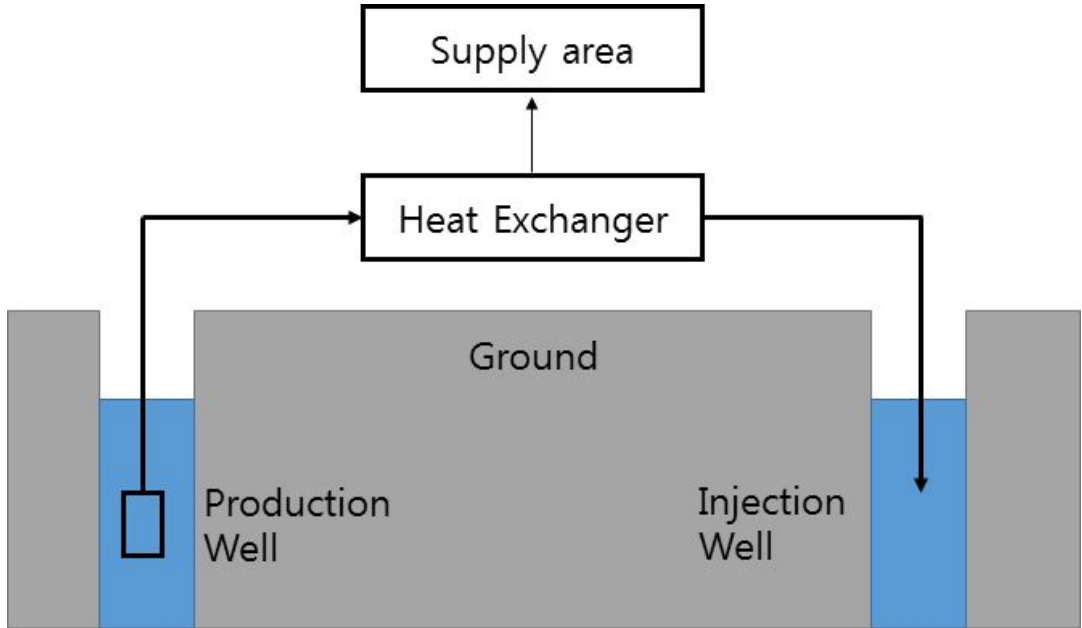


Fig. 1-1 Schematic diagram of open-loop geothermal system

2010년에는 건양대학교에서 지열원 멀티 열펌프 시스템을 시설원에 적용하고 난방 성능 특성에 관한 실증 연구를 진행하였다. 지열원 멀티 히트펌프 시스템을 실증 시설원에 사이트에 설치 및 시운전하여 데이터를 측정하였으며 일일 평균 COP (Coefficient of Performance)를 분석하였다^[13]. 2011년 한국건설기술연구원에서는 지열히트 펌프 시스템을 단독 주택에 적용하여 연중 냉난방 성능을 분석하였다. 수직형 지열 히트펌프 시스템을 가상의 단독주택에 설치하여 시간대별 시스템 성능, 월간별 시스템 성능을 분석하였고 전체 시스템의 COP 값을 분석하였다. 2012년 연세대학교는 수직 건물 일체형 지열 시스템을 한국 건축물에 적용하여 효율을 조사하고 실제 모델을 이용하여 난방 성능을 분석하였다. 연세대학교 송도 캠퍼스에 위치한 친환경 공동주택에 건물 일체형 시스템을 이용하여 바닥 복사 냉난방을 하였다. 실험은 세대에 난방 설정 온도를 20도로 설정하고 실내 온도의 변화에 따라 온수분배기를 작동시켜 세대내 온수 공급 및 환수 온도 등을 실시간 모니터링 및 측정하여 시스템의 난방 성능인 COP를 분석한 바가 있다^[7]. 또한, 2013년 청주대학교에서는 개방형 지열 시스템의 설계 및 시공 기준에 대하여 연구를 수행하였다^[17]. 이와 같이 지열 에너지를 이용하는 연구가 활발하게 진행되고 있으나 심부지열에 관한 연구는 전무한 실정이다.

제 3 절 연구 내용 및 방법

수직 밀폐형 심부지열 시스템은 40 °C 이상의 온도를 취득할 수 있기 때문에 충분한 난방 에너지 공급이 가능하므로 지열 히트펌프를 필요로 하지 않는다. 그러므로 지열히트 펌프의 공급해야할 일 에너지를 절약하고 전기 에너지를 절감할 수 있는 효과가 있다. 또한 수직 밀폐형의 지중열교환기를 사용하므로 온도 유지가 뛰어나다. 그러나 국내에서 최근까지 심부지열 시스템의 난방 성능에 관한 연구가 미흡하기 때문에 심부지열 실증 데이터와 난방 성능을 미리 예측할 수 있는 데이터들이 부족한 실정이다.

본 논문에서는 심부지열 시스템의 난방 성능을 미리 예측하고 제어 기법에 따른 난방 성능을 분석하고자 심부지열 시뮬레이터를 설계 및 제작하였다.

시뮬레이터를 제작하여 총 세 가지의 실험을 수행하였다.

첫 번째 실험은 보어홀의 깊이에 따른 순환수의 온도를 재현하고자 히터를 통하여 1차측 수조 내부의 물을 가열하여 물의 온도에 따른 시스템의 성능 계수를 구하는 실험이다.

두 번째 실험은 1차측의 순환수를 순환시키는 수중 펌프를 가변 전압 주파수 제어(variable voltage variable frequency; VVVF)하여 수중펌프의 주파수에 따른 시스템의 성능계수를 구하였다.

세 번째 실험은 2차측 챔버내의 열원이 공급되도록 순환시키는 순환 펌프를 수조내의 온도에 따라 On-off 제어하여 시스템의 성능 계수를 구하였다. 시뮬레이터에서 사용되는 VVVF 제어 기법과 On-off 제어 기법을 나주시 산포면현장에 위치한 심부지열 시스템에도 동일하게 적용하여 실증 실험을 수행하였다. 심부지열 시스템은 전라남도 농업 기술원에 설치되었으며 면적 256 m²의 유리 온실에 난방 에너지를 공급하였다. 나주 현장의 심부지열 시스템도 시뮬레이터와 동일한 조건으로 실험을 수행하여 실증 난방 성능 데이터를 산출하였다. 또한, 시뮬레이터의 실험 데이터와 현장의 실증 데이터를 비교 분석하였다.

본 논문의 구성으로 1장에서는 연구배경, 국내 기술 동향, 연구 방법 및 내용에 대하여 기술하였고, 2장에서는 시스템의 성능을 구하기 위해 난방 성능에 대한 이론적 배경을 기술하였다. 3장에서는 실험에 사용되는 시뮬레이터를 제작하고 실험 방법을 기술하고 실험 데이터를 분석하였으며, 4장에서는 현장에 설치된 심부지열 시스템의

실증 실험 방법과 실험 데이터를 분석하고 심부지열 시뮬레이터의 실험 데이터와 현장의 심부지열 시스템의 실증 실험 데이터를 비교 분석하였다. 5장에서는 본 연구를 통하여 얻어진 결론을 설명하였고 향후 연구 방향에 대하여 제시하였다.

제 2 장 이론적 고찰

제 1 절 시스템 난방 성능

지열히트 펌프의 시스템은 냉난방 사이클을 가지고 있다. 냉방 사이클에서 지중으로 방출한 에너지의 총량은 에너지 방출량과 시스템 소비전력의 총합이고, 난방 사이클에서는 에너지 유입량과 시스템 소비 전력의 총합이 지중으로부터 유입된 에너지의 총량이다. 지중 열교환기의 열전달량(Q)은 다음과 같이 계산된다^[10].

$$Q = \dot{m} C_{p,w} \Delta T \text{ (kW)} \quad (1)$$

여기에서, \dot{m} (L/s)은 질량유량, $C_{p,w}$ 는 물의 비열, ΔT 는 열교환기의 입구와 출구의 온도차이다. 지열히트 펌프 시스템의 성능계수(COP_h)는 다음과 같이 계산된다.

$$COP_h = \frac{Q_H}{W_{hp} + W_p} \quad (2)$$

여기에서, Q_H (kW)는 시스템 난방능력이며 W_{hp} 는 히트 펌프의 소비전력(kW), W_p 는 펌프의 소비전력(kW)이다.

지열히트 펌프를 사용하는 시스템의 난방 성능과 시뮬레이터의 난방 성능을 비교하기 위하여 시뮬레이터에 난방 성능 이론을 적용시켰다. 난방 성능 이론을 시뮬레이터에 적용시켜 시스템 난방능력(Q_H)을 구하면 다음과 같이 계산된다.

$$Q_H = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) C_{p,w} (T_2 - T_4) \text{ (kW)} \quad (3)$$

여기서, T_2 는 지중부를 구현한 1차측에서 열교환기에 유입되는 온도를 의미하며

T_4 는 온실부를 구현한 2차측에서 열교환기에 유입되는 온도를 말한다. 또한, m_1 은 1차측의 열교환기에 유입되는 질량 유량이며 m_2 는 2차측의 열교환기에 유입되는 질량 유량이다.

1차측 성능계수인 COP_1 과 전체 시스템의 성능 계수인 COP_t 를 구하면 다음과 같이 계산된다.

$$COP_1 = \frac{\dot{m}_1 C_{p,w} (T_2 - T_3)}{W_{s,p}} \quad (4)$$

$$COP_t = \frac{(\dot{m}_1 + \dot{m}_2) C_{p,w} (T_2 - T_4)}{W_{s,p} + W_{c,p}} \quad (5)$$

여기에서, T_3 는 1차측의 열교환기에서 유출되는 온도이며 $W_{s,p}$ (kW)는 수중 펌프의 소비전력이고 $W_{c,p}$ (kW)는 순환 펌프의 소비전력이다. 또한, COP_1 과 COP_t 의 단위는 무차원이다.

시뮬레이터에서 시스템의 성능 계수를 구하기 위하여 사용되는 열교환기측 온도 센서의 위치는 Fig. 2-1에 나타내었다.

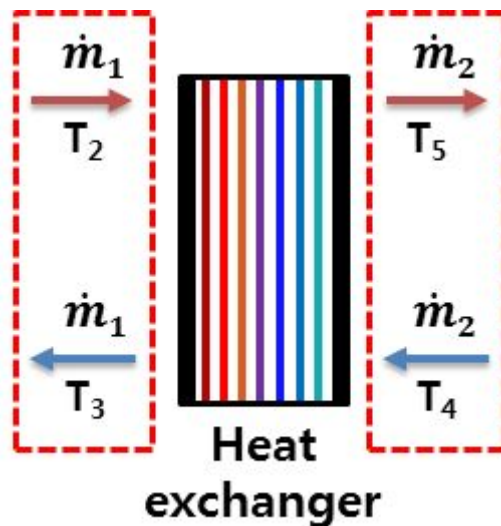


Fig. 2-1 Position of thermometer around heat exchanger for simulator

제 3 장 심부지열 시뮬레이터 시스템

제 1 절 심부지열 시뮬레이터 제작

심부지열의 난방 성능의 규모를 예측하기 위해서 심부지열 시뮬레이터를 제작하였다. 시뮬레이터에서 수중 펌프와 순환 펌프를 제어하기 위하여 필요한 모니터링 알고리즘의 블록선도는 Fig. 3-1에 나타내었다. 시뮬레이터 장치는 실시간 원격 모니터링 및 제어를 위하여 Data logger 및 Controller인 NI-cDAQ를 이용하여 하드웨어를 구성하였다. 소프트웨어는 NI-LabVIEW, 운영체제는 Windows 8에서 운용되도록 시스템을 구성하였다.

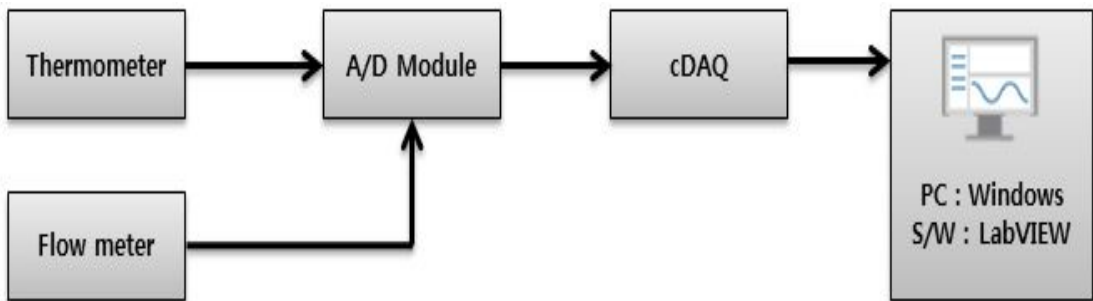


Fig. 3-1 Block diagram of monitoring system

시뮬레이터의 모니터링 및 제어 구성도는 Fig. 3-2에 나타내었다. 온도 센서, 유량계의 데이터를 모니터링하기 위해서 A/D 컨버터 모듈인 NI 장비를 사용하여 Data logger인 NI-cDAQ에 데이터를 전달하였다. 또한 소프트웨어를 통해서 온도의 범위를 조정하여 순환 펌프를 On-off 제어할 수 있도록 프로그램을 구성하였다. 시뮬레이터의 모니터링 시스템의 플로우 차트는 Fig. 3-3에 나타내었고 실험에 사용되는 시뮬레이터의 개략도는 Fig. 3-4에 나타내었다.

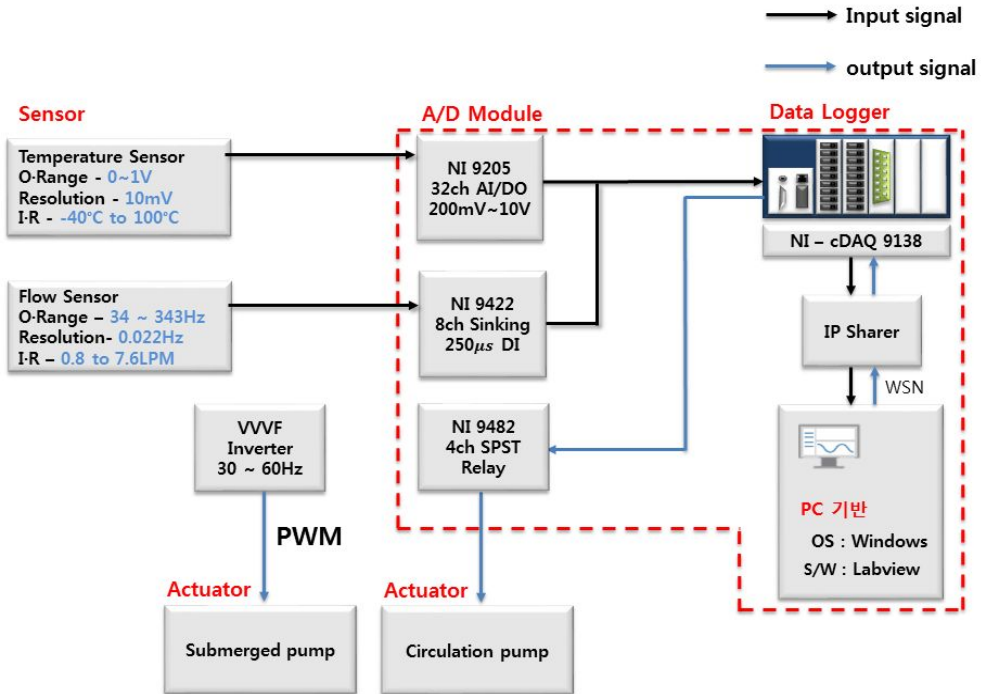


Fig. 3-2 Monitoring and control concept of simulator

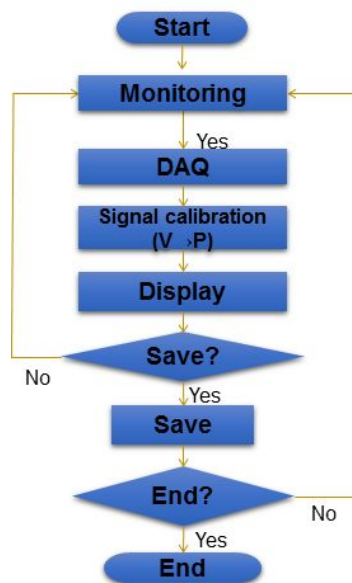


Fig. 3-3 Flow chart of monitoring system

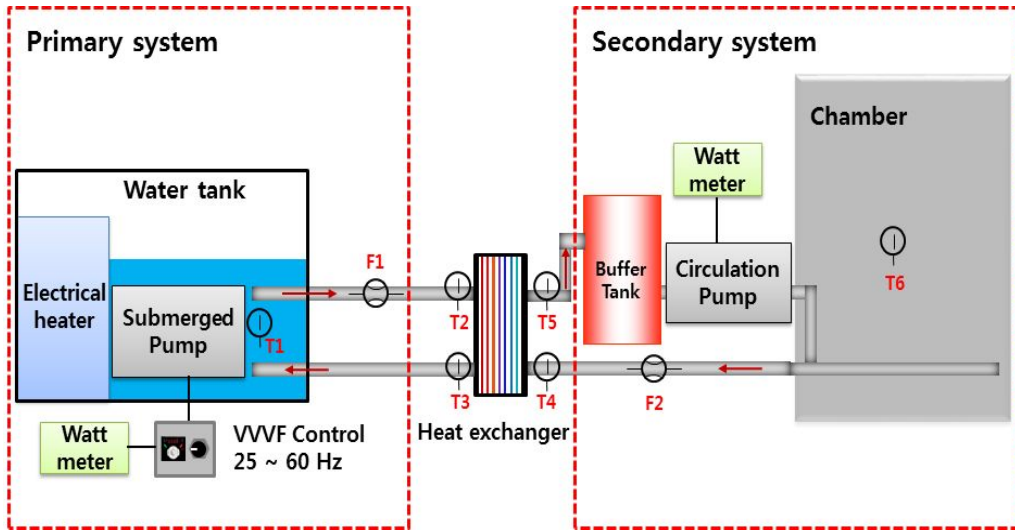


Fig. 3-4 Schematic diagram of simulator

Fig. 3-5에 나타난 바와 같이 정격 단상 220 V, 주파수 60 Hz의 수중 펌프를 제어하기 위해서 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency) Inverter를 제작하였다. 주파수를 변동시켜 수중 펌프에 PWM 방식으로 신호를 전달하여 수중 펌프를 변속 제어하였다. VVVF 인버터 내의 다이얼로 원하는 주파수 값을 세팅하게 되면 수중 펌프의 속도가 변속되어 유량 값을 제어할 수 있으며 소비 전력 또한 낮출 수 있다.

시뮬레이터에 사용된 수중 펌프는 Fig. 3-6에 나타내었고 수중펌프의 스펙은 Table 3-1에 나타내었다.

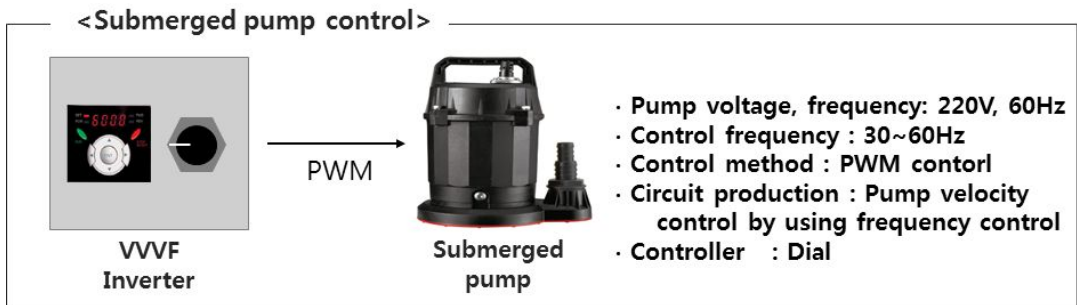


Fig. 3-5 VVVF Control of submerged pump



Fig. 3-6 Submerged pump used in the experiment(IP-210)

Table 3-1 Specification of submerged pump

Submerged pump	Specification
Power	1 Phase, 220 V
Frequency	60 Hz
Output	1/6 HP
Input	290 W
Lift	5.5 m
Maximum pump capacity	60 L/hr

시뮬레이터에 사용되는 인버터의 사진은 Fig. 3-7에 나타내었으며, 인버터의 스펙은 Table 3-2에 나타내었다.

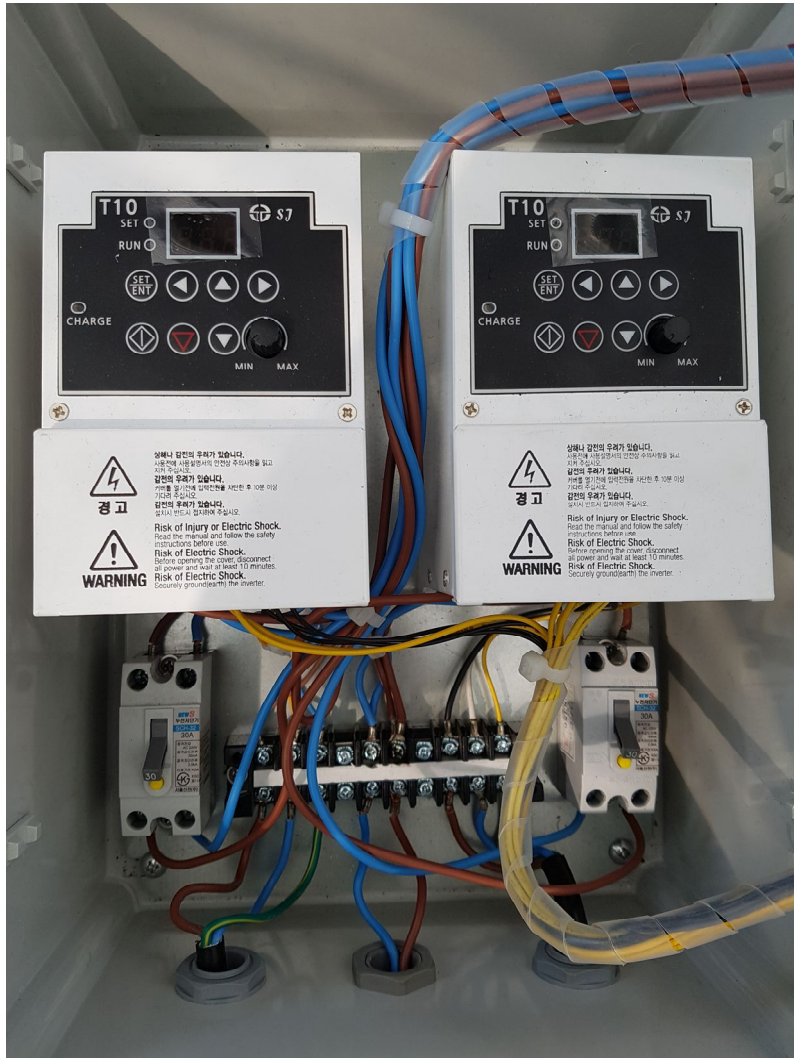


Fig. 3-7 Photograph of VVVF inverter

Table 3-2 Specification of AC variable speed drive

	Specification
Power input voltage	1 Phase, 220 V
Output voltage	24 V
Frequency setting voltage	0 ~ 10V
Inverter capacity	0.75 kW, 0 ~ 400 Hz

Fig. 3-8에 나타낸 바와 같이 단상 220 V의 순환 펌프를 SPST(Single pole single throw) 제어 방식을 통해 On-off 제어하였다. 프로그램 내에서 On-off 온도 범위를 세팅하게 되면 D/A 모듈인 NI-9482에서 Relay 신호를 전달하여 순환 펌프가 On-off 제어된다. 시뮬레이터에 사용된 순환 펌프는 Fig. 3-9에 나타내었고 순환 펌프의 스펙은 Table 3-3에 나타내었다. 또한, 펌프 제어를 위한 제어 플로우 차트는 Fig. 3-10에 나타내었다.

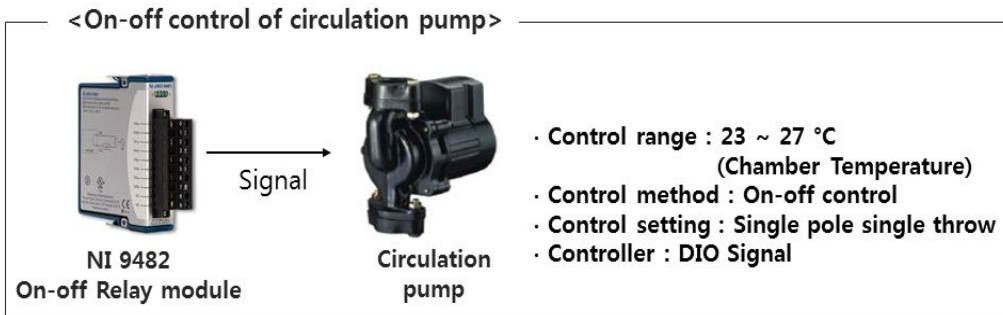


Fig. 3-8 On-off control of circulation pump



Fig. 3-9 Circulation pump used in the experiment(PB-43)

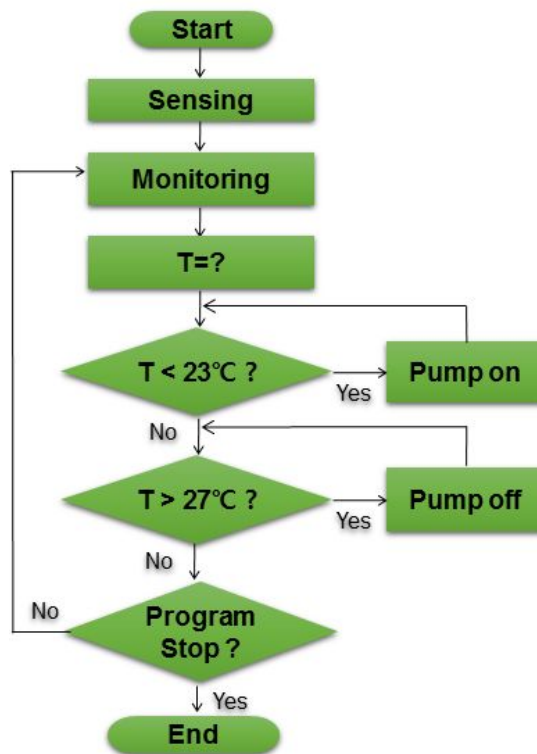


Fig. 3-10 Flow chart for On-off control of circulation pump

Table 3-3 Specification of circulation pump

Circulation pump	Specification
Power	1 Phase, 220 V
Frequency	60 Hz
Output	1/18 HP
Input	101 W
Lift	5 m
Maximum pump capacity	4,320 L/hr

지중 깊이에 따른 심층수의 온도 변화를 나타내기 위하여 순환수로 물을 사용하고 수조 내부에 히터와 수중 펌프를 설치하였다. 히터로 가열한 물을 열교환기로 순환되도록 하여 1차측인 지중부를 재현하였다. 온실을 재현한 챔버 내에는 배관을 설치하여 순환 펌프로 버퍼 탱크를 거쳐 챔버의 파이프 내에 물을 순환시키는 방식으로 2차측을 재현하였다. 시뮬레이터에 사용되는 열교환기는 약 50,000 kcal 용량의 열교환기가 사용되었다. 재질의 배관은 25A 규격의 PE-XA를 사용하였다. 수중 펌프의 가변속 제어를 위하여 인버터를 제작 및 설치하였으며 순환 펌프는 On-off 제어하기 위하여 NI-Relay 모듈을 설치하였다. COP 값 산출을 위해서 6개의 온도계와 유량계 2개, 전력계 2개를 설치하였다. 시뮬레이터의 사진은 Fig. 3-11에 나타내었다.

수중 펌프는 VVVF Inverter에 탑재된 다이얼 게이지로 주파수를 조정하여 속도를 변속시키는 제어 방식을 적용하였고 순환 펌프는 소프트웨어의 프로그래밍을 통해 온도 범위 세팅으로 Relay 신호를 받아 On-off 제어되도록 하였다. 시뮬레이터 실험 장치의 스펙은 Table 3-4에 나타내었다.

Table 3-4 Specification of simulator

Simulator	Specification
Water tank	20 L
Chamber	100 L
Buffer tank	15 L
Heat exchanger	50,000 kcal
Thermometer	AO, Thermistor Range : -40 ℃ ~ +100 ℃
Flow meter	DO, Pulse output Range : 0.5 ~ 7.5LPM
Controller	AI, AO, DI, DO
Inveter	220 V, Range : 0 ~ 60 Hz
Watt meter	230V, 60 Hz, Range : 0 ~ 16 A

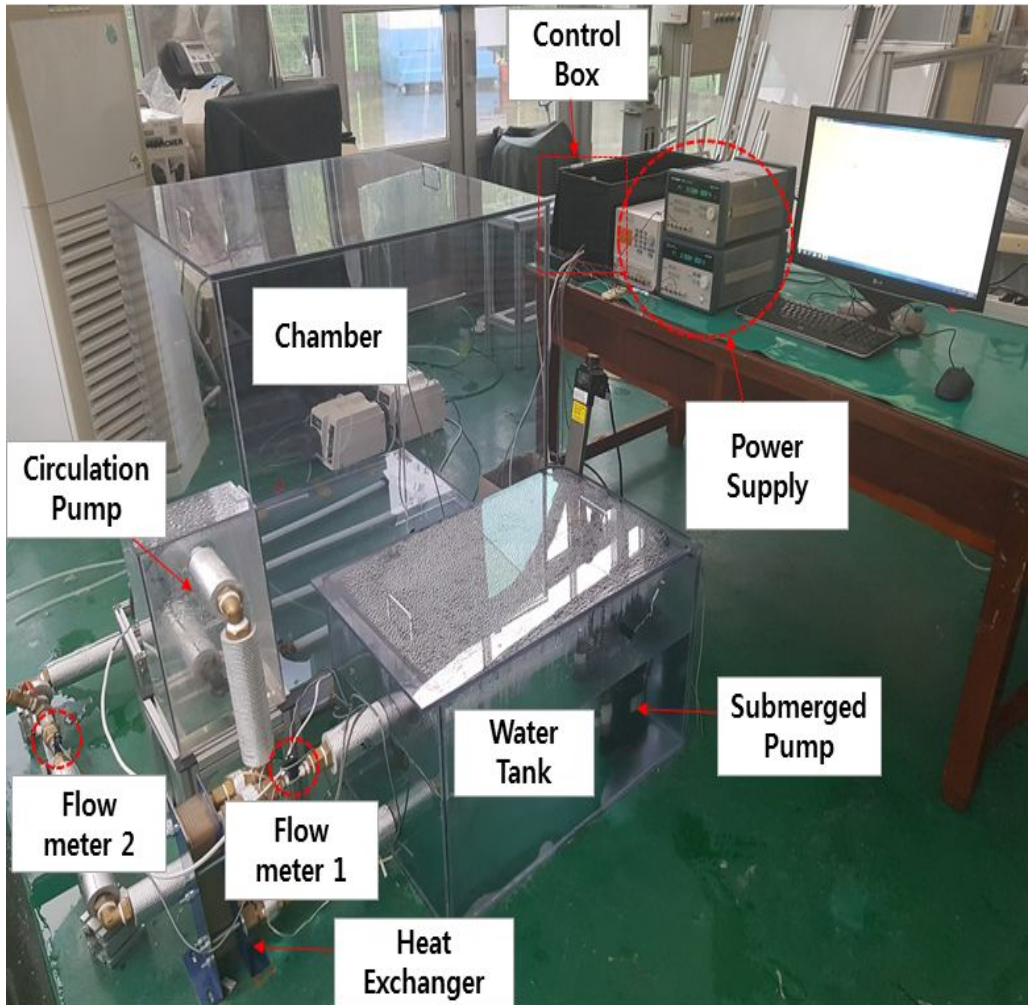


Fig. 3-11 Photograph of simulator

제 2 절 심부지열 순환 시뮬레이터 실험

1. 시뮬레이터의 성능 계수 실험 조건

일반적으로 심부지열 시스템에서 물의 온도는 심도 1,250 m ~ 2,250 m 일 때 40 ~ 60 °C까지 취득 온도가 증가한다^[17]. 지중 깊이에 따라 전체 시스템의 성능 계수에 미치는 영향을 시뮬레이터로 실험을 수행하기 위하여 수조 내 히터로 수조 내의 온도 (T_1)를 40 ~ 60 °C 내에서 약 10 °C 간격으로 증가시켜 온도 변화에 따른 시스템 성능 계수 실험을 수행하였다. 1차측 수중 펌프를 가변속시키면 유량 값과 소비 전력이 변동되므로 1차측 성능 계수와 전체 시스템의 성능 계수가 변하게 된다. 따라서, 주파수 변속에 따른 성능 계수의 변동을 파악하기 위하여 정격 60 Hz의 수중 펌프를 가변속 제어하여 주파수 30 ~ 60 Hz 범위 내에서 10 Hz의 간격으로 수중 펌프의 주파수 변화에 따른 시스템 성능 계수를 구하였다. 또한, 2차측 순환 펌프를 on-off 제어하면 소비 전력 값이 변화하여 시스템 성능 계수에 영향을 미치게 된다. 수조 내 수온 조건을 약 43 ~ 58 °C로, 챔버 내의 온도 조건 23 ~ 27 °C로 설정하여 실험을 통해 순환 펌프의 On-off 제어에 따른 시스템의 성능 계수를 구하였다. 모니터링 시스템의 프론트 패널은 Fig. 3-12에 나타내었다.

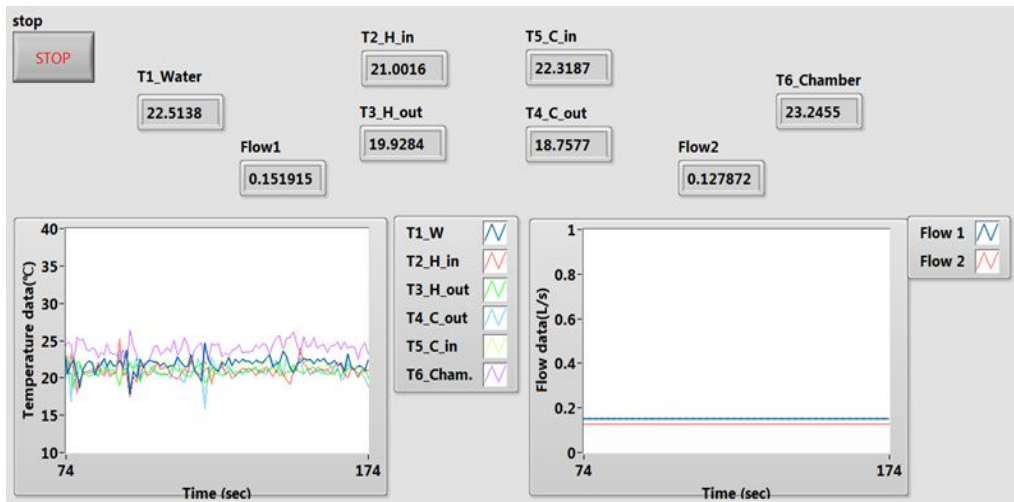


Fig. 3-12 Front panel of monitoring system

2. 실험 결과 분석

가. 수조 내 수온 변화에 따른 시스템의 성능 계수

정격 60 Hz의 수중펌프를 정격 가동하고 수조 내부 물의 설정 온도(T_1) 조건을 41, 51, 55 °C로 설정하고 총 세 구간에 대하여 실험을 수행하였다. 수중 펌프와 순환 펌프는 실험당 총 3시간을 가동하여 챔버에 난방 에너지를 공급하였다. 수중 펌프와 순환 펌프를 정격 가동했을 때, 정격 소비 전력은 각각 0.18 kW, 0.07 kW를 기록하였다. 유량은 평균적으로 1차측에서 0.154 L/s, 2차측에서 0.110 L/s를 기록하였다.

수조 내 수온에 따른 취득 열량은 Fig. 3-16에 나타내었고, 수조 내 수온 변화에 따른 COP 변동 곡선은 Fig. 3-17에 나타내었다. 수조 내 수온 변화 실험에 대한 결과는 Table 3-5에 나타내었다.

Fig. 3-16에 나타낸 바와 같이 수조 내 물의 온도(T_1)가 상승하면 취득 열량 값도 상승하였으며 식(3)으로부터 취득 열량 값을 구하면 T_1 이 55 °C일 때, 최대값인 5.08 kW를 기록하였다.

또한, Fig. 3-17에 나타낸 바와 같이 수조 내 물의 온도가 상승함에 따라 COP_1 과 COP_1 의 값이 증가하였다. T_1 이 55 °C일 때는 COP_1 의 값은 20.67로 최대값을 기록하였다.

Fig. 3-17와 같이 1차측 성능 계수인 COP_1 은 전체 시스템의 성능계수인 COP_1 의 값보다 전체적으로 낮다는 것을 확인할 수 있었다. 1차측 성능 계수인 COP_1 은 식(4)에 따르면 T_2-T_3 의 값에 의하여 결정되고 전체 시스템 성능 계수인 COP_1 은 식(5)에 나타낸 바와 같이 T_2-T_4 의 값에 의하여 결정된다. T_4 의 값은 챔버 내에 열을 방출하기 때문에 초기 T_3 의 온도보다 낮아지게 된다. 그러므로 식(4)의 T_2-T_4 의 값이 T_2-T_3 의 값보다 커지기 때문에 COP_1 값이 COP_1 보다 전체적으로 커지게 된다는 것을 알 수 있다.

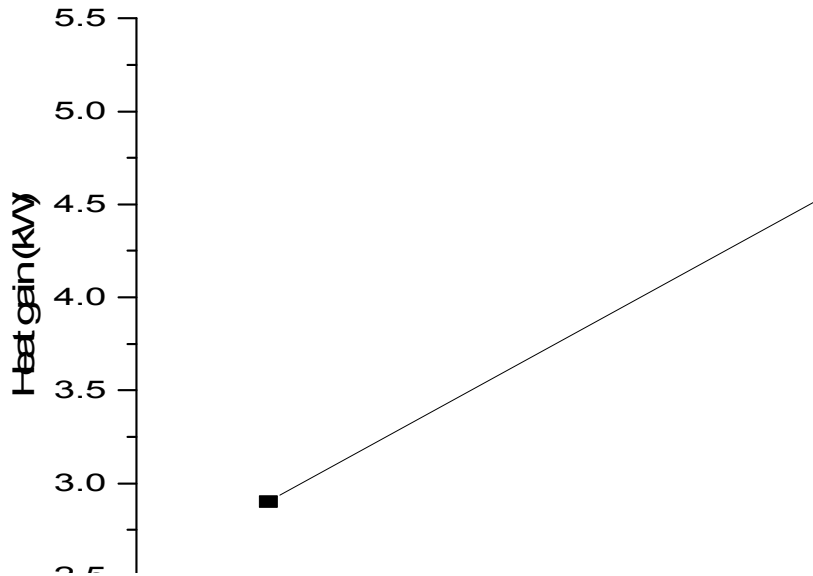


Fig. 3-16 Heat gain according to temperature of water in water tank

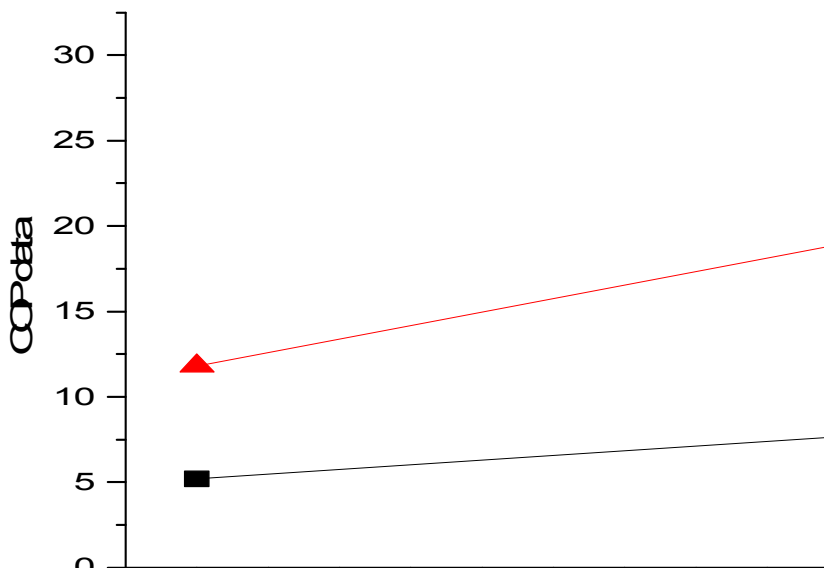


Fig. 3-17 COP data according to temperature of water in water tank

Table 3-5 Results of temperature variation experiment in water tank

Temperature of water (T_1)	Heat gain (kW)	COP_1	COP_t
41 °C	2.9 kW	5.2	11.8
51 °C	4.85 kW	7.95	19.72
55 °C	5.08 kW	8.49	20.67

일반적으로 지열 히트 펌프를 사용하는 시스템은 난방 성능의 계수가 대략 2.5 ~ 3.8에 불과하다^[18]. 그러나 지열 히트 펌프를 필요로 하지 않는 심부 지열 시스템은 Table 3-5와 같이 시스템의 성능 계수가 11.8에서 20.67을 기록하였으므로 히트 펌프를 이용하는 천부 지열 시스템보다 시스템 성능의 계수가 값이 훨씬 높게 나온다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 수조 내 수온 변화에 따른 시스템 성능 계수를 구하는 실험을 통해 히트 펌프를 필요로 하지 않는 심부지열 시스템이 천부지열 히트펌프 시스템보다 훨씬 성능이 좋다는 것을 알 수 있다.

나. 수중 펌프의 주파수 변화에 따른 시스템의 성능 계수

수조 내의 물의 온도를 42 °C로 고정하고 정격 주파수가 60 Hz인 수중 펌프를 변속 제어하여 실험을 수행하였다. 수중 펌프의 주파수는 인버터를 이용하여 30 ~ 60 Hz 범위에서 10 Hz의 간격으로 변화시켜 변속 제어하였다. 수중 펌프와 순환 펌프는 각 실험 조건에서 3시간 가동하였다. 수중 펌프의 주파수 변화에 따른 1차측의 유량 변동 곡선을 Fig. 3-18에 나타내었고 수중 펌프의 주파수 변화에 따른 COP 변동 곡선은 Fig. 3-19에 나타내었다. 수중 펌프의 주파수 변속 실험에 대한 결과는 Table 3-6에 나타내었다.

수중 펌프를 정격 60 Hz로 운전할 경우에는 평균 유량값은 0.154 L/s를 기록하였고 소비 전력은 0.18 kW를 기록하였다.

정격 60 Hz의 수중 펌프를 50 Hz로 변속하여 가동했을 때는 열교환기에 유입되는 유량이 0.128 L/s로 감소하였으며 수중 펌프의 소비 전력은 0.096 kW로 절반이 감소하였다. 수중 펌프의 소비 전력이 감소하였으므로 COP의 값들은 급격하게 증가하였다. 또한, 수중 펌프를 40 Hz로 가동했을 때는 평균 유량이 0.100 L/s로 감소하고 소비 전력은 0.08 kW를 기록하였다. 이때, 시스템의 난방 성능 계수인 COP_t의 값은 28.95로 최대치를 기록하였다. 그러나 수중 펌프를 30 Hz로 운전하였을 경우에는 COP의 값들이 수중 펌프를 40 Hz로 운전하였을 때보다 감소하였다.

이는 유량이 감소함에 따라 온도 차이가 증가하여야하나 열교환기의 성능으로 인해 수중 펌프를 40 Hz로 운전하였을 때보다 온도 차이가 나지 않고 유량 값만 감소하였기 때문에 COP의 값들이 감소한 것으로 보인다.

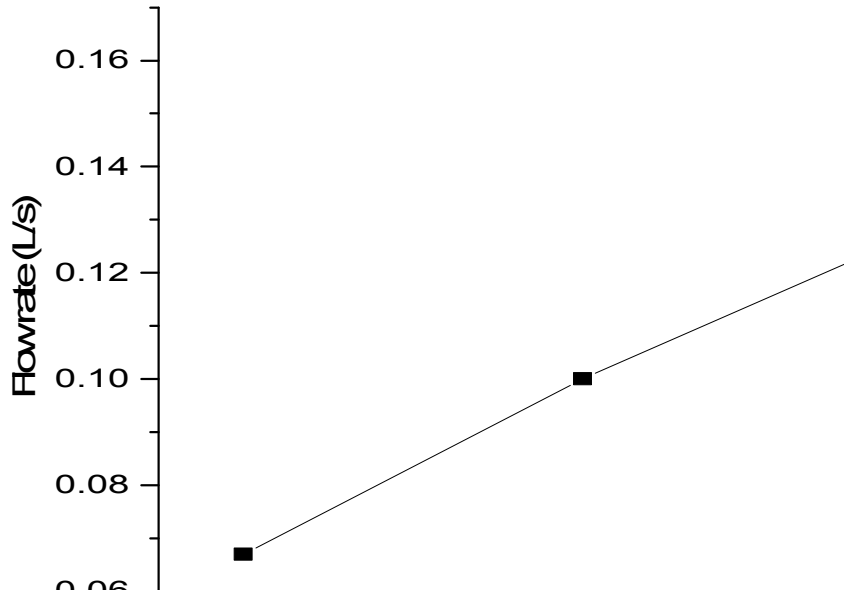


Fig. 3-18 Flow rate according to frequency variation for submerged pump

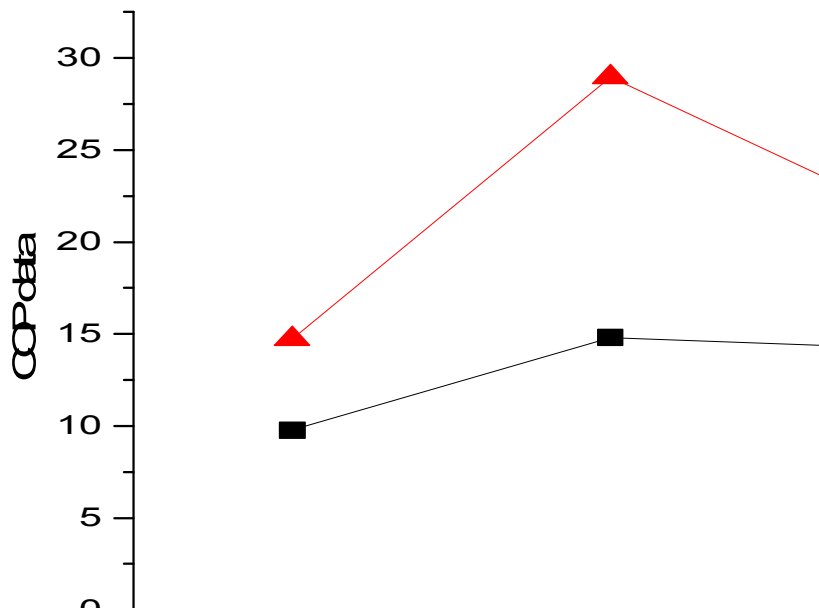


Fig. 3-19 COP data according to frequency variation of submerged pump

Table 3-6 Results of frequency variation experiment for submerged pump

Frequency of submerged pump	Flow rate (L/s)	COP ₁	COP _t
60 Hz	0.154 L/s	5.38	11.73
50 Hz	0.128 L/s	14.17	20.89
40 Hz	0.100 L/s	14.81	28.95
30 Hz	0.067 L/s	9.78	14.72

다. 순환 펌프 On-off 제어에 따른 시스템의 성능 계수

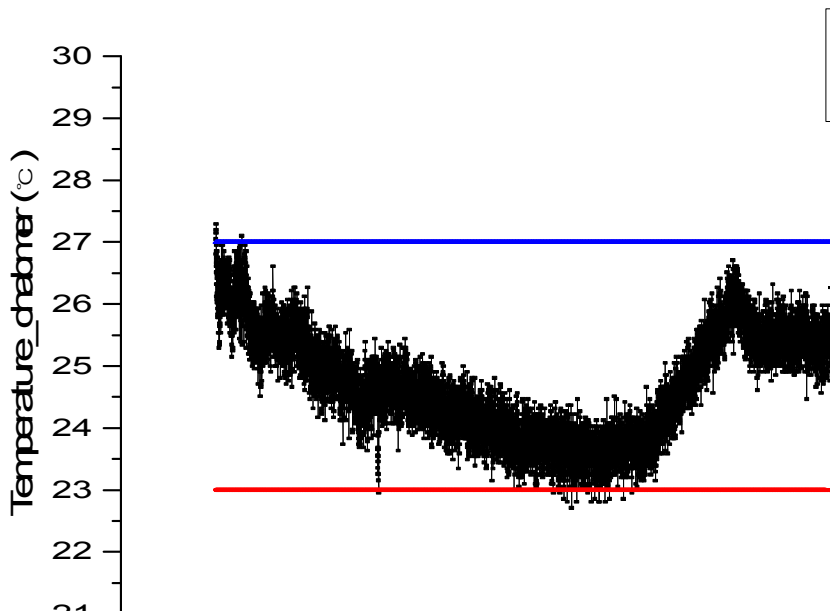
수중 펌프를 주파수를 60 Hz로 정격으로 가동하고 순환 펌프는 기준온도(Set point) 25 °C, Dead band 2 °C로 설정하여 On-off 제어하였다. 수조 내 물의 온도는 42, 51, 55 °C의 온도 조건으로 설정하고 실험을 수행하였다. 수중 펌프와 순환 펌프는 총 6시간을 가동하고 데이터는 관내 질량 유량이 일정하게 유지되는 1시간 후부터 취득하였다.

수중 펌프는 정격으로 가동하고 순환 펌프를 On-off 제어했을 때 각 온도 조건에 따른 챔버 내의 온도와 유량 값을 Fig. 3-20부터 Fig. 3-22까지 나타내었고 순환 펌프 On-off 가동 실험의 결과는 Table 3-7에 나타내었다.

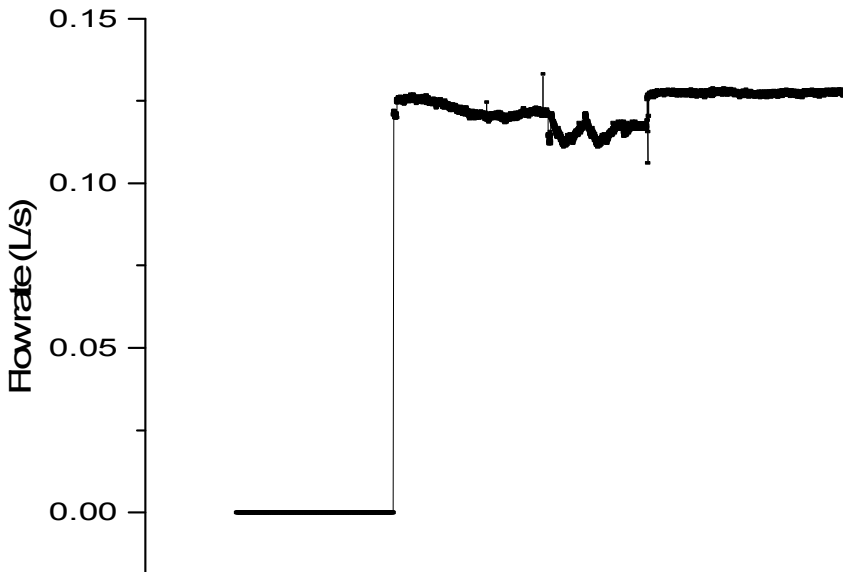
Fig. 3-20에 나타낸 바와 같이 수조 내 물의 온도를 42 °C로 설정하였을 때 챔버 내 온도는 27 °C이상 올라가지 않았고 순환 펌프는 1시간 이후 On-off되지 않고 계속 가동되었다.

수조 내 온도가 51 °C일 때는, Fig. 3-21에 나타낸 바와 같이 순환 펌프가 2번 On-off 되었고 평균 온도는 25 °C 이상을 유지하였다. 즉, 수조 내 온도 값이 상승하면 순환 펌프의 On-off되는 횟수가 증가하고 소비 전력 값이 감소하였다.

Fig. 3-22에서 보는 바와 같이 수조 내 온도가 55 °C일 때는 순환 펌프가 3번 On-off 되었으며 소비 전력은 0.006 kW를 기록하였다. 이때, COP₁의 값은 27.32로 최고치를 기록하였다.

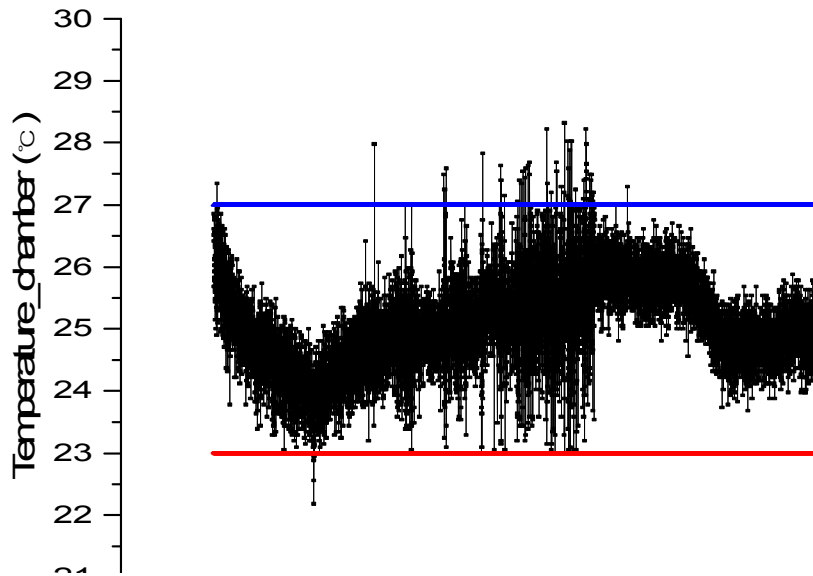


(a) Temperature of chamber

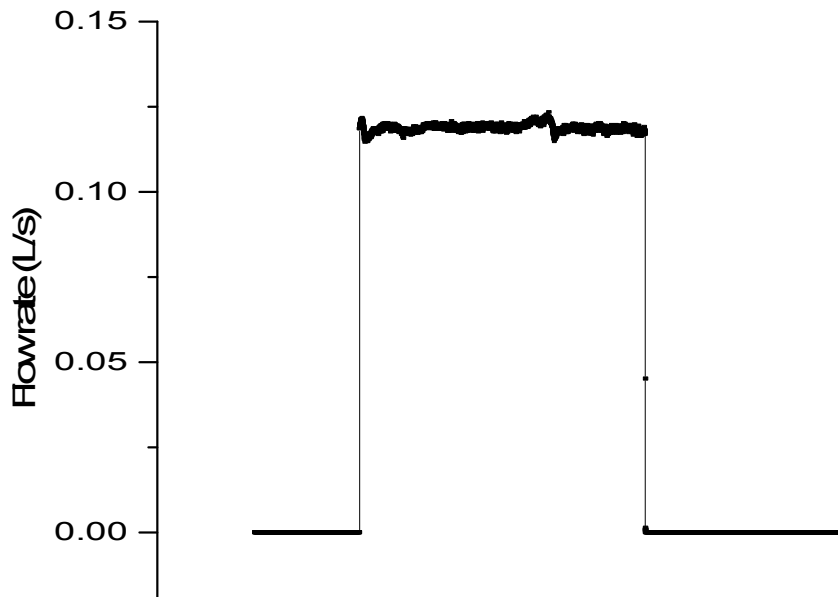


(b) Flow rate

Fig. 3-20 Temperature and flow rate for circulation pump with on-off controller at $T_1=42$ °C

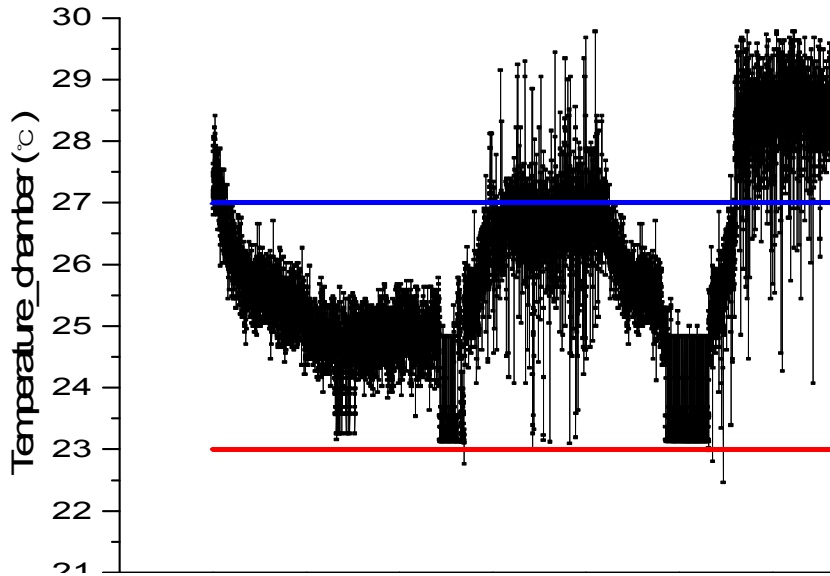


(a) Temperature of chamber

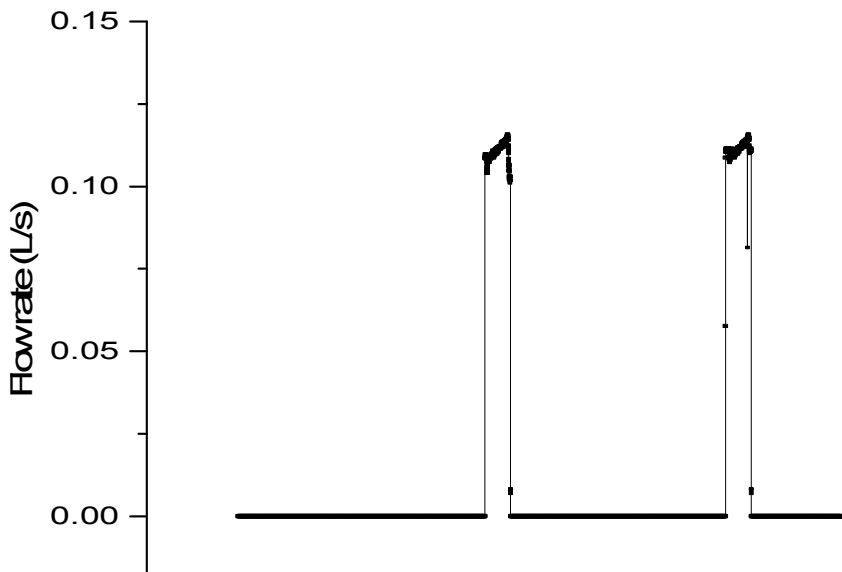


(b) Flow rate

Fig. 3-21 Temperature and flow rate for circulation pump with on-off controller at $T_1=51\text{ }^\circ\text{C}$



(a) Temperature of chamber



(b) Flow rate

Fig. 3-22 Temperature and flow rate for circulation pump with on-off controller at $T_1=55\text{ }^\circ\text{C}$

수조 내 물의 온도의 각 온도 조건에서 COP의 값을 구하기 위한 순환 펌프의 소비 전력은 Fig. 3-23에 나타내었고 COP의 값들은 Fig. 3-24에 나타내었다.

Fig. 3-23에 나타낸 바와 같이 순환 펌프의 소비전력이 수조 내 수온이 증가함에 따라서 감소하였음을 알 수 있다. 또한, 점차 수조 내 물의 온도가 상승함에 따라 순환 펌프의 작동 시간이 짧아져 소비 전력이 감소되므로 Fig. 3-24와 같이 전체 시스템의 성능 계수인 COP_t가 증가하였다.

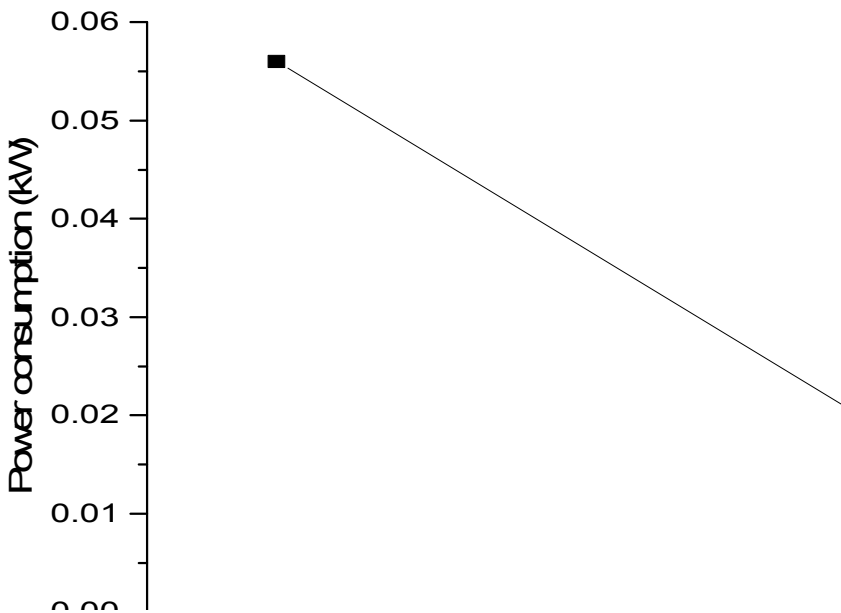


Fig. 3-23 Power consumption of circulation pump with on-off controller according to temperature of water in water tank

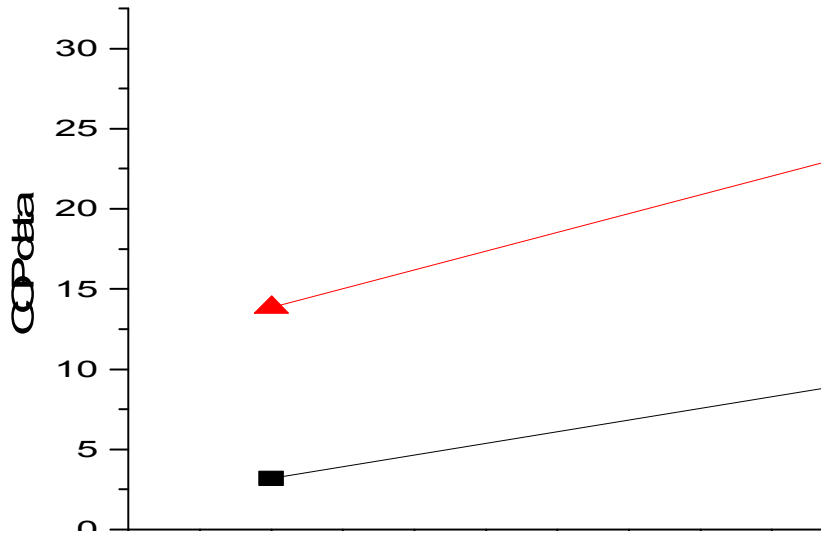


Fig. 3-24 COP data according to temperature of water in water tank with on-off controller

순환 펌프 On-off 제어 실험 결과는 Table 3-7에 정리하였고 제어 기법을 사용하지 않고 정격으로 시뮬레이터를 가동했을 때와 순환 펌프를 On-off 제어하여 시뮬레이터를 가동했을 때의 시스템 성능계수를 비교하여 Table 3-8에 나타내었다.

Table 3-7과 같이 수온이 높아짐에 따라 시스템 성능의 계수의 차이가 커졌다. 또한, 순환 펌프를 On-off 제어했을 때 제어를 하지 않은 경우보다 시스템 성능의 계수는 더 높게 나타났다. 수조 내 물의 온도를 55 °C로 설정하고 순환 펌프를 On-off 제어했을 때 전체 시스템의 성능 계수는 27.32로 최대치를 기록하였다.

Table 3-7 Results of on-off control experiment for circulation pump

Temperature of water(T_1)	Power consumption (kW)	COP_1	COP_t
42 °C	0.056 kW	3.19	13.87
51 °C	0.02 kW	9.75	24.41
55 °C	0.006 kW	14.73	27.32

Table 3-8 Comparison of COP_t values

Operating condition	COP_t values of total system		
	42 °C	51 °C	55 °C
Setting temperature T_1 (°C)			
Without control	11.8	16.7	20.67
On-off control	13.87	24.41	27.32

제 4 장 심부지열 현장 실증 실험

제 1 절 심부지열 현장 시스템

심부지열 시스템은 전라남도 농업 기술원의 부지에 설치되었으며 시추공은 단일 공으로 2,002 m의 깊이까지 시추되었다. 현장에 설치된 심부지열의 전체 시스템의 개략도는 Fig. 4-1에 나타내었다.

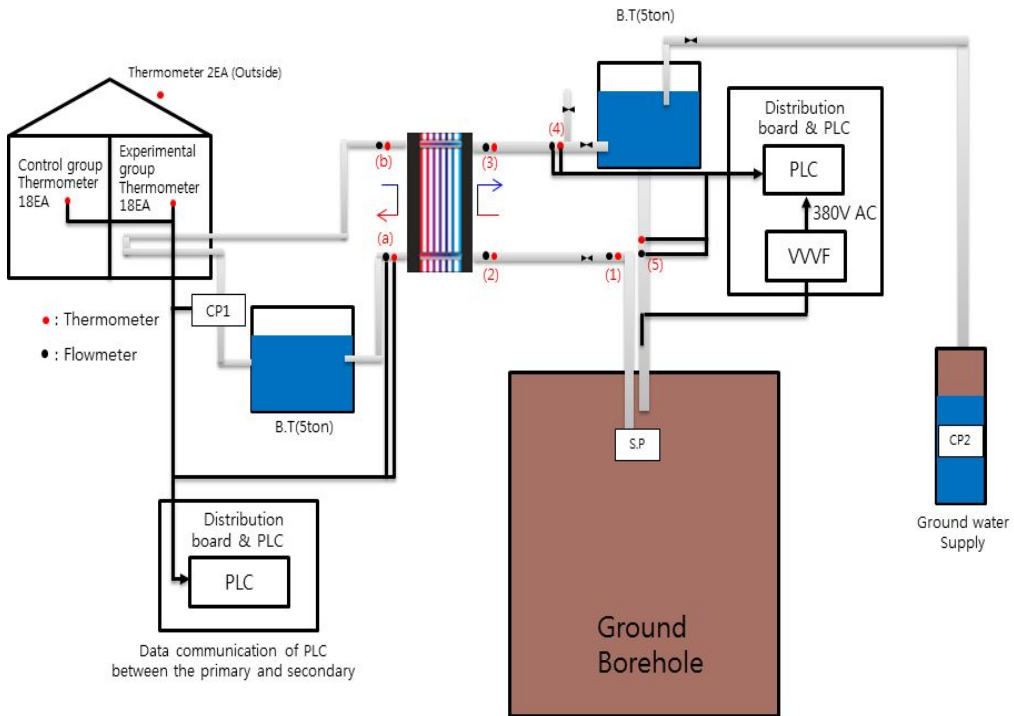


Fig. 4-1 Schematic diagram of overall deep geothermal system

난방 에너지를 공급한 유리 온실의 면적은 256 m²이며 지중 열교환기는 Co-axial 타입의 이중 구조로 적용되었다. 열교환기는 평판형 70,000 kcal/hr 용량의 열교환기가 사용되었다.

시스템의 구성으로는 PLC 판넬을 각각 시추공부에 1개, 유리 온실부에 1개가 설치되었고 유리 온실측 컨테이너 내부에 Data logger를 장착하였다. 지중부에는 수중 펌프의 변속 제어를 위해 인버터 제어반이 설치되었다.

온도 센싱 장비로는 Fig. 4-1에 나타낸 바와 같이 시험 온실 내부에 18개, 대조 실험 온실에 18개, 온실 외부의 2개, 열교환기 4개, 시추공부 3개, 총 45개가 설치되었다. 유량 센서는 시추공부 3개, 열교환기 2개, 총 5개가 설치되었다. 유리 온실에 순환수를 공급하는 순환 펌프는 0.75 kW(1 hp) 용량의 순환 펌프가 사용되었다. 현장 실험을 위해 온실 측 컨테이너 내부에 설치된 Data logger의 사진은 Fig. 4-2에 나타내었고 실험 장비의 규격과 용도는 Table 4-1에 나타내었다.



Fig. 4-2 Photograph of data logger in container

Table 4-1 Specifications of experimental equipment

Experiment equipment	Specifications	Use
Green house	256 m ²	Consumption of heat gain
Buffer tank	5 m ² × 2 EA	Water storage
Submerged pump	3 Phase, 380 V, 7.5 kW	Speed control
Flow meter	Diameter 50mm	Measurement of flow rate
Thermometer	Piping	Measurement of temperature
PLC	AI, DI, AO, DO	Data logging
Watt meter	3 Phase, 380 V	Measurement of consumption power

제 2 절 실증 데이터 결과 분석

1. 실험 방법 및 순서

현장 실험은 시추 단일공 2,002 m에서 취득 물의 온도와 열량이 온실에 얼마나 공급되는지를 추정하고, 난방 성능이 어떻게 나타나는지 알아보기 위해 진행하였다. 또한, 시뮬레이터의 실험과 동일하게 수중 펌프와 순환 펌프를 제어했을 경우에 전체 시스템 성능의 변동을 추정하기 위해 실험을 진행하였다. 시뮬레이터의 실험과 동일하게 3가지 실험을 진행하였다.

첫 번째로 수중 펌프와 순환 펌프를 정격으로 가동하여 장기간 운전하였을 때 시스템의 성능 계수의 나타나는 변동을 분석하였다. 이는 심부지열의 장기간 이용에 따른 시스템의 성능과 열량을 알아보기 위한 실험으로 열교환기측 온도 센서, 유량 센서의 데이터를 저장하여 온실에서 사용되는 열량과 시스템 성능을 산출하였다. 장기간 운전은 약 37일 동안 가동하였다.

두 번째로는 수중 펌프를 변속 제어하여 운전하였다. 지중 내부에 들어가 있는 수중 펌프를 VVVF 인버터로 주파수를 제어하여 변화되는 펌프의 소비 전력과 유량 데이터를 측정하여 수중 펌프의 주파수에 따른 전체 시스템 성능을 선출하였다. 인버터에 의해 가변된 입력 주파수는 Fig. 4-3에 나타내었다.

세 번째 실험은 순환 펌프를 On-off 제어하여 운전하였을 때 전체 시스템 성능 계수의 변동을 조사하였다. 온실 내부에 설치되어 있는 온도 센서 No. 7 온도 센서의 데이터에 따라 순환 펌프가 On-off 제어되도록 구성하였다. 순환 펌프의 On-off 제어의 Set point는 28 ~ 30 °C의 범위로 설정하였다. 순환 펌프의 On-off 구동 조건에 대한 그림은 Fig. 4-4에 나타내었다. 현장에 설치된 실험실의 사진은 Fig. 4-5에 나타내었다.



Fig. 4-3 Input frequency variation by inverter

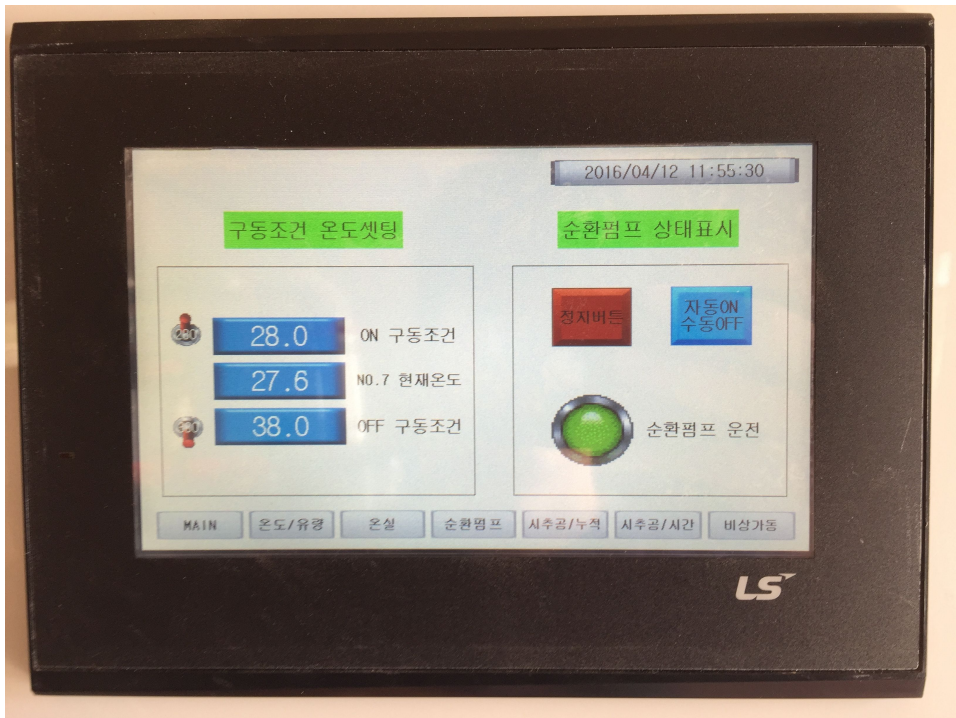


Fig. 4-4 On-off control operating condition of circulation pump



Fig. 4-5 Deep-geothermal system equipment of naju-site

현장 실험에서 COP 값들을 산출하기 위한 공식은 식(2)에 따라서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$COP_1 = \frac{\dot{m}_1 C_{p,w} (T_2 - T_3)}{W_{s,p}} \quad (6)$$

$$COP_t = \frac{(\dot{m}_1 + \dot{m}_2) C_{p,w} (T_2 - T_7)}{W_{s,p} + W_{c,p}} \quad (7)$$

또한, 온실에서 소비되는 취득 열량 값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{Heat gain} = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) C_p (T_2 - T_7) \quad (8)$$

시스템의 성능 계수를 구하기 위하여 사용되는 열교환기측 온도 센서의 위치는 Fig. 4-6에 나타내었다. 여기에서, 온도차는 $T_2 - T_7$ 이다.

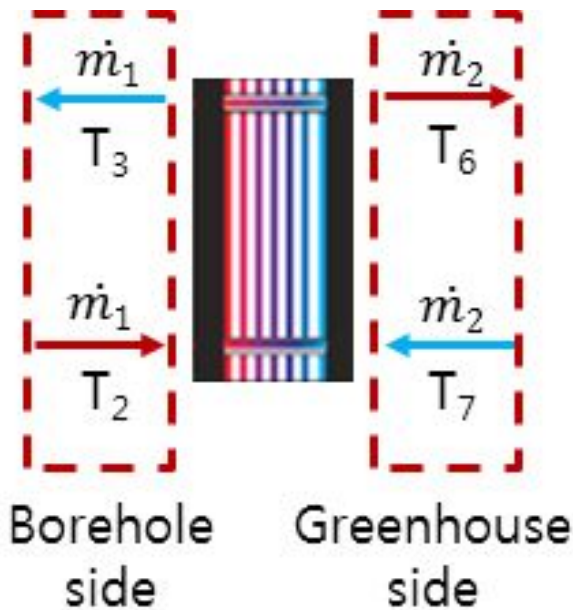


Fig. 4-6 Position of thermometer around heat exchanger

2. 실증 실험 결과 분석

가. 장기 운전 일자별 시스템 난방 성능 실험

2월 23일부터 3월 31일까지 수중 펌프와 순환 펌프를 제어하지 않고 정격 가동하여 일자별로 시스템의 난방 성능 분석을 산출하였다. 시스템 난방 성능을 구하기 위하여 필요한 온도차 값은 Fig. 4-7에 나타내었고 일자별 외기 온도는 Fig. 4-8에 나타내었다.

Fig. 4-7에 나타낸 바와 같이 온도차는 약 2 °C에서 4 °C 가량 나타났다. 외기 온도는 Fig. 4-8과 같이 최저 온도 -2 °C에서 최고 온도 15 °C까지 기록되었다. 온실에서 소비되는 취득 열량은 Fig. 4-9에 나타내었고 일자별 시스템 난방 계수는 Fig. 4-10에 나타내었다.

Fig. 4-7과 Fig. 4-8과 같이 온실 외부의 외기 온도에 따라서 전체 시스템의 온도차 값이 변하였고 그에 따라 COP의 값도 변화하였다. 전체 시스템의 취득 열량은 Fig. 4-8과 같이 44,000 ~ 90,000 kcal/hr를 기록하였고 전체 시스템 성능 계수의 값은 Fig. 4-9와 같이 7 ~ 12.5 정도를 유지하였다.

Fig. 3-11에 나타낸 시뮬레이터의 실험 데이터와 심부지열 현장 실험의 데이터를 비교해볼 때 심부지열의 난방 성능이 천부지열에 비해 높다는 것을 예측한 결과와 동일하게 심부지열 현장 실험 또한 전체 시스템 성능 계수가 7 ~ 12.5 정도를 유지하고 있기 때문에 천부지열 보다 성능이 좋다는 것을 확인할 수 있었다.

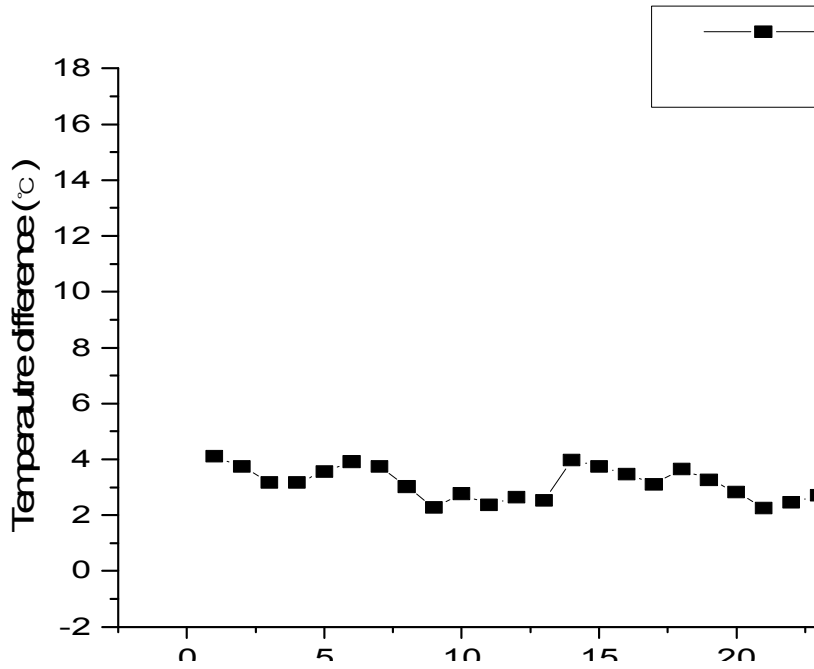


Fig. 4-7 Temperature difference of overall system according to time

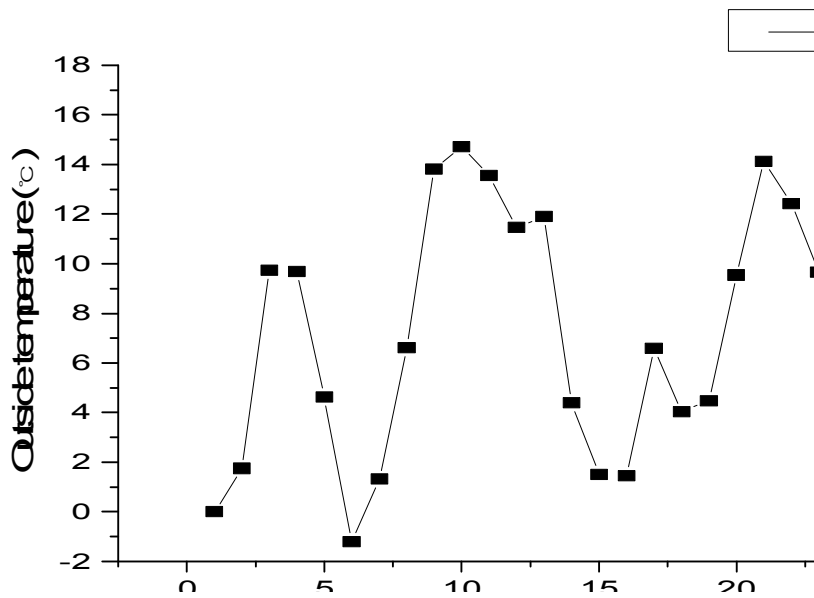


Fig. 4-8 Outside temperature of green house according to time

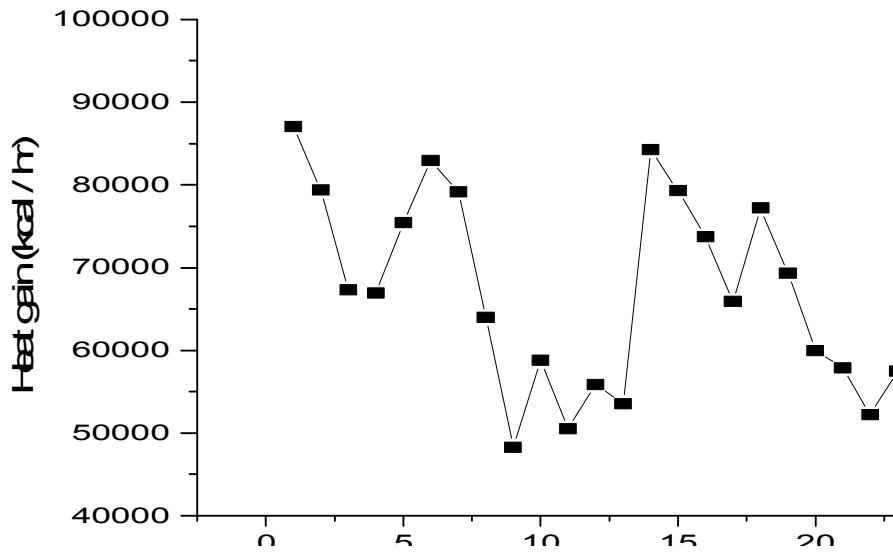


Fig. 4-9 Heat gain of overall system according to time

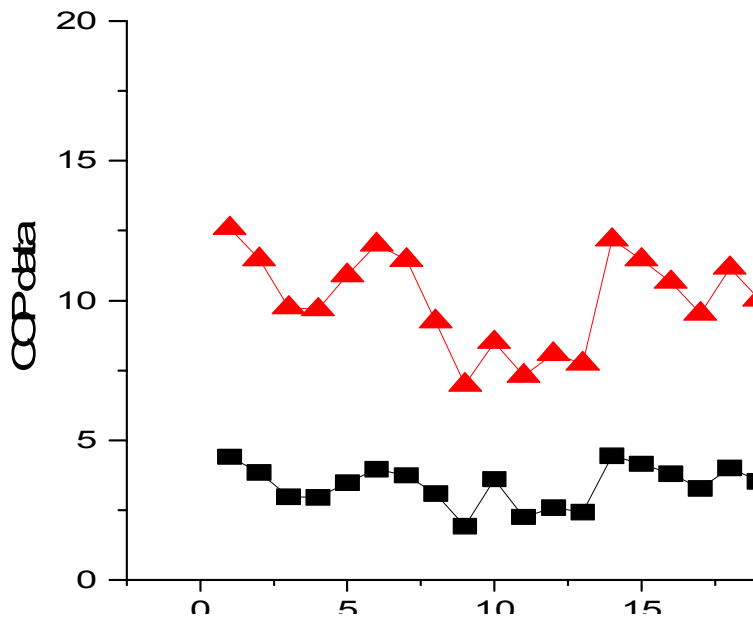


Fig. 4-10 COP data according to time

나. 수중 펌프의 변속 운전 시스템 난방 성능 실험

수중 펌프의 변속 운전 시스템의 난방 성능을 분석하기 위하여 주파수 45 ~ 60 Hz의 범위로 설정하여 실험을 수행하였고 실험 데이터는 온실의 외기 온도 9.6 °C를 기준으로 정리하였다.

수중 펌프의 주파수에 따른 소비 전력은 Fig. 4-11에 나타내었고, 수중 펌프의 주파수에 따른 1차측 질량 유량 값은 Fig. 4-12에 나타내었다. 또한, 수중 펌프의 주파수에 따른 COP 값들은 Fig. 4-13에 나타내었다.

Fig. 4-11과 Fig. 4-12에 나타난 바와 같이 수중 펌프의 주파수가 감소함에 따라 소비전력과 1차측 질량 유량 값이 감소하였다. 또한, 수중 펌프의 주파수를 45 Hz로 가동하였을 때 Fig. 4-13과 같이 COP_t의 값은 18.78로 최대치를 기록하였다.

Fig. 3-13에 나타난 시뮬레이터의 실험 결과와 현장 실험의 데이터를 비교하였을 때 현장 실험의 데이터 또한 수중 펌프의 가변 주파수가 40 ~ 45 Hz의 범위에서 가동하였을 때 최대값을 기록하였다. 따라서 심부지열 시스템에서 지중 순환수를 순환시키는 수중 펌프를 VVVF 제어하면 제어기법을 사용하지 않고 정격으로 가동하는 경우보다 난방 성능 값을 향상시킬 수 있기 때문에 효율을 매우 높일 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

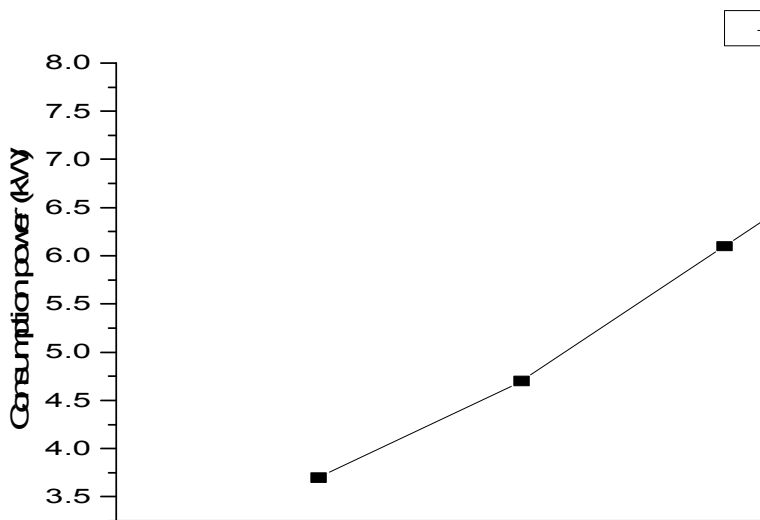


Fig. 4-11 Consumption power according to frequency variation of

submerged pump

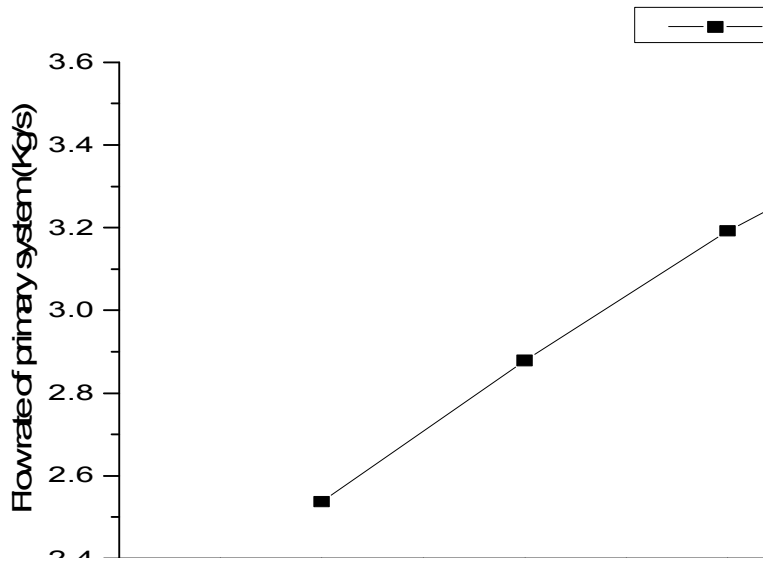


Fig. 4-12 Flow rate of primary system according to frequency variation of submerged pump

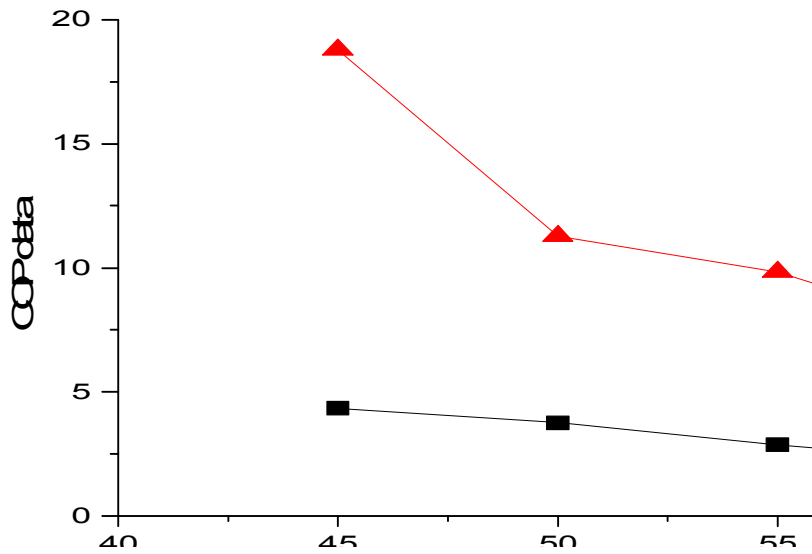


Fig. 4-13 COP data according to frequency variation of submerged pump

다. 순환 펌프 On-off 제어 운전 시스템 난방 성능 실험

순환 펌프를 On-off 제어하여 가동했을 때 나타나는 시스템의 난방 성능을 분석하기 위해 3월 31일부터 4월 6일까지 순환 펌프를 On-off 제어하여 실험을 수행하였다. 시스템의 난방 성능을 분석하기 위하여 온도차는 Fig. 4-14에 나타내었고 외기 온도는 Fig. 4-15에 나타내었다. 이때, 산출되는 취득 열량은 Fig. 4-16에 나타내었고 COP 값들은 Fig. 4-17에 나타내었다.

Fig. 4-14과 Fig. 4-15에 나타낸 바와 같이 외기 온도가 12 °C 이상일 때 온도차 2.2 °C ~ 2.8 °C를 기록하였다. 6일 동안의 평균 취득 열량은 Fig. 4-16와 같이 44,000 ~ 90,000 kcal/hr였고 전체 시스템 성능 계수는 Fig. 4-17과 같이 7 ~ 8.5 정도를 기록하였다. 외기 온도가 17 °C, 온도차가 2.1 °C일 경우에는 시스템 성능 계수인 COP_t의 값이 최소값 6.2를 기록하였다. 천부지열 시스템의 난방 성능 계수 값의 최대값은 최대값이 약 4 정도가 기록된다. 심부지열 시스템의 성능 계수 값은 천부지열의 성능 계수의 최소값보다 높기 때문에 심부지열 시스템의 난방 효율이 천부지열 시스템보다 높다는 것을 재차 확인할 수 있었다.

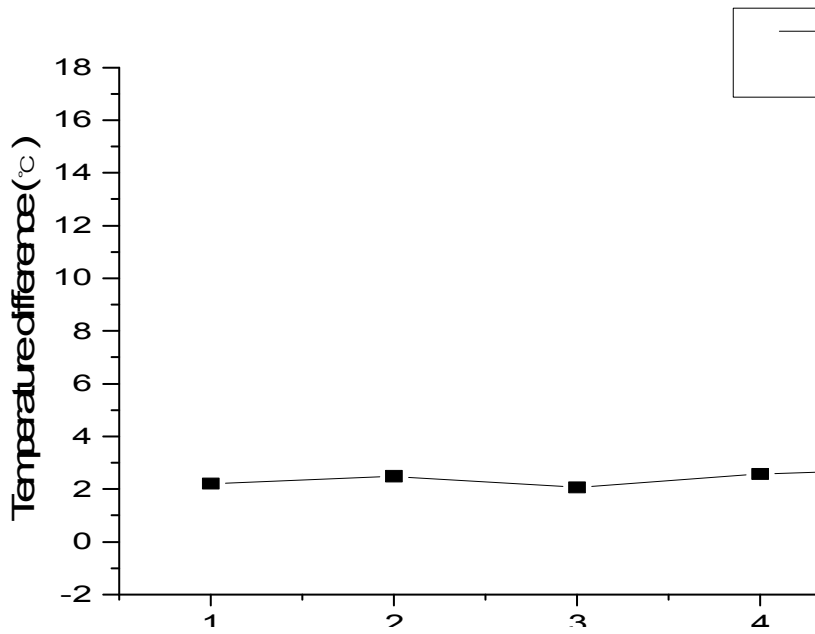


Fig. 4-14 Temperature difference of overall system according to time

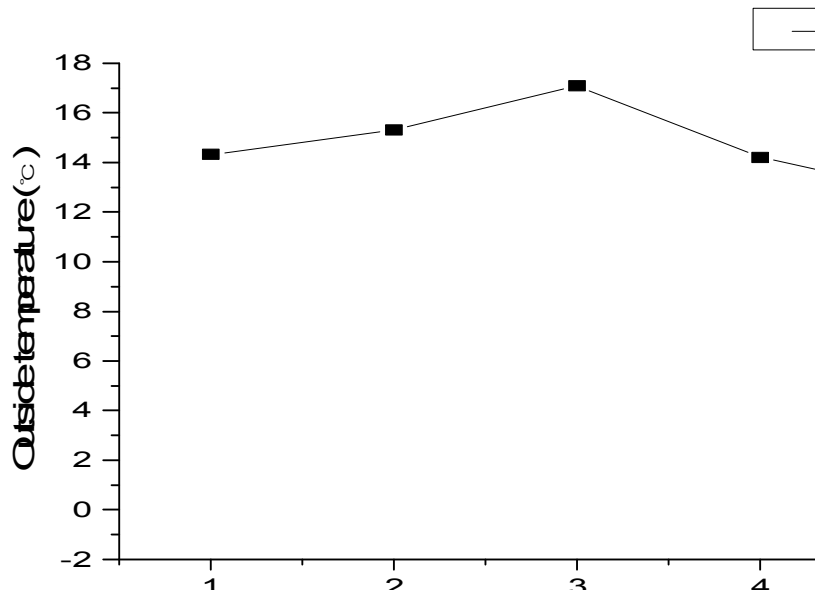


Fig. 4-15 Outside temperature of green house according to time

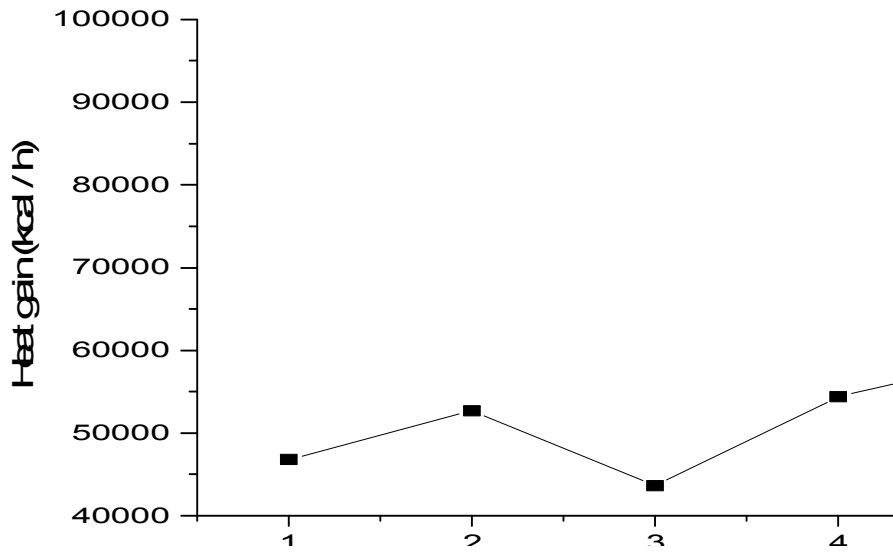


Fig. 4-16 Heat gain of overall system according to time

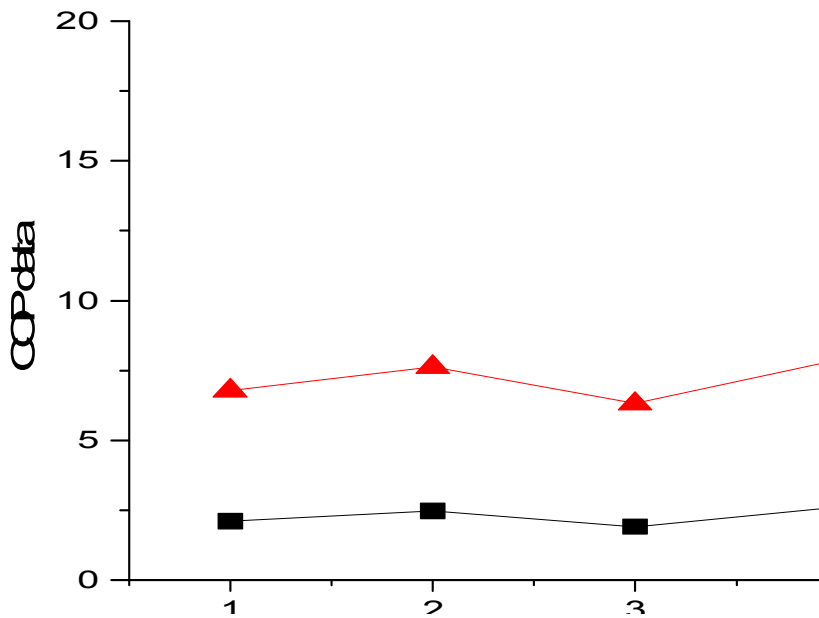


Fig. 4-17 COP data according to time

라. 온실 외기 온도 고정 일자별 시스템 난방 성능 분석

온실의 외기 온도를 고정했을 때 나타나는 평균 취득 열량 값과 시스템 난방 성능의 변동 곡선을 분석하고자 외기 온도를 4.2 °C 기준으로 데이터를 정리하였다. 온실에서 소비되는 취득 열량은 Fig. 4-18에 나타내었으며 COP 값들은 Fig. 4-19에 나타내었다.

외기 온도가 4.2 °C일 때 Fig. 4-18과 Fig. 4-19에 나타낸 바와 같이 평균 취득 열량은 90,000 kcal/hr를 기록하였으며 전체 시스템 성능 계수는 12.5 정도를 유지하였다.

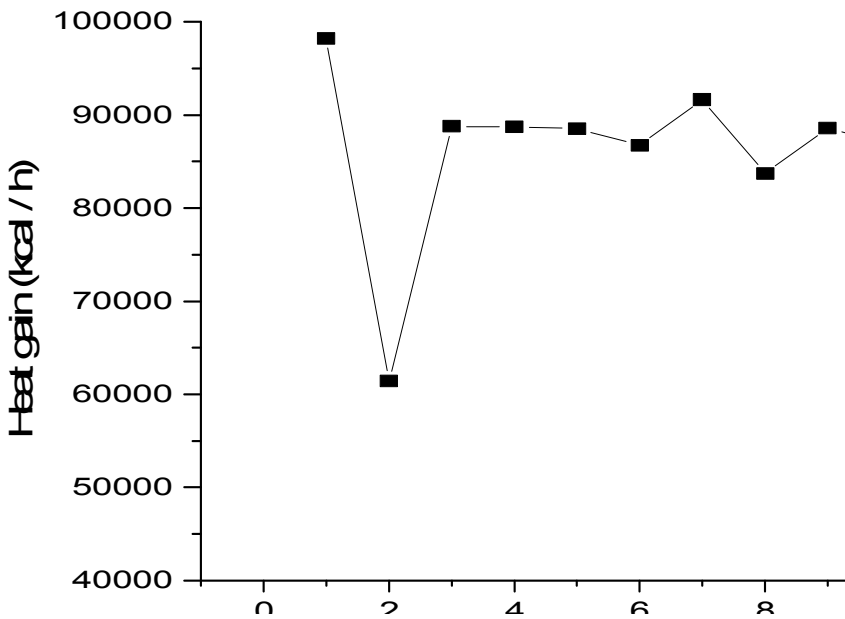


Fig. 4-18 Heat gain of overall system according to time

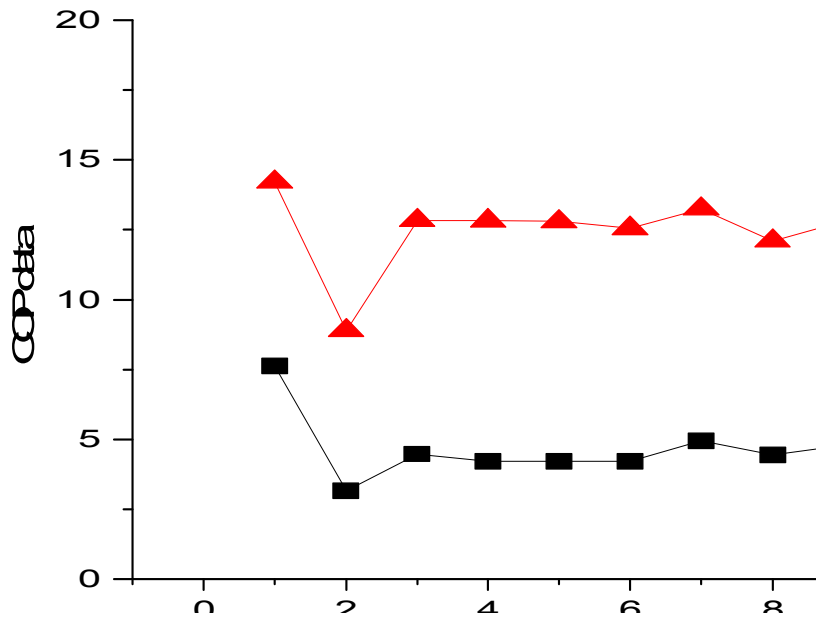


Fig. 4-19 COP data according to time

제 5 장 결 론

본 논문에서는 심부지열의 난방 성능의 규모를 미리 예측할 수 있는 심부지열 시뮬레이터를 제작하여 실험을 수행하였으며 현재 나주시 산포면에 위치한 2,002 m의 시추공에서 나오는 열원을 온실에 공급하고 시뮬레이터의 실험과 동일하게 실험을 수행함으로써 실증 데이터를 분석하였다. 시뮬레이터 실험 장치로 VVVF 제어, On-off 제어 기법을 통해 난방 성능을 미리 예측하였고 현장의 심부지열 난방 설비 또한 VVVF 제어와 On-off 제어 기법을 통해 실증 데이터를 산출하였다. 시뮬레이터의 실험과 현장 실증 실험을 통해 제어 기법에 따른 난방 성능 계수의 변동을 구하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연구 결론

1. 시뮬레이터의 지중 깊이에 따른 난방 성능 실험을 통해 기존 천부지열 시스템의 난방 성능 계수는 2.5 ~ 4.0인 반면에 심부지열 시스템의 경우에는 수조 내 수온이 55 °C일 때 COP₁의 값이 20.67로 심부지열 시스템의 난방 성능이 높다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 심부지열 현장에서 37일간의 실험을 통해 난방 성능 계수가 7 ~ 12.5 정도를 유지되는 것을 확인하여 천부지열 시스템보다 심부지열 시스템의 난방 성능이 훨씬 높다는 것을 실증하였다.

2. 시뮬레이터에서 지중 순환수를 순환 시키는 수중 펌프를 VVVF 제어하여 난방 성능 계수를 산출하고 분석하였다. 수중 펌프를 40 Hz로 가동하였을 때 28.95로 최대값을 기록하였다. 심부지열 현장에서 수중 펌프를 VVVF 제어하였을 때 시뮬레이터의 실험과 동일하게 40 ~ 45 Hz의 가동 범위에서 최대값을 기록하였고 45 Hz로 수중 펌프를 가동하였을 때 18.78로 최대치를 기록하였다.

3. 열교환기에 전달된 열원을 온실로 공급하는 순환 펌프를 시뮬레이터 실험 장치에서 On-off 제어하여 실험을 수행하였다. Set point 25 °C, Dead band를 2 °C로 설정하였다. 수조 내 수온이 55 °C일 때 난방 성능 계수 값은 최대 27.32를 기록하였다.

심부지열 현장은 On-off 구동 조건을 28 °C에서 38 °C로 설정하여 실험을 수행하였을 때 평균 취득 열량은 44,000 ~ 90,000 kcal/hr를 기록하였고 시스템 성능 계수는 7 ~ 8.5를 기록하였다.

4. 심부지열 현장에서 온실의 외기 온도를 4.2 °C를 기준으로 데이터를 정리하였을 때 평균 취득 열량은 90,000 kcal/hr를 기록하였으며 전체 시스템 성능 계수는 12.5 정도를 유지하였다.

2. 향후 연구 방향

본 논문에서는 심부지열 난방 성능을 분석하기 위해 심부지열 시뮬레이터를 제작하여 실험을 수행하고 현장 심부지열 장비를 통해 실증 실험을 수행하였다. VVVF 제어 기법과 On-off 제어 기법을 통해 난방 성능을 향상시킬 수 있었다. 본 연구를 통하여 앞으로 심부지열 시추공의 시추공 깊이와 규모가 커짐에 따라서 난방 성능을 향상시키는 제어 기법에 대한 연구가 계속 진행되어야 할 필요가 있다.

향후 연구 방향으로는 심부지열에 대한 사업이 활발하게 진행됨에 따라 심부지열 장비에 대한 시스템 개발 및 가동 기법에 대한 연구와 난방 성능을 향상시키는 제어 기법에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. 국제환경동향, “환경부”, 제10호, 1998.
2. “지구온난화 대책 기술 1”, 첨단환경 기술, 6월호, pp. 2-33, 1994.
3. 이규완, “온실기체, 이산화탄소의 활용기술”, 첨단활용기술, Vol. 9, pp. 8-26, 1995.
4. 이송호, “기후협약을 둘러싼 논의와 대책”.
5. Ahn, D. G., C. G., Jeong, S.H., and Lee D. G., “Design of Photobioreactor for Mass Production of Microalgae”, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 28, No. 2, pp. 140-153, 2012.
6. BP, “BP Statistical Review of World Energy”, BP Statisticalreview, pp. 1-31, 2010.
7. Kim, S. J., Lee, J. Y., Kim, T. Y., Lee, S. B., “Heating Performance Analysis of Building Integrated Geothermal System, Vol. 32, No. 1, pp. 206-210, 2012.
8. Ryu, Y. S., “A Study on the Loadsharing for Geothermal Heatpump System and Boiler in Horticultural Greenhouse”, Rural Research Institute, pp. 8-12, 2012.
9. Kim, S. S., “A Study on the Heat Pump System by Using Geothermal Energy”, Department of Mechanical & Precision Engineering Graduate School Gyeong Sang National University, 2010.
10. Sohn, B. H., “Performance Analysis of Ground-Coupled Heat Pump System with Slinky-Type Horizontal Ground Heat Exchanger”, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering 24(3), pp. 230-239, 2012.
11. Bae, J. H., “A Study on the Deep-geothermal Water Simulation Monitoring using LabVIEW”, KSMPE Conference, pp. 202-202, 2016.
12. Sohn, B. H., “Performance Simulation of Ground-Coupled Heat Pump(GCHP) System for a Detached House”, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 23, No. 6, pp. 392-399, 2011.
13. Kang, S. H., Choi, J. M., Moon, j., and Kwon, H., “Heating Performance of a Ground source Multi-heat pump for a Greenhouse”, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 22, No. 6, pp. 337-334, 2010.
14. Kavanaugh, S. P. and Rafferty, K., “Ground-Source Heat Pumps : Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings, American

- Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers(ASHRAE), Atlanta, US, 1997.
15. Eskilson, P., “Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes, Doctoral thesis”, University of Lund, Sweden, 1987.
 16. Pahud, D. and Hellstrom, G., “The new Duct Ground Model for TRNSYS”. Eurotherm Seminar, Eindhoven, Netherlands, Vol. 49, pp. 127-136, 1996.
 17. Kim, H. C., and Lee, Y. G., “Heat flow in the Republic of KOREA”, Journal of Geophysical Research, Vol. 112, B05413, doi:10.1029/2006JB0009, pp. 266, 2007.
 18. Chae, H. B., and Nam, Y. J., Kim, D. K., “Study on the Experimental Analysis for a Hybrid Heat pump using the Renewable Energy”, The society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea, Conference of Autumn, pp. 416-419, 2013.