

11-1543
000-001
406-01

발간 등록 번호

11-1543000-001406-01

심부지열을 이용한 원예시설 난방 활용기술 및 경제성 분석 최종보고서

2016

농림축산식품부

첨단생산기술개발사업 R&D Report

심부지열을 이용한 원예시설 난방 활용기술 및 경제성 분석 최종보고서

2016. 09. 13.

주관연구기관 / (주)한진디엔비
협동연구기관 / 농어촌연구원
조선대학교

농림축산식품부

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “심부지열을 이용한 원예시설 난방 활용기술 개발 및 경제성 분석”
(개발기간 : 2014. 07. ~ 2016. 07.)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2016.09.13.

주관연구기관명 : (주)한진디엔비 (대표자) 인석신

협동연구기관명 : 농어촌연구원 (대표자) 이용직

협동연구기관명 : 조선대학교 산학협력단 (대표자) 유진철



주관연구책임자 : 윤현익

협동연구책임자 : 류연수

협동연구책임자 : 정상화

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의
합니다.

보고서 요약서

과제고유번호	314037-2	해 당 단 계 연 구 기 간	2년	단 계 구 분	1/1
연구사업명	중 사업명	첨단생산기술개발사업			
	세부 사업명	첨단생산기술개발사업			
연구과제명	대 과제명	심부지열을 이용한 원예시설 난방 활용기술 개발 및 경제성 분석			
	세부 과제명	심부지열을 이용한 원예시설 난방 활용기술 개발 및 경제성 분석			
연구책임자	윤 현 익	해당단계 참 여 연구원 수	총: 15 명 내부: 15 명 외부: - 명	해당단계 연 구 개 발 비	정부: 600,000천원 민간: 400,000천원 계: 1,000,000천원
		총 연구기간 참 여 연구원 수	총: 15 명 내부: 15 명 외부: - 명	총 연구개발비	정부: 600,000천원 민간: 400,000천원 계: 1,000,000천원
연구기관명 및 소속부서명	(주)한진디엔비			참여기업명 농어촌 연구원 조선대학교 산학협력단	
위탁연구	연구기관명: -			연구책임자: -	
<ul style="list-style-type: none"> - 「심부 지열을 이용한 원예시설 난방활용 기술개발 및 경제성 분석」과제로서 「국내 최초」로 ① 대구경 장심도 시추기술, ② 지중열교환기 시공기술, ③ 온실배관 시스템 시공기술, ④ 지열히트펌프 시스템의 에너지 사용분석 및 열량 취득 효율향상을 위한 기술개발, ⑤ 심부지열 시뮬레이터 제작을 포함하는 총 ①~⑤ 항목에 대하여 데이터 취득 및 결과 도출을 통한 연구개발 성과를 이룩함 - 대구경 장심도 시추 및 지중 열교환기(BHE)시공과 관련하여 인양력 450 ton 이상급인 시추기 및 대구경 8.5 inch Water Hammer를 개발하고 이를 적용하기 위한 시추기술을 확보하였으며, 안정적인 Inner pipe 연결기술을 포함하는 BHE 시공기술을 확보함 - 온실 난방 극대화를 위하여 보온단열, 방열기능 기술과 유속조절에 의한 열량 취득 효율향상을 위한 기술 및 심부지열 시뮬레이터 제작을 통한 난방성능 향상 기술을 확보함 				보고서 면수 206	

요약문

		코드번호	D-01			
연구의 목적 및 내용	<p>시설원에 운영 농가의 고비용 난방 연료비의 해결 방안과 기존 난방 시스템의 운전 및 유지관리 개선을 위해 고효율의 심부지열을 이용한 원예시설 시스템의 보급 및 확산에 기여하고자 본 연구를 수행함</p> <p>대구경 장심도 시추를 포함하는 심부지열 지중 열교환기 설계 및 시공을 수행하고 지열수를 원예시설에 공급하기 위한 시스템 구성 및 작물 생산성, 경제성 평가를 수행함</p>					
연구개발성과	<ol style="list-style-type: none"> 1) 대구경 장심도 시추기술 <ul style="list-style-type: none"> - 지중열교환기 시공을 위한 대구경 장심도 시추기 개발 - 대구경 장심도 시추가 가능한 워터 해머 개발 - 심부지열 열 공급 및 발전을 위한 대구경 장심도 시추기술 확보 2) 지중열교환기 시공기술 <ul style="list-style-type: none"> - 「국내 최초」로 최 장심도 Inner pipe 시공 기술 확보 - 순환수의 유속 조절과 단열 및 전열을 향상시키기 위한 시공 기술 확보 - 장심도 시추공의 Inner pipe의 안정성 유지 기술 확보 3) 온실 배관 시스템 시공기술 <ul style="list-style-type: none"> - 온실 난방 효과를 극대화를 위한 방열기기, 배관설치 기술 확보 4) 지열히트펌프 시스템의 에너지 사용분석 및 열량 취득 효율 향상을 위한 기술개발 <ul style="list-style-type: none"> - 원예시설에서의 지열 히트펌프 시스템 소비전력 분석 및 요소별 소비전력 비교 - 심부지열 시추공에서의 최대 열량과 온도를 취득하는 기술 개발 - 기존 지열 히트펌프 난방설비와 심부지열 이용설비의 비교 평가 5) 심부지열 시뮬레이터 제작 <ul style="list-style-type: none"> - 심부지열 순환 시뮬레이터를 통해 난방 성능을 향상시키는 기법 확보 - 온실 환경 자동 제어 및 모니터링 시스템 기술 확보 					
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	<ol style="list-style-type: none"> 1) 심부지열 시추용 시추 장비 및 시추 시스템 수출 2) 심부지열 시추기술 수출 3) 온실 난방 및 시설 난방에 심부지열 직접 열활용 이용 4) 심부지열 시뮬레이터를 이용한 심부지열난방 규모 예측을 위한 모의실험 					
중심어 (5개 이내)	심부지열	지열직접이용	온실난방	지열난방	심부지열난방	

< SUMMARY >

		코드번호	D-02			
Purpose& Contents	<p>This study is for supplying the new system of controlled horticulture using deep geothermal, to reduce the high cost of heating and to develop an operation & management in existing system.</p> <p>The contents have a civil construction of BHE (Borehole Heat Exchanger) including deep drilling and surface facilities(well head ~greenhouse), moreover, its evaluation of crop growth and economics</p>					
Results	<ol style="list-style-type: none"> 1) Deep drilling with a large hole size <ul style="list-style-type: none"> - Development of deep drilling rig with a large hole size for a construction of BHE - Development of water hammer system for a deep drilling with a large hole size - Drilling technology(Deep drilling with a large hole) for heat supplying and electric generation of a deep geothermal 2) Construction Technology of BHE (Borehole Heat Exchanger) <ul style="list-style-type: none"> - Construction technology of inner pipe connection(well depth:2002m) for the first time in Korea - Construction technology to improve the effect of insulation & thermal heating by controlled water flow - Construction technology of inner pipe safety in deep well 3) Pipeline System in Greenhouse <ul style="list-style-type: none"> - Technology to improve the heating effect with a radiator & pipeline construction in greenhouse 4) Analysis of an energy consumption with a heat pump in geothermal and technology development for an efficiency enhancement of a high calory in deep well <ul style="list-style-type: none"> - Analysis of an electric energy consumption with a heat pump and its comparison each of factors in greenhouse - Technology development for a high calory and temperature in deep well - Comparative evaluation for the heating system between shallow geothermal using heat pump and deep geothermal 5) Manufacture of deep geothermal simulator <ul style="list-style-type: none"> - Improvement of heat capacity by simulator with a geothermal water circulation - Automatic control in greenhouse and monitoring system 					
Expected Contribution	<ol style="list-style-type: none"> 1) Export of deep drilling rig (deep geothermal) and drilling system 2) Export of deep drilling service 3) Direct using of deep geothermal to controlled horticulture 4) Simulation for heating volume with a deep geothermal simulator 					
Keywords	Deep geothermal	Geothermal direct use	Geothermal for greenhouse	Geothermal heating	Deep geothermal heating	

CONTENTS

Chapter 1 Introduction to Research and Development Project	7
Unit 1 Introduction to Research and Development	7
Unit 2 Current Status of Research and Development	9
Chapter 2 Trends of Domestic and International Technical Development	16
Unit 1 Trends of Domestic Technical Development	16
Unit 2 Trends of International Technical Development	26
Unit 3 Difference of Domestic and International Development Technology	33
Chapter 3 Contents and results of Research and Development	36
Unit 1 Trends in Geothermal heating of Controlled Horticulture	36
Unit 2 Application of Research and Development	52
Unit 3 Design and Simulation of Deep Geothermal System	54
Unit 4 Construction of Deep Borehole	101
Unit 5 Construction of Aboveground Facility	120
Unit 6 Experiment and Data Analysis	138
Unit 7 Standardized system and Policy Proposal	183
Chapter 4 Level of Contribution of Research and Development and Future Plan ..	195
Unit 1 Level of Contribution to the Related Field	195
Unit 2 Future Plan	202
Chapter 5 Reference	205

〈 목 차 〉

제 1장 연구개발과제의 개요	7
제 1절 연구개발 개요	7
제 2절 연구개발 추진현황	9
제 2장 국내외 기술개발 현황	16
제 1절 국내 기술개발 현황	16
제 2절 해외 기술개발 현황	26
제 3절 국내외 개발기술 차이점	33
제 3장 연구개발수행 내용 및 결과	36
제 1절 시설원예의 지열난방 현황	36
제 2절 과제 적용 현황	52
제 3절 심부지열 시스템 설계 및 시뮬레이션	54
제 4절 심부지열공 시공	101
제 5절 지상부 설비 시공	120
제 6절 실험과 데이터 분석	138
제 7절 시스템 표준화 및 정책 제안	183
제 4장 연구개발 기술 발전 기여도 및 활동 계획	195
제 1절 관련분야 기술 발전에의 기여도	195
제 2절 성과 활용 계획	202
제 5장 참고문헌	205

제 1장 연구개발과제의 개요

제 1절 연구개발 개요

1. 연구개발 목적

- 시설원예를 운용하는 농가의 「난방비 부담」에 대한 문제 해결 방안의 일환으로 「심부지열을 이용한 원예시설 난방 활용기술 개발 및 경제성 분석」의 연구개발을 통하여 기존의 난방원(경유 온수보일러, 벙커C유 온수보일러, 경유 온풍기, 축열식 심야 전기 난방기)에 대한 운영비를 절감하고 심부지열을 이용한 원예시설 시스템의 보급 및 확산에 기여하고자 함

2. 연구개발 필요성

- 난방비로 인한 원예시설 농가의 부담 가중
 - 기존 화석연료인 유류 보일러 및 전기히터 사용 시 시설원예 농가의 운영비(유류비, 전기료) 부담 증가함
 - 상기와 같은 상황에 대한 난방비 절감 차원의 일환으로 2009년 이후 「지열난방 시스템 지원 사업」이 이루어지고 있음
- 지속적인 난방용 면세유 사용량 증가
 - 농업 부문에서 유류 사용량이 매년 증가하는 것은 농업 생산 형태의 변화, 농가의 경영 형태 변화, 소비자 선호에 부응하기 위한 생산 체계의 변화 때문임
 - 농업생산 형태의 변화는 과거 노동집약적 농업에서 현재 자본 집약적 형태로 바뀌면서 시설원예 면적이 증가하였고, 농가의 경영목표도 비용 절감보다는 고투입 고효율 농업으로 전환 중임
 - 소비자 선호도가 바뀌에 따라 농업생산도 계절을 초월한 연중 공급체계로 전환됨
- 지열난방 시스템 가동에 따른 문제점
 - 지중열교환기 설치를 위한 별도의 부지확보 문제
 - 천부지열 적용 시 별도의 히트펌프 사용에 따른 전기 사용량이 과다함
 - 실제 농가의 경우 대부분 난방만 가동하여, 연간 냉난방 밸런스가 맞지 않아 장기적으로 지중 온도가 계속 하락함 -> 운전비 증가
 - 대규모 온실의 경우 필요 전력공급의 어려움 발생
 - 농가에서 직접 히트펌프 컨트롤이 어려워 계절, 환경 변화에 따른 설정 변경이 불가능함
- 최신 해외 기술의 국내 도입/보급 필요
 - 장심도 시추 기술의 국내 개발에 따른 도입 가능성 확대
 - 지중 무한 열원을 이용한 진정한 신재생에너지 도입의 정책적 촉진이 필요함
 - 기존 온실 설계/시공과의 호환성 확보

- 해외에 많은 성공사례를 가진 검증된 시스템의 국내 도입 추진
- 운전비가 가장 저렴한 온실 난방 시스템
- 상기와 같은 문제점을 해결하기 위한 방안으로 심부지열을 이용한 온실 난방시스템 도입이 시급함
 - 난방 운전비를 획기적으로 절감
 - 지중열교환기 설치부지 최소화
 - 지중 열 밸런스 문제 해결
 - 대규모 전력 공급 불필요 및 전력 사용량 감소
 - 운영이 용이한 난방 설비

3. 연구개발 범위 및 수행방법

- 연구개발 범위에 따른 방법 및 내용은 표 1-1과 같음

표 1-1 연구 개발 범위 및 수행방법

연구 범위	연구수행방법 (이론적 · 실험적 접근방법)	구체적인 내용
에너지사용량 조사 및 비용분석	•현장조사 및 비용분석	•원예시설 농가 방문조사 •난방설비 제원조사 •지열히트펌프 운영에 따른 전기요금 조사 및 분석
지중순환펌프 제어	•이론적인 기술 및 현장 실증	•지중 순환펌프 제어 기술 확보
실내 열교환기 제어	•이론적인 기술 및 현장 실증	•실내 열교환기 제어 기술 확보
디바이스 인터페이스	•실험적 하드웨어 및 현장 실증	•센서 디바이스 인터페이스 구축
지역(Local) 환경 제어 알고리즘 개발	•실험적 하드웨어 및 현장 실증	•인자별 센서 보정 시스템 구축 및 알고리즘 개발
시스템 통합	•실험적 하드웨어 및 현장 실증	•시스템 통합 구성 완료
심부지열공 시추 및 시공	•장심도 시추 시공 •시추공 8.5 inch 워터해머 성능 현장 실증	• 시추공 설계(Well design) • 2,002 m 대구경 시추 • 케이싱(Casing), 시멘팅(Cementing) • 지중 열공급 시스템 시공

제 2절 연구개발 추진현황

1. 계획대비 달성도

표 1-2 1차년도 계획대비 달성도

구분 (연도)	연구목표/내용	당해년도 달성도 (%)	최종 달성도 (%)	비고(Page)	
1차 년도 (2014)	심부지열을 이용한 온실설비 구축	•적용 현장 선정 및 협의	100	100	49-50
		•시스템 설계 및 재배 작물 선정	100	100	49,160
		•심부 지열공 시공	50	100	98-116
		•지상부 온실 설비 시공	100	100	117-125
		•자동제어 시스템 구축	100	100	125-134
		•센서 및 모니터링 시스템 구축	100	100	125-134
		•운전 및 데이터 취득/분석	0	100	135-159
		•작물 생산성 평가	0	100	160-171
		•유관 기관 정책자문회의	50	100	182-183
	원예시설 현황 및 난방설비와 에너지 사용량 조사	•원예시설 일반현황 조사 •원예시설 난방설비 에너지원별 현황조사	95	100	33-48
	원예시설 지열난방시스템 조사 및 유지관리비 분석	•원예시설 지열난방시스템 조사 •선정 농가 지열난방시스템 세부 조사 •심부지열이용 기술설명 및 선호 도 조사	95	100	33-48
	심부지열 취득열량 이론적 분석	•밀폐형 관로에서 유속과 취득온 도, 취득열량 시뮬레이션	70	100	55-97
	디바이스 인터페이스	•ID 구축 계획 수립	100	100	51-54
	지역(local) 환경제어 알고리즘 개발	•인자별 센서 선정 및 보정 계획	100	100	51-54
	지중순환펌프제어	•지중 순환펌프 시스템 계획 구축	100	100	84-97
	실내 열교환기 제어	•열펌프 시스템 제어 구성 완료	100	100	84-97
시스템 통합	•시스템 통합 구성완료	100	100	125-134	

표 1-3 2차년도 계획대비 달성도

구분 (연도)	연구목표/내용	당해년도 달성도 (%)	최종 달성도 (%)	비고(Page)	
2차 년도 (2015)	심부지열을 이용한 온실설비 실증 및 보급	•심부지열공 시추 및 시공	100	100	98-116
		•시스템 표준화	100	100	178-181
		•운전 및 데이터 취득 분석	100	100	135-159
		•작물 생산성 평가	100	100	160-171
		•기술 지침 마련	100	100	178-181
	심부지열과 기존 지열히트펌프의 경제성 비교 분석	•설치비용 분석	100	100	172-178
		•운전비용 분석	100	100	172-178
	온실에너지사용량 분석	•천부지열에너지이용 원예시설 전기사용량 및 비용 분석	100	100	33-48
	심부지열 현장실험 및 분석	•심부지열 현장실험 및 분석	100	100	135-159
		•유속 및 열량 분석	100	100	141-159
	경제성 분석	•심부지열 이용 비용 분석	100	100	172-178
		•경제성분석	100	100	172-178
	정책 자문회의 계획추진		100	100	182-183
	원격 DSC 툴 개발	•Data logging 및 device history 기록	100	100	84-97
		•지중 내 수중펌프 제어 알고리즘 개발	100	100	84-97
		•온실 내부 순환펌프 제어 알고리즘개발	100	100	84-97

2. 연구목표 성과

표 1-4 연구목표 성과

평가 항목	단 위	1차년도			2차년도			최 종		비 고
		목표치	실적치	달성도 (%)	목표치	실적치	달성도 (%)	목표치	실적치	
출원(등록)	건				1	1	100	1	1	
제품화	건				1	1	100	1	1	
기술인증	건				1	1	100	1	1	
비SCI 논문	건				1	2	100	1	2	
학술발표	건	1	3	100	1	2	100	2	5	
교육지도	건				1	2	100	1	2	
인력양성	명	1	3	100	1	1	100	2	4	

가. 출원

표 1-5 특허 출원

목표치	실적치	달성도
1	1	100%

특허명	유속 제어에 의한 지중 열교환기의 최적 운전 제어방법
특허권자	한국농어촌공사
등록번호	10-1587553

나. 제품화

표 1-6 기술 제품화

목표치	실적치	달성도
1	1	100%

○ 제품화 내용

시추공 공경	8.5 inch (215.9 mm)	
시추 심도	2,002 m	
Inner pipe	소재	PE 소재
	상부	OD : 165.0 mm, ID : 134.4 mm, T : 15.3 mm
	하부	OD : 90.0 mm, ID : 60.0 mm, T : 15.0 mm
순환 펌프	8 ton/hr, 10 HP (7.5 kW), OD : 101.0 mm	
열교환기	판형, 75,000 kcal/hr	

* 온도센서
 * 유량센서
 P : 온도 후 유량센서 지점
 V : 밸브 지점

1차측 및 2차측 PLC간 Data통신

다. 기술인증

표 1-7 녹색기술인증

목표치	실적치	달성도
1	1	100%

○ 녹색기술인증

- 기술명 : 워터 해머시추시스템을 이용한 2km 이상 장심도 시추 기술
- 기술수준 : 지하심도 2 km 이상 시추 가능
- 시추부지 : 기존 시추 시스템 대비 1/3 이하 소요
- 인증번호 : GT-16-00119
- 유효기간 : 2019-09-05

녹색기술 인증서

인증번호 : 제 GT-16-00119호
 기관명 : (주)한진에너지
 대표자명 : 인석진
 주소 : 광주광역시 광산구 하남산로1번로(인성동)
 기술명칭 : 워터 해머 시추 시스템을 이용한 2km 이상 장심도 시추 기술
 등록번호 : T010802

『최소한 녹색성장 기본법』 제32조 및 『녹색인증제 운영요령』 제27조에 의거하여 위의 기술을 녹색기술로 인증합니다.

최초인증일자 : 2016.09.06
유효기간 : 2016.09.06 - 2019.09.05

국토교통부장관

라. 비SCI 논문

표 1-8 비SCI 논문 성과

목표치	실적치	달성도
1	2	100%
한국기계공학회지(2016. 08.)		한국기계공학회지(2016. 10. 게재 예정)
<p>2000 m 단일 시추공에서 밀폐 동축 방식 지중열교환기의 취득온도 성능평가</p> <p style="text-align: center;">류연수*, 김재혁**, 정상화**,* *한국농어촌공사 농어촌연구원, **조선대학교 기계공학과</p> <p style="text-align: center;">A Performance Evaluation of Closed Co-axial Ground Heat Exchanger in the case of 2000 m Depth Single Well</p> <p style="text-align: center;">Yeon-Su Ryoo*, Jae-Hyeok Kim**, Sang-Hwa Jeong**,* *Rural Research Institute, **Department of Mechanical Engineering, Chosun UNIV. (Received 5 December 2015; received in revised form 9 December 2015; accepted 11 December 2015)</p> <p style="text-align: center;">ABSTRACT</p> <p>The Korea Government has been making the efforts to use a renewable energy to reduce the consumption of fossil fuel as a heating system in green house. The number of greenhouse installed geothermal heat pump system is 201 EA with the volume for 132.8 ha and 108,467 kW during 2010 ~ 2014. The geothermal system called a shallow geothermal with the temperature 10 ~ 20 ℃ has accessories composed of BHE and heat pump. Moreover, it is necessary to have a wide area to install BHE and to drill the depth of 200 m. On the other hand, even though the deep geothermal system needs a high drilling cost to obtain the temperature of 40 ~ 150 ℃, the system has advantages of the small required area for BHE and the operation without heat pump.</p> <p>In this study, the temperature of return water and heat capacity measured to obtain the geothermal energy efficiently on the condition of being changed water flow in BHE. The temperature according to return water changes through the heat conduction based on increasement of ground temperature up to the depth of underground has been calculated to conduct a simulation and is compared with the field experiment test results.</p> <p>Key Words : Deep Geothermal(심부지열), Heat Exchanger(열교환기), Heat Gain(취득열량), Flow Velocity(유속), Green House(시설원예)</p>	<p>수직 밀폐형 심부지열 순환 시뮬레이터의 성능 평가에 관한 연구</p> <p style="text-align: center;">배정형*, 이동운*, 윤충만*, 류연수**, 정상화**,* *조선대학교 기계공학과, **한국농어촌공사 농어촌연구원</p> <p style="text-align: center;">A Study on Performance Evaluation of Vertically Closed Deep Geothermal Circulation Simulator</p> <p style="text-align: center;">Jung-Hyeong Bae*, Dong-Woon Lee*, Chung-Man Yoon*, Yeon-Su Ryoo**, Sang-Hwa Jeong**,* *Department of Mechanical Engineering, Chosun UNIV., **Rural Research Institute. (Received 5 December 2015; received in revised form 9 December 2015; accepted 11 December 2015)</p> <p style="text-align: center;">ABSTRACT</p> <p>Various methods to solve issues arising due to climate change are being studied globally. Projects that use geothermal energy as an alternative energy source, under a leadership of nation, are being actively conducted. Because current agricultural energy projects that use renewable energy are increasingly being conducted, greenhouses that employ diesel boilers are switching to horticulture facilities with geothermal heat pumps. Most horticultural facilities in the nation use shallow geothermal systems and are equipped with horizontal underground heat exchanger and heat pump equipment. Shallow geothermal systems require a large drilling site and require the use of a heat pump, which results in high maintenance costs. In addition, the heat pump consumes a large amount of power and thus 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 no required; this reduces the power consumption and improves the system performance.</p> <p>In this study, we develop a circulation simulator based on the circulation system of deep geothermal facilities for a 2000m borehole in Naju-Sampo-myeon; the simulator is operated by controlling the various parameters affecting the system performance and the system's coefficient of performance is analyzed.</p> <p>Key Words : Deep Geothermal(심부지열), Real Time(실시간), Remote Monitoring(원격 모니터링), VVVF Control(가변 전압 주파수 제어), On-off Control(온오프제어)</p>	

마. 학술발표

표 1-9 학술발표 성과

목표치	실적치	달성도
2	5	100%
한국태양에너지학회 추계학술대회(2014.11.)	한국태양에너지학회 춘계학술대회(2015.03.)	한국신재생에너지학회 추계학술대회(2015.06.)

한국정밀공학회 추계학술대회(2015.12.)

한국기계가공학회 춘계학술대회(2016.04.)

--	--

바. 교육지도

표 1-10 교육지도 성과

목표치	실적치	달성도
1	2	100%

○ 안양대학교 교육지도

일 시	2016. 02. 04.(16:00~18:00)
장 소	안양대학교 기후환경에너지연구소 세미나실
주 제	지열이용 기술동향 및 사례

○ 조선대학교 교육지도

일 시	2016. 07. 26.(14:00~16:00)
장 소	조선대학교 공대 1호관 7층 세미나실
주 제	심부지열을 이용한 원예시설 난방 활용기술

안양대학교 환경·에너지공학과

우430-714 경기도 안양시 만안구 연25동 700-113 | 전화+031463-1350 / 전송+031467-0789

부서번호 환경 제2016-0129호 | 서울일자 2016.01.29

연	시
월	일
접	시
수	번호
지	리
담당	자

수신 : 녹색에너지연구원
주소 :
제목 : 원예기 특강 요청

1. 귀 원에 무궁한 발전을 기원합니다.
2. 다른이 아니라 우리 학과에서는 기후환경에너지혁신과 대학원을 운영하면서 제3원 에너지 기술과 최근의 정책에 대한 이해도를 높여 전문 직업인으로 양성하고자 관·연·산업계의 전문가를 초청하여 정기적인 특강 프로그램을 운영하고 있습니다.
3. 금회에는 귀 원에 재직중인 윤인수박사를 초청하여 아래와 같은 내용으로 특강을 개체하고자 하오니 적극 협조하여 주시기 바랍니다.

- 이 래 -

1. 발 사 : 윤인수 박사(녹색에너지연구원)
2. 일 시 : 2016. 2. 4 오후 4:00
3. 주 제 : 지열이용 기술동향 및 적용사례
4. 장 소 : 안양대학교 기후환경에너지연구소 세미나실 (수리관 2층)
5. 참석대상 : 대학원 석박사 과정

안양대학교 환경·에너지공학과 학과장



사. 인력양성

표 1-11 인력양성 성과

목표치	실적치	달성도
2	4	100%
1차년도		2차년도
<ul style="list-style-type: none"> ○ 석 사 : 3명(김민수, 김성복, 박찬희) ○ 졸업연도 : 2015년 2월 ○ 기 관 : 조선대학교 기계공학과 ○ 학위논문 : 3편 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 석 사 : 1명(배정형) ○ 졸업연도 : 2016년 8월(수료) ○ 기 관 : 조선대학교 기계공학과 ○ 학회논문 : 1편 	

제 2장 국내외 기술개발 현황

제 1절 국내 기술개발 현황

1. 농업분야 에너지 이용현황

- 우리나라 1차 에너지 소비량은 2000년부터 2011년까지 연평균 3.6% 증가하고 있으며, 1차 에너지에서 에너지 전환 시 소비된 에너지 양, 발전할 때 소비된 양, 자가소비 등을 제외한 최종 에너지 소비량은 연평균 3.2% 증가하는 추세를 보임
- 농림어업 분야의 에너지 소비량은 최근 연평균 2.7% 감소하고 있으며 이는 에너지 가격 상승과 농어업 분야의 경영비 상승으로 인하여 농어가 소득이 낮아져 영농을 포기하는 농가가 늘고 있기 때문임

표 2-1 농어업 분야 에너지 최종 소비량 추이 단위 천TOE, (%)¹⁾

	2000	2007	2008	2009	2010	2011	증감률
국내생산	32,641	38,338	40,376	40,133	40,912	42,039	2.6
수입	213,810	246,773	255,509	257,143	279,649	301,425	3.5
자급률(%)	13.2	13.4	13.6	13.5	12.8	12.2	-0.9
-수출	43,577	41,709	47,472	46,758	48,224	57,541	
-국내 병커링	7,163	7,738	7,754	6,985	7,569	7,522	
-재고증감	1,057	1,995	567	1,658	1,532	204	
-통계오차	1,767	1,205	660	1,880	568	2,510	
1차 에너지 소비	192,887	236,454	240,752	243,311	263,805	275,688	3.6
-에너지 전환	43,036	54,999	58,167	61,245	68,218	69,824	
-발전	39,797	51,166	53,834	56,256	62,696	63,499	
-지역난방	530	666	779	1,164	1,609	2,304	
-가스제조	178	286	389	255	976	401	
-자가소비, 손실	2,530	2,891	3,174	3,561	2,937	3,621	
최종에너지소비	149,852	181,455	182,576	182,066	159,587	205,864	3.2
산업부문	83,912	104,327	105,458	106,119	116,910	125,886	4.2
-농림어업	4,069	3,214	2,860	3,035	3,201	3,082	-2.7
-광업	142	206	195	196	240	260	6.2
-제조업	77,583	91,101	93,220	91,999	101,780	110,654	3.6
-건설업	2,118	2,537	2,366	2,772	2,624	2,551	1.9
-기타	0	7,269	7,817	8,117	9,065	10,339	-
수송부문	30,945	37,068	35,793	35,930	36,938	36,875	1.8
가정부문	21,401	21,067	21,132	20,537	21,185	21,621	0.1
상업부문	10,969	14,849	15,093	15,185	16,071	15,921	3.8
공공부문	2,625	4,143	15,093	4,295	4,483	4,560	5.8

1) 에너지경제연구원, '에너지통계연보', 2012.

- 신재생 에너지 소비량은 점차 증가하여 2000년에 1.1%에서 2011년에는 2.4%로 증가하는 양상을 보임. 정부는 환경과 연계하여 신재생 에너지 보급정책의 확대로 2030년에는 11.0%까지 에너지 소비 비중을 높이려 하고 있음

표 2-2 우리나라 에너지원별 소비량 구성

단위 : %

	석탄	석유	천연가스	수력	원자력	신재생 에너지	계
2000	22.2	52.0	9.8	0.7	14.1	1.1	100.0
2007	25.2	44.6	14.7	0.5	13.0	2.0	100.0
2008	27.4	41.6	14.8	0.5	13.5	2.2	100.0
2009	28.2	42.1	13.9	0.5	13.1	2.3	100.0
2010	29.2	39.5	16.3	0.5	12.1	2.3	100.0
2011	30.3	38.1	16.8	0.6	11.7	2.4	100.0

2. 농림어업 부문 에너지 이용 실태

- 농림어업 부문의 최종에너지 소비량은 2011년 기준으로 3,082천 TOE로 우리나라 전체 최종 에너지 공급량의 약 1.5%를 차지하고 있음
- 산업 부문의 에너지원별 소비량 비중은 석유류가 38.1%인 데 비해 농업 부문은 70.2% 대부분이 석유류에 의존하고 있어 유가가 상승하게 되면 농업 부문의 경영성과에 크게 영향을 미칠 수 있음

표 2-3 농림어업 에너지소비 추이

	최종에너지(A)	농림어업						
		소계		석유			도시가스	전력
		(B)	(B/A)	석유류	LPG	비에너지유		
2001	152,950	4,369	2.9%	3,828	3	0	22	515
2005	170,854	3,385	2.0%	2,749	7	-	27	603
2010	195,068	3,201	1.6%	2,326	3	4	5	864
2011	205,863	3,082	1.5%	2,163	3	2	4	909

- 2010년 기준 농림업 부문의 에너지 사용 비중은 석유류가 57.2%로 가장 큰 비중을 차지하며 전력이 그 다음으로 35.0%를 점유하고 있음

표 2-4 농업용 에너지 소비량²⁾

사용처	사용량(천kl)	용도별 비율
시설난방	1,256	63.6
농기계	685	34.7
기타	34	1.7
계	1,975	100.0

- 농업부문에서 유류 사용량이 매년 증가하는 것은 농업생산 형태의 변화, 농가의 경영형태 변화, 소비자 선호에 부응하기 위한 생산체계 변화 때문임
- 농업생산 형태의 변화는 과거에는 노동집약적 농업에서 현재는 자본집약적 형태로 바뀌면서 시설원에 면적이 증가하였고, 농가의 경영목표도 비용 절감보다는 고투입 고효율 농업으로 전환 중임
- 소비자 선호도가 바뀔에 따라 농업생산도 계절을 초월한 연중공급체계로 전환됨. 소비자가 겨울철에도 신선 농산물 소비를 원하기 때문에 농가는 소비자 선호에 맞춰 생산함으로써 유류 사용량이 증가함

3. 원예작물 에너지 이용현황

- 농업부문에서 에너지를 가장 많이 사용하고 있는 분야는 원예 분야임. 2012년 원예작물 시설면적 56,328 ha 중 가온면적은 21,208 ha(37.65%)이고 무가온면적은 35,120 ha(62.35%)
- 채소의 가온면적은 18,876 ha이고 화훼는 2,332 ha, 가온 원료로는 주로 유류가 이용됨. 전체 에너지 사용량 중 유류 사용량이 66.41%로 절대적으로 높고, 기타와 전기가 그 다음을 차지함

표 2-5 원예작물의 가온면적 현황³⁾

단위: ha, %

구분		채소류	화훼류	계	전체비중	가온비중	
가온면적	고체연료	폐목	36	8	44	0.08%	0.21%
		연탄가스	292	193	485	0.86%	2.29%
		코크스	42	7	49	0.09%	0.23%
		페타이어	3	0	3	0.01%	0.01%
		기타	5,617	17	5,634	10.00%	26.57%
	유류	12,116	1,968	14,084	25.00%	66.41%	
	가스	41	1	42	0.07%	0.20%	
	전기	727	117	844	1.50%	3.98%	
	소계(A)	18,876	2,332	21,208		100.0	
	무가온 면적(B)	34,778	342	35,120	62.35%	-	
계(A+B)	53,654	2,674	56,328	100.0	-		

2) 에너지경제연구원, 면세유 자료, 농협중앙회, 2008.

3) 농림축산식품부, '2012 시설채소 온실현황 및 채소류 생산실적', '2012 화훼재배 현황', 2012

4. 국내 제품생산 및 시장 현황

- 시설원에 가온 면적은 2020년에 1만 3,657천 ha로 추정됨. 이 중 지열보급이 가능한 조건을 갖춘 6,323 ha(46%)를 보급목표로 설정(가온 시설면적 300평 이상 고온성 작물, 단 임차면적과 제주지역 제외)함
- 지열히트펌프를 보급하는 데 아직은 초기설치비가 높고 설치기술이 완전하지 않기 때문에 처음에는 시험보급 하다가 기술개발이 완전하게 되었을 때 점증적으로 보급 확대가 이루어지도록 함

표 2-6 지열히트펌프 연도별 보급목표(체증적 보급)⁴⁾

구분	2009	2010	2011	2012	2015	2020
당해보급면적(ha)	91	250	255	261	340	1,681
누적보급면적(ha)	91	341	596	857	1,754	6,323
보급률(%)	1.4	5.4	9.4	13.6	27.7	100.0

주: 보급률은 지열히트펌프 보급목표 면적 6,323 ha 대비 보급면적임

5. 국내 심부지열 개발 현황 및 과제

- 1970년대까지 국내 지열연구는 주로 온천조사였으며, 1980년대 들어서면서 관련 연구소와 학계가 온천조사뿐만 아니라 지열류량에 대한 연구도 비로소 수행하기 시작하였음
- 2003년 한국지질자원연구원에서 기존의 온천시추 등의 자료를 수집하고 암석의 열 물성을 측정하여 2007년 기준으로 총 359개의 지열류량 시료와 580개의 지온증가율 자료가 확보되었고, 또한 1,560개의 암석 샘플에 대한 열전도도를 측정하여 남한에 대한 지온증가율 분포도, 지열류량 분포도, 그리고 암석의 열전도도 데이터가 작성되었음
- 현재 국내의 심부지열 개발과 관련하여 「포항」과 「광주」 지역에서 시추공 굴착을 실시하였으며, 「울릉도」와 「제주도」 지역에 대하여 심부지열 개발을 위한 타당성 조사 및 프로젝트 진행을 위한 준비단계에 있음

가. 포항 MW급 지열발전

- 사업개요
 - 사업명 : MW급 지열발전 상용화 기술개발(전략응용)
 - 사업기간 : 1단계 - 2010.12.~2012.11.(24개월)
2단계 - 2012.12.~2015.11.(36개월)

4) 한국농어촌경제연구원, '농업전망 2010-녹색성장과 농업·농촌의 새로운 활로', 2010.

○ 기술목표

- 4~5 km 장심도 시추 및 비용/관리 자동화 기술 국산화
 - ; 주입정 시추 : 4~5 km 연장 시추
 - 생산정 시추 : 4~5 km 방향제어 시추
- 수리자극(Stimulation)에 의한 인공 지열 저류층 생성
 - ; 수리자극을 통한 지열 저류층(160℃) 확보
- 저류층 평가
 - ; Flow test를 통한 순환유량 및 온도 검증

○ 진행 현황

- 지열정 시추는 트리콘 비트(Tricone bit)를 사용하여 굴진하는 작업으로 장심도 시추 작업 중에서 가장 핵심이 되는 부분으로 본 현장에서 4,127 m까지 굴진을 완료하였음



그림 2-1 시추전경(포항)

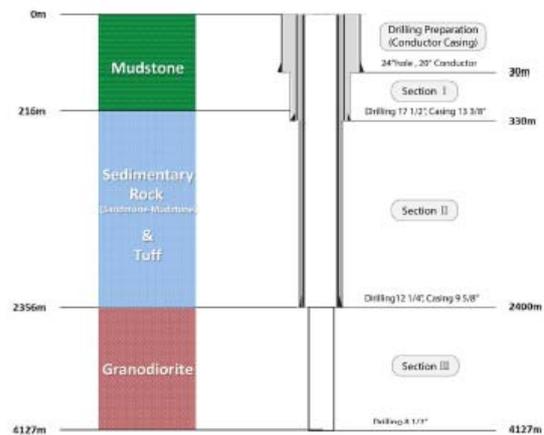


그림 2-2 Well design

- 목표 8.5 inch 구경을 도달하기 위하여 지반조건을 감안하여 24, 17.5, 12.25, 8.5 inch로 구분하여 굴진하고, 각 Section별 Casing과 Cementing 작업을 수행하였음
- Casing은 지반 조건을 감안하여 2,400 m 기준으로 하여 그 상부에는 퇴적암과 화산암이 분포하므로 3단계로 구분하여 설계하였으며, 각 단계마다 Casing 배면에 시멘팅을 실시하여 지열정의 안정성을 확보함
- 12.25 inch Section에서 화강섬록암이 출현(2,356 m)하였고 암종 경계부의 불안정성을 고려하여 약 50 m 더 굴진하여 2,406 m 부분에서 9 5/8 inch Casing을 설치함
- Cementing은 지열정 공벽 안정화를 위해 중요한 작업 중 하나로 Cementing program을 바탕으로 넥스지오에서 직접 수행함. 또한 지표에서 Cement를 확인하였으며, Cementing bond를 확인 후 8.5 inch Section 굴진 시 Top-bottom plug와 Float collar-shoe 조각을 확인함

- Casing 및 Cementing 종료 후 일정 압력 하에서 BOP 밀폐 여부 확인을 위한 BOP pressure test를 1,200 psi까지 수행하였으며, 2,400 m 하부 원지반에서 일정 압력 하의 누수 여부를 확인하여 시추 운영 중 최대 허용 가능한 Mud weight 확인을 위해 Leak off test를 500, 750, 1,000 psi의 3단계로 진행하여 최대 Mud weight는 1.45 G까지 가능함을 확인함

나. 광주 심부지열 실증 시추 연구개발

○ 사업개요

- 아시아권 최초의 비 화산권 3.5 MW 이상급 지열발전소 건설을 목표로 (주)한진디엔비의 기술인 워터해머 시추 기술을 이용하여 3.5 km 이상의 시추공을 굴착하여 지열발전소 건설의 타당성 조사를 위한 실증 시추를 수행함
- 위치 : 광주광역시 북구 서구 치평동 753-1번지
- 현장 규모 : 38 m x 46 m(1,748 m²)



그림 2-3 실증사업이 수행된 선정 부지 항공사진 및 장비 배치 전경

○ 진행과정

- 광주광역시 '심부지열 시추 기술 실증 사업'을 위하여 2012년 초에 전문가 TF팀이 구성되어 4월부터 시추를 위한 사전 작업이 착수되었으며, 2012년 2분기부터 시추기 제작 작업이 착수되어 7월경부터 본격적인 시추 작업이 시작됨
- 심도에 따라 1단계와 2단계로 구분되어 사업이 진행되었으며, 1단계는 2.5 km를 2012년에 시추 완료하는 것을 목표로 하고, 2단계 사업인 심도 3.5 km를 2013년 말에 완료 시추하는 것을 목표로 사업이 진행됨
- 2012년 12월에 1단계 심도 2.5 km 시추가 완료되었고, 시추공에 대한 물리검층은 한국지질자원연구원 용역에 의하여 수행되었음

- 2013년 6월부터 2단계 시추작업이 착수되었고 같은 해 8월 말 3,502 m 시추가 완료되었으며, 2단계 시추공에 대한 물리검층은 미국 SMU 및 Perma Work社가 수행하였고 방위각은 (주)한진디엔비 및 한국생산기술연구원에서 수행함
- 실증시추결과
 - 지층 구성은 GL. 0~24 m까지 토층, 24~34 m까지 연암층, 하부지역은 암반층으로 구성됨
 - 18 m까지는 12 inch 비트를 이용하여 굴착 후 10 inch 케이싱을 설치하였고 38 m까지는 10 inch 비트를 이용하여 굴착 후 8.5 inch 케이싱을 설치하였으며, 심도 3,500 m 지점까지는 8 inch 비트를 이용하여 굴착함

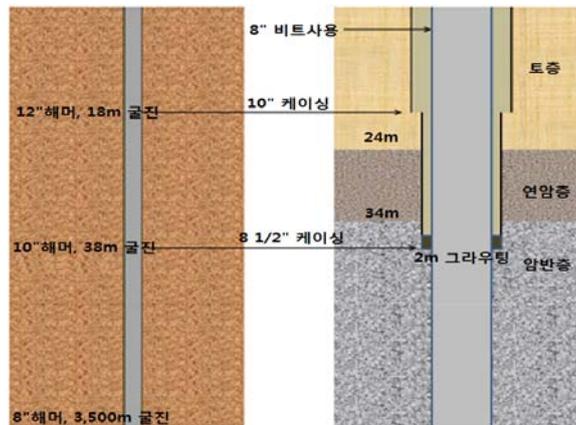


그림 2-4 광주 3.5 km 시추 지층 구성 및 케이싱

- 시추속도

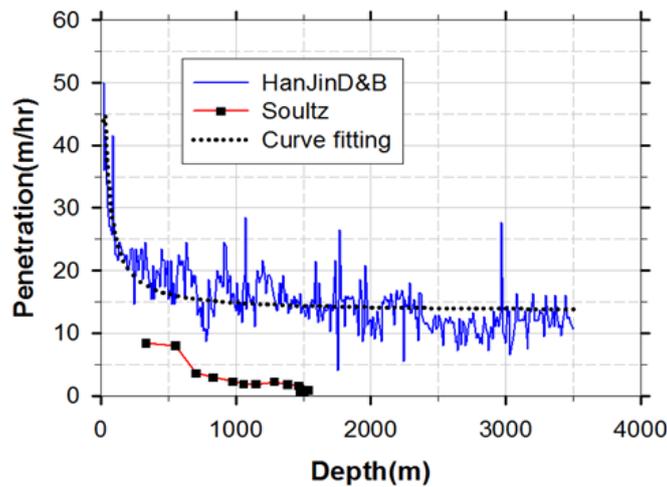


그림 2-5 시추속도 상대 비교

- 시추속도 분석결과 워터 해머 비트를 이용한 광주 심부지열 실증 시추 연구개발의 시추속도가 프랑스 Soulz project보다 약 12~15배 빠르게 나타남

다. 울릉도 지열발전 타당성 조사 사업

○ 사업개요

- 울릉도 지열발전 예비 타당성 조사는 「울릉도 녹색섬 조성 종합계획 수립 연구」의 일환으로 울릉도의 지열 자원 조사를 위한 지열 기초 조사를 실시하고 지열발전 예비 타당성에 대한 검토를 수행함
- 울릉도는 육지에서 전기가 공급되지 않아 전력수요의 대부분을 자체 화력발전에 의존하고 있음
- 관광자원으로서의 가치가 점점 높아지게 되면 전력의 수요도 따라서 늘어나게 되지만, 발전에 필요한 연료의 수송비용과 더불어 소규모 발전이 가지게 되는 열악한 경제성 등의 문제가 점차 커질 것이고 또한 환경적인 면에서도 점점 불리해질 것임
- 가능한 한 신재생에너지를 이용한 전력 공급의 필요성이 커지고 있는 실정이며, 울릉도는 화산섬이기 때문에 발전에 유용한 지열자원이 부존하고 있을 것이라는 기대에 힘입어 지열발전의 가능성 여부가 검토됨
- 울릉도의 지열발전 가능성 검토를 위해 지질특성분석, 500 m 심도의 시추조사 2공 및 온도검층을 통한 열물성분석 등 제반 현장조사를 수행하여 울릉도의 지열부존 여부를 파악함



그림 2-6 울릉도 내 조사 시추공(GH-1, GH-2) 위치

○ 타당성 조사결과(시추조사)

- 경상북도 울릉군 도동리 저동천 부근(GH-1 조사공)과 울릉군 서면 태하리 697 서달천 부근(GH-2 조사공)의 심부지열시추조사를 실시함
- 조사심도는 GH-1이 600.1 m이고, GH-2는 5,000.1 m임. GH-2 조사공은 1차로 360.1 m까지 굴진하였으나 상부 구간의 계속되는 공벽 붕괴와 함몰로 인하여 더 이상의 굴진이 진행되지 못하고 암반의 강도가 매우 낮아 그라우팅 공법 병행으로 공벽 유지에 상당한 어려움을 겪음. 이를 위한 대책을 수립하고 N케이싱을 360 m 심도까지 설치한 후 작업을 수행하였으며 이로 인하여 조사기간의 연장이 불가피 하였음. 약 3개월간의 작업 끝에 당초 목표와 같이 500 m 굴진을 완료함

- 울릉도 내 시추 조사공 GH-1, GH-2에 대한 지층구성은 다음과 같음

표 2-7 울릉도 조사 시추공 지층 구성

GH-1		GH-2	
심도	지층구성	심도	지층구성
0.0~9.5 m	표토 및 봉적층	0.0~15.5 m	봉적층
		15.5~49.9 m	응회암
9.5~600.1 m	현무암 (각력암, 혼돈각력암 포함)	49.9~79.1 m	화산쇄설성 역암
		79.1~89.6 m	응회각력암
		89.6~104.2 m	반상조면암
		104.2~188.7 m	응회암, 라필리응회암 및 응회각력암 혼재대
		188.7~193.4 m	응회암
		193.4~500.1 m	현무암

- 울릉도 내 조사 시추공 GH-1, GH-2 조사결과 지층구성은 응회암류와 각력암을 포함하고 있으며 하나의 흐름단위(Flow unit)로 구성되어 반복적으로 나타나는 경향을 보임
- 타당성 조사결과(지온증가율)
 - GH-1 시추공 조사결과
 - 수위의 극심한 변화로 인하여 천부에서의 온도는 측정 시기별로 차이가 있으나 시추공 바닥(600.2 m)에서의 최종온도가 73.79℃로 매우 높게 나타나고 있음. 온도 증가가 선형적인 양상을 보이는 구간의 지온증가율은 약 95 °C/km로 매우 높으며 이는 지층의 열전도도를 1.2 W/m·k으로만 잡아도 114 MW/m²의 지열 열류량으로 환산되어 해양 지각의 평균 지열류량 값에 해당함
 - 이 결과는 화산활동이 이미 오래전에 끝나고 해수에 의해서 열원의 온도가 충분히 식었을 것이라는 예상과 달리 상당한 양의 지열자원이 부존하고 있을 수도 있음을 지시함
 - GH-2 시추공 조사결과
 - GH-2 시추공은 단층 파쇄대가 많이 발달하여 시추 굴진에 매우 어려움을 겪을 정도로 지반 상태가 불량한 지역으로 2회에 걸친 물리검층에서 GH-1 시추공과 달리 큰 지하수위 변화를 보이지 않아(시추 이수의 영향일 수 있음) 온도검층 결과는 대동소이하나 시추 이수의 영향으로 온도증가가 완전한 선형성을 보이지는 않음
 - 검층가능한 시추공 바닥(깊이 497.04 m)에서 66.11℃를 보여서 지온증가율은 GH-1 시추공과 마찬가지로 95 °C/km 수준의 매우 높은 값을 보임

라. 제주 지열발전 프로젝트

- 신재생에너지 발전 계획
 - 제주도는 오는 2030년까지 신재생에너지 발전시설 규모를 4,311 MW로 확대해 도내 사용 전력사용량(2030년 기준 1만 1,334 GWh)을 대체할 계획을 수립 중에 있음

- 현재 신재생에너지 발전 계획을 보면 지열·연료전지·해양에너지가 550 MW, 육상풍력 1,900 MW, 해상풍력 450 MW, 태양광 1,411 MW를 나타냄
- 지열 분포 조건
 - 64 ± 14 MW/m²의 평균 지열류량은 한반도에 대해 추정된 수치로 지열유량은 25.7 °C/km의 평균 지온경사도에 일치함
 - 다양한 암종에 관하여 퇴적암 분포지역에서 가장 높은 열류량이 측정되는데 반하여 마그마기원 화산암과 변성암 분포지역은 중~저열류량의 수치를 보여주는 경향임
 - 암석의 연령대에 따른 열류량은, 젊은 연령의 신생대 암석이 일반적으로 높은 열류량을 보였고, 중생대와 고생대 암석은 중간, 선캄브리아기의 암석은 가장 낮은 지열류량을 보임
- 제주 지열발전 단계별 추진 계획
 - 제주 지열발전 단계별 추진 계획은 크게 ① 지열발전소 건설 타당성 조사 단계, ② 10 MW급 지열발전소 건설 단계로 나누어짐
- ① 지열발전소 건설 타당성 조사단계는 사전 타당성 조사, 예비 타당성 조사, 탐사공 시추 조사로 나누어지며 그 내용은 다음과 같음
 - 사전 타당성 조사 : 지열발전소 건설부지 선정, 기술적 타당성 검토,
지열발전소 건설 계획 수립
 - 예비 타당성 조사 : 지열발전소 경제적 타당성 검토, 정부지원 국책사업 결정 여부
 - 탐사공 시추 조사 : 심부탐사공(3,000 m 이상) 시추, 탐사공 물리탐사 및 분석
지열발전 시스템 기본 설계
- ② 10 MW급 지열발전소 건설 단계는 지열공 관측시스템 설치 운영, 주입공 및 생산공 총 6개공 시추, 지열수 순환시스템 완공, 10 MW급 지열발전 플랜트 건설로 나누어지며 그 내용은 다음과 같음
 - 지열공 관측시스템 설치 : 심부지열공 시추 준비, 지열발전소 부지 토목공사,
모니터링 시스템 설치 운영
 - 주입공 및 생산공 총 6개공 시추 : 주입공(5,000 m) 2개 시추
생산공(5,000 m) 2개 시추
주입공 및 생산공 공벽안정화
인공 수리자극 시스템 설계
 - 지열수 순환시스템 완공 : 인공 지열저류층 생성, 지열수 순환시스템 확보
지열수 순환 양수테스트 진행
 - 10 MW급 지열발전 플랜트 건설 : 지열발전 플랜트 선정 및 발주
지열발전 시스템 엔지니어링
10 MW급 지열발전 플랜트 건설, 시험발전 운영

제 2절 해외 기술개발 현황

- 유럽 내 28개 국가에서 고온의 지열 에너지를 공간 난방, 지역난방, 온실 등에 직접 이용하고 있음
- 지열 발전은 이탈리아, 아이슬란드, 러시아, 터키 프랑스 등에서 주를 이루며, 직접 이용은 스웨덴, 아이슬란드, 터키, 헝가리, 이탈리아, 스위스, 노르웨이 등에서 주로 이용하고 있음⁵⁾

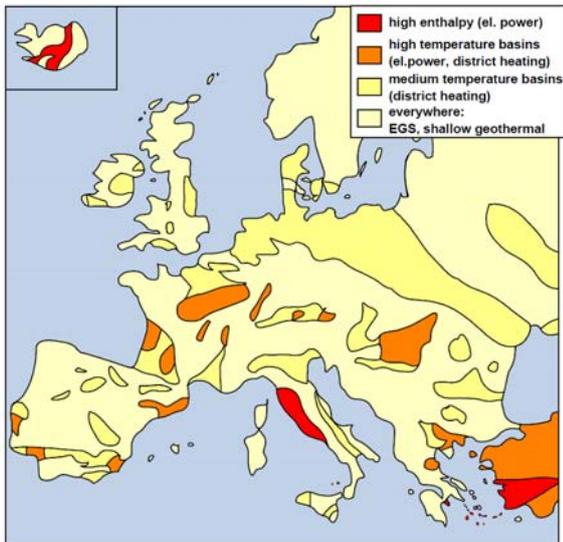


그림 2-7 유럽 주요 지열 열원 분포

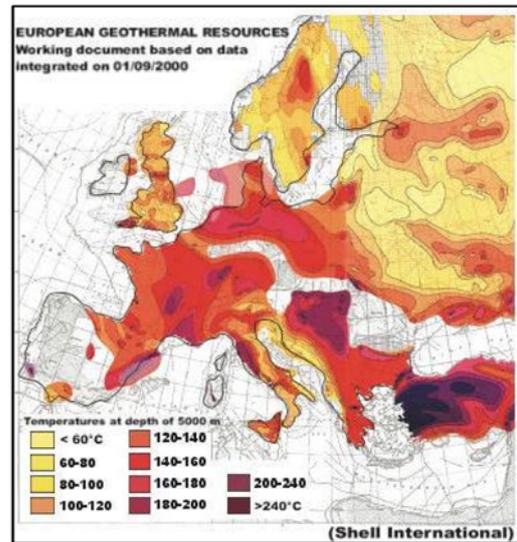


그림 2-8 심도 5,000 m 온도 분포

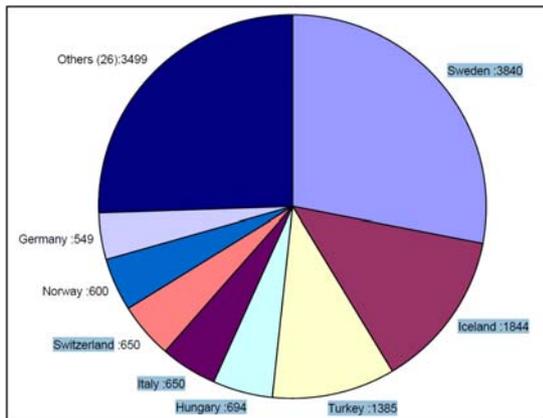


그림 2-9 유럽 국가별 지열 에너지 이용 분포도

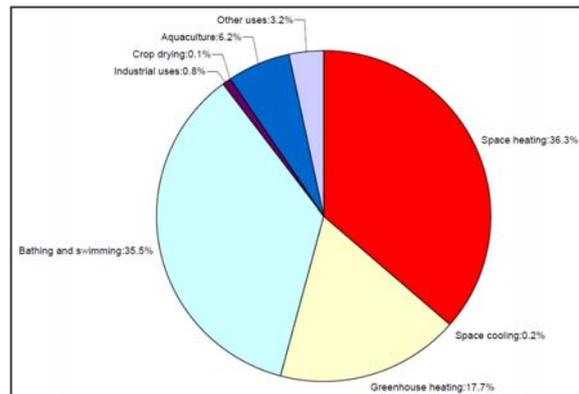


그림 2-10 지열 에너지 사용 분포도

5) Antics and Snnner, 'Status of Geothermal Energy Use and Resources in Europe', Proceedings European Geothermal Congress 2007

1. 이탈리아

- 최초의 지열 발전에 대한 연구는 이탈리아의 Prince Gionori Conti가 1904년에서 1905년 사이에 하였으며, 최초의 상용 지열 발전소(250 kWe)는 1913년 이탈리아의 Larderello에서 가동함
- 2014년 이탈리아 지열 직접이용 보급 용량은 1,355 MWth이며, 연간 사용량은 11,065 TJ/yr로 평균 0.26의 설비이용률을 보임
- 이 중 온실 난방 보급 용량은 69 MWth, 연간 사용량은 1,927 TJ/yr로 평균 0.33의 설비이용률을 보임⁶⁾

표 2-8 이탈리아 심부지열 온실 적용 사례⁷⁾

온실 지역	온실면적 (ha)	온도(°C)		가동		공급 에너지 (TOE/yr)
		공급	환수	유량 (m ³ /hr)	운전 시간 (hrs/yr)	
아미아따	23	90	50	1,000	3,000	13,000
판따니	18	5	35	1,100	2,000	3,500
갈지그나노	3	63	35	120	3,000	1,200
로디고	1	59	38	40	4,000	400
이 외	7	-	-	-	-	2,900
계	52	-	-	-	-	21,000



그림 2-11 이탈리아 심부지열 온실 현장 위치

6) Conti et al., 'Geothermal Direct Uses in Italy: Country Update for WGC2015', Proceedings World Geothermal Congress 2015

7) Carella and Sommaruga, 'Italian agricultural uses of geothermal energy', Bulletin d'Hydrogeologie NO 17, 1999

2. 그리스

- 북동그리스 및 에게해에서 지질구조학적으로 화산활동이 이루어짐으로써 생성된 퇴적층에 높은 수준의 지열 흐름을 갖고 있음(>80 mW/m²)
- 1980년대 초부터 북쪽 지역을 중심으로 지열을 온실에 적용하였으며, 2009년 약 21 ha의 온실에 지열을 이용하여 난방하고 있음
- 주요 작물로는 토마토, 완두콩, 오이, 파프리카 등이 있으며, 원예작물로는 장미, 백합, 국화 등이 있음

표 2-9 그리스 심부지열 온실 적용 현황(2008-2009)⁸⁾

위치	온실면적(ha)	가동			공급 에너지 (TJ/yr)
		유량(kg/sec)	공급온도(°C)	용량(MWt)	
Nigrita	3.80	54.0	37-52	3.80	38
Sidirokastro	2.90	55.0	37-63	3.30	40
Langadas	3.90	25.0	35-37	1.44	15
Nea Apollonia	5.70	63.0	32-46	4.03	44
Neo Erasmio	0.40	4.0	60	0.52	5
Islands of Lesvos	4.40	69.0	46-85	11.70	120
계	21.1	270	32-85	24.79	262

3. 미국 뉴멕시코

- 지열에너지를 이용한 온실 난방 중 미국에서 가장 큰 온실은 32 acre(약 13만 m²) 면적에 장미를 재배하는 Burgett 온실로 1,402 m에 위치한 118°C 열원을 이용함
- 뉴멕시코대학에 위치한 Southwest Technology Development Institute는 심도 305 m 64°C의 열원을 이용하여 0.3 acre(1115 m²)의 온실에 난방을 공급함

표 2-10 미국 뉴멕시코 지역 심부지열 온실 현황⁹⁾

농장명	지역	적용면적 (acre)
Southwest Technology Development Institute @ NMSU	Doña Ana	0.3
Masson Radium Springs Farm	Doña Ana	16
Burgett Geothermal Greenhouse	Hidalgo	30
AmeriCulture Tilapia Farm	Hidalgo	-

8) Andritsos et al., 'Geothermal Activities in Greece During 2006-2009', Proceedings World Geothermal Congress 2010

9) The New Mexico Bureau of Geology and Mineral Resources, 'Geothermal Energy in New Mexico', 2006

- Masson 지열 온실 사례 (Radium Springs, New Mexico)
 - 미국에서 3번째로 큰 지열 온실(18 acres)
 - 열생산 가능용량 : 30×10^6 Btu/hr (8.8 MWt)
 - 열생산 가능용량의 30%를 생산하고 있음
 - 연평균 에너지 사용량 : 79×10^9 Btu
 - 겨울철 심부지열 생산 (최대 800 ft) - 195°F at 750 gpm
 - 천부지열 (최대 325 ft)
 - 겨울 - 165°F at 720 gpm
 - 여름 - 165°F at 430 gpm
 - 1987년 4 acres 면적에 지열을 공급하였으며 향후 40 acres에 지열을 공급할 예정임
 - 온실 열공급 뿐만 아니라 binary-cycle 발전에 사용할 수 있는 열원이 존재함



그림 2-12 지중열원과 온실이 연결된 판형 열교환기

4. 네덜란드

- 2007년 처음으로 굴착 깊이 700 m의 심부지열 프로젝트를 수행함
- 2008년 심부지열을 이용 온실 난방 공급을 위하여 장심도 시추를 수행하였으며, 온실 작물로 토마토를 선정하여 4만 2천평에 난방을 공급함
- 2014년까지 총 13개의 심부지열공 굴착을 수행하였으며, 시추공 온도는 60°C(1,600 m)에서 87°C(2,900 m) 분포를 보임
- 2014년 심부지열공 열 생산량은 445 GWth(1,600 TJ)임¹⁰⁾

10) Heekeren and Bakema, 'The Netherlands Country Update on Geothermal Energy', Proceedings World Geothermal Congress 2015

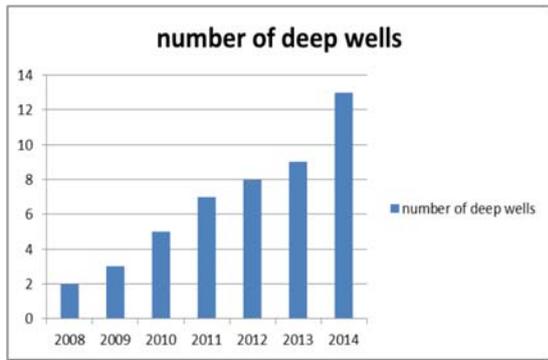


그림 2-13 네덜란드 심부지열공 수

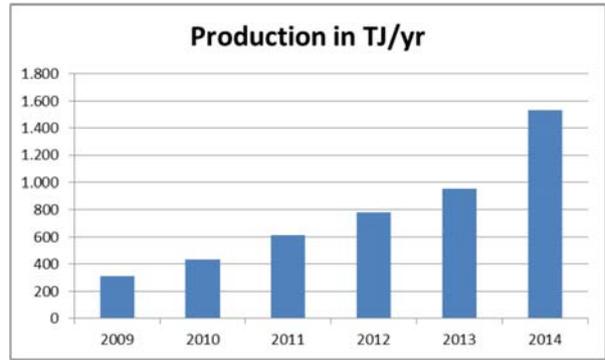


그림 2-14 네덜란드 심부지열 생산량

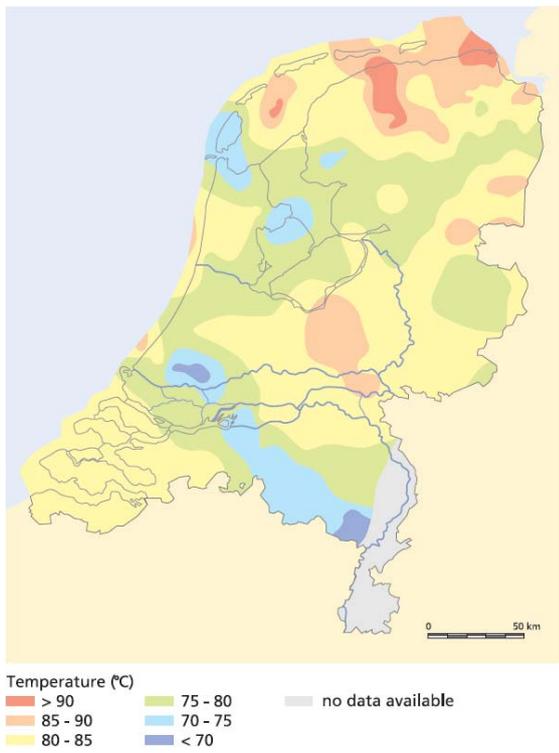


그림 2-15 네덜란드 지열 분포도¹¹⁾

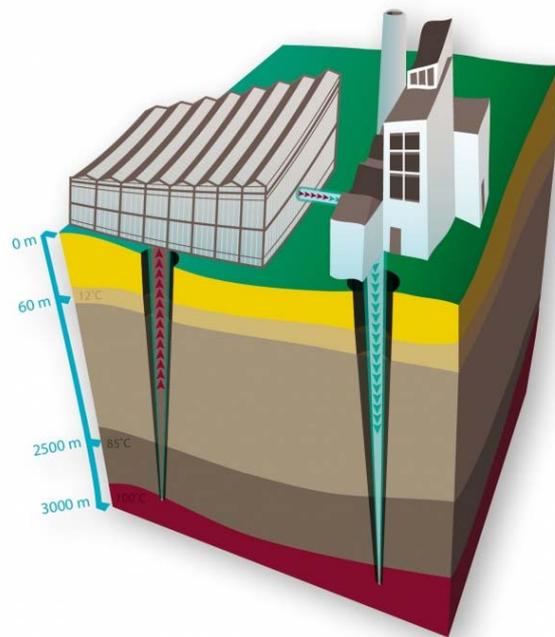


그림 2-16 네덜란드 와인스퀘어 개념도

11) Wong et al., 'Geothermal Energy', Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, 2007

표 2-11 네덜란드 심부지열 온실 적용 사례

현장명	적용처	시스템
와인 스퀘어	<ul style="list-style-type: none"> 포도 재배(2.3만평) 와인 제조 직원 아파트 25세대 	<ul style="list-style-type: none"> 2,200m 2공(S-R) 80℃ 공급 11MWt 열병합발전소
Green Well Land	<ul style="list-style-type: none"> 조합 복합단지 	<ul style="list-style-type: none"> 3,200m 2공 분리@2,800m 85℃@2,400m 2112년 준공 지열설비 1,800평
A&G Van Den Bosch	<ul style="list-style-type: none"> 토마토 15만평 	<ul style="list-style-type: none"> 1,700m(2공) 60℃ 공급 130~160 m³/hr
Ammerlaan TGI	<ul style="list-style-type: none"> 화초 토양/수경 재배 1.3만평 	<ul style="list-style-type: none"> 2,100m 70℃ 공급
Koekoekspolder	<ul style="list-style-type: none"> 조합 복합단지 21만평 	<ul style="list-style-type: none"> 2,457m
Floricultura	<ul style="list-style-type: none"> 난초 4만평 	<ul style="list-style-type: none"> 시추 중
ECW	<ul style="list-style-type: none"> 지역난방 주변온실 공급 	<ul style="list-style-type: none"> 2,200m 75℃ 공급 시추 중

5. 국외 제품생산 및 시장 현황

- 2000년대 이후 세계 지열직접이용을 활용하는 양이 급속도로 증가하고 있음

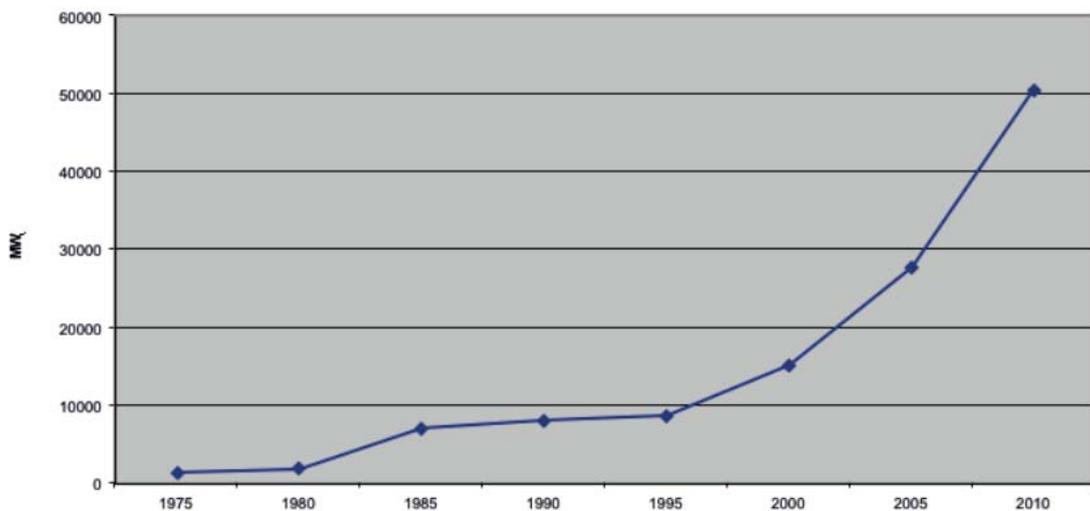


그림 2-17 세계 지열직접이용 현황¹²⁾

○ 이중 지열직접이용 기술은 아래의 표와 같이 유럽 내 28개 국가에서 사용

표 2-12 유럽 내 국가별 지열 직접 이용 현황

국가	보급 용량	사용량	설비이용률	비고
	MWt	TJ/yr	-	
오스트리아	352.0	2,229.9	0.20	실내난방/열펌프
벨기에	63.9	431.2	0.21	온실/열펌프
불가리아	109.6	1,671.5	0.48	실내난방/온실
크로아티아	114.0	681.7	0.19	실내난방/온천
체코	204.5	1,220.0	0.19	온천/열펌프
덴마크	330.0	4,400.0	0.42	지역난방/열펌프
핀란드	260.0	1,950.0	0.24	열펌프
프랑스	308.0	5,195.7	0.53	지역난방/열펌프
조지아	250.0	6,307.0	0.80	
독일	952.0	6,060.0	0.18	지역난방/열펌프
그리스	74.8	567.2	0.24	온실/온천
헝가리	694.2	7,939.8	0.36	온실/지역난방/온천
아이슬란드	1,844.0	24,500.0	0.42	지역난방/온실/산업용
이탈리아	650.0	8,000.0	0.39	지역난방/온실/산업용
리투아니아	21.3	458.0	0.68	열펌프
마케도니아	62.3	598.6	0.30	온실
네덜란드	253.5	685.0	0.09	열펌프
노르웨이	600.0	3,085.0	0.16	열펌프
폴란드	210.0	1,108.0	0.16	온실/온천
포르투갈	30.6	385.3	0.40	지역난방/온실/온천
루마니아	145.1	2,841.0	0.62	실내난방/온실/산업용
러시아	308.2	6,143.5	0.63	실내난방/온실/산업용
세르비아	88.8	2,375.0	0.85	실내난방/온실/온천
슬로바키아	187.7	3,034.0	0.51	실내난방/온실/온천
슬로베니아	49.6	729.6	0.47	실내난방/온실/온천
스웨덴	3,840.0	36,000.0	0.30	열펌프
스위스	650.0	5,500.0	0.23	열펌프/온천
터키	1,385.0	24,000.0	0.53	지역난방/온천
유럽 기타	75	637.5	-	지역난방/열펌프
합계	14,114.1	158,734.5	-	-

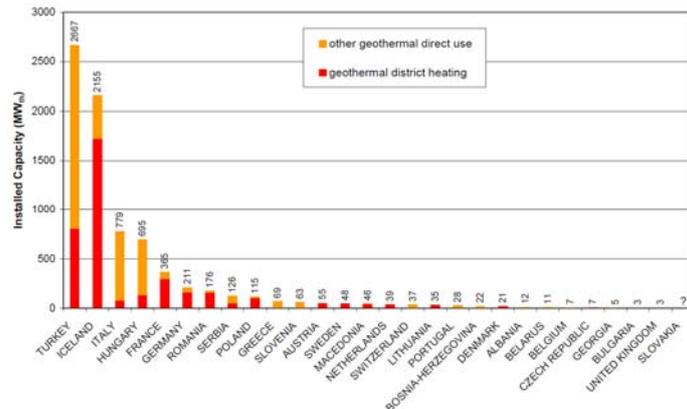


그림 2-18 유럽 지열직접이용 및 지역난방 현황13)

12) World Energy Resources, 'Geothermal', 2013

13) Danube Region Strategy energy, 'Danube Region Geothermal Report', 2014

제 3절 국내외 개발기술 차이점

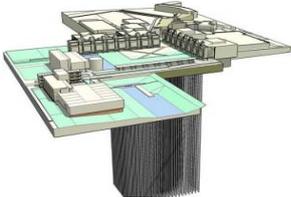
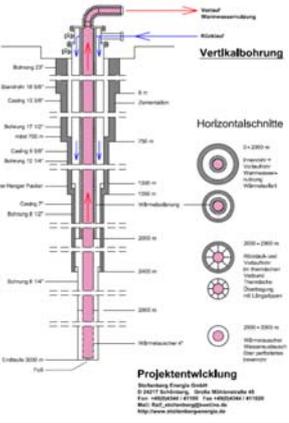
1. 기술개요

- 금회 적용된 심부지열 직접 열활용 기술은 단일 시추공(Single well)에 동축(Co-axial) 형태로 생산파이프를 설치하여 파이프의 외벽과 시추공 케이싱 사이를 통해 열매체가 지하 심부로 이동하면서 지반이 가지고 있는 열을 추출하고 이에 의해 뜨거워진 열매체를 시추공 중심에 설치된 생산파이프를 통해 지상으로 양수하여 심부지열을 직접 활용하는 기술을 말함

2. 기술 적용 사례

- 대표적인 사례로 독일의 Prenzlau 지열플랜트, Arnsberg 수영장 시설, Aachen 공대 (RWTH Aachen) 시설 설비, 스위스 Weggis DBHE 지열플랜트에 적용되어 단일공 동축 (Single well Co-axial) 형태로 설치되어 운영되고 있음
- 또한, 심부지열을 이용한 온실적용 사례는 유럽(이탈리아, 네덜란드, 그리스 등) 및 미국 뉴멕시코 지역을 중심으로 설치 운영되고 있음

표 2-13 시추방식에 따른 특성

Prenzlau 지열플랜트	Arnsberg 수영장	Aachen 공대	Weggis DBHE 지열플랜트
 	 		
이탈리아(Tuscany)	네덜란드(ECW)	그리스(Neo Erasmio)	뉴멕시코(Masson)
			

3. 기존(외국) 개발 기술과의 차이점

- 기존(외국) 개발 기술과의 차이점은 지중열교환기(Borehole heat exchanger, BHE) 시공을 위한 시추방식과 Inner pipe 적용에 있음

가. 시추방식

- 심부지열 직접 열활용을 위한 장심도 시추방식에 대한 기술적 차이점은 다음과 같음
 - 회전수세식(Rotary wash) 시추방식은 현재까지 널리 쓰이고 있는 대표적인 시추방식으로 드릴파이프(Drill pipe)의 회전력을 트리콘비트(Tricone bit)에 전달하여 높은 회전력을 이용한 시추방식에 해당함
 - 이에 반하여 금회 적용된 시추방식은 워터해머 시추(Water hammer drilling) 기술로 150 bar 이상 고압의 물을 이용하여 워터해머부 피스톤의 왕복운동을 통한 비트 타격으로 암반을 시추하는 기술을 말함
 - 다음은 시추방식에 따른 특성을 보여주는 표를 나타냄

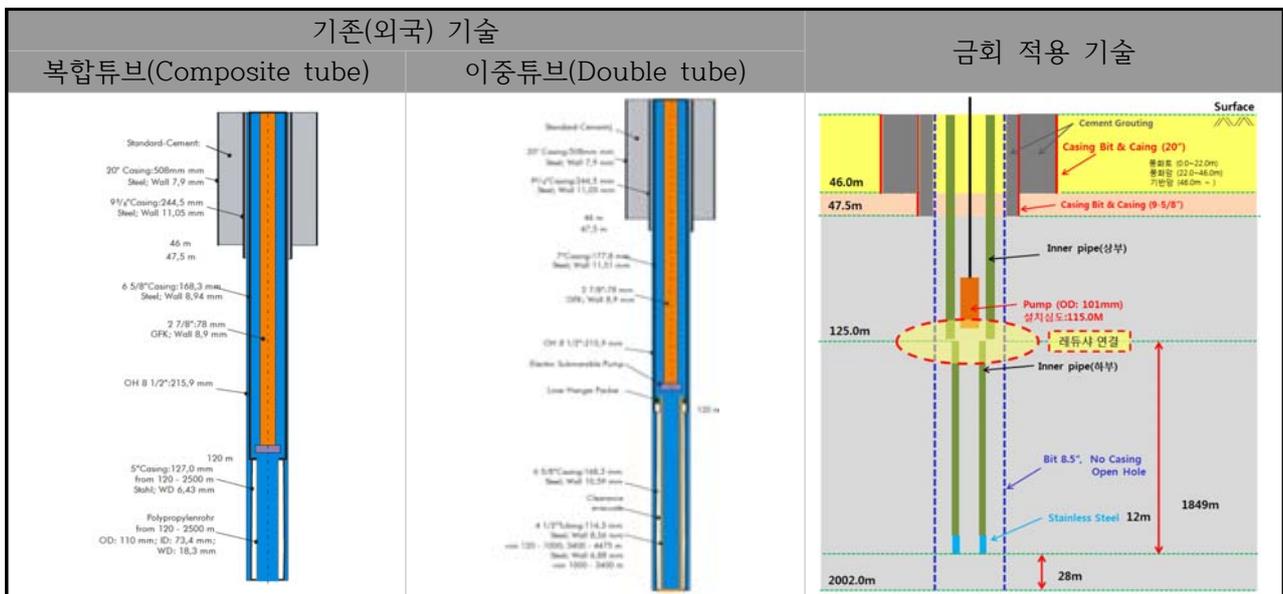
표 2-14 시추방식에 따른 특성

구 분	Rotary Wash Drilling	Water Hammer Drilling
모식도		
개 요	<ul style="list-style-type: none"> • 드릴파이프로 회전력을 트리콘 롤로 비트에 전달하여 시추 • 시추이수는 파이프, 비트를 거치며 냉각 및 암편제거 	<ul style="list-style-type: none"> • 해머구동에 필요한 에너지가 파이프를 통해 수압으로 전달 • 최대 180 bar의 수압펌프로 해머작동 및 공내워싱
장 점	<ul style="list-style-type: none"> • 높은 회전력 이용 가능 • 굴진속도 제어 용이 • 공내 암편 제거 용이 	<ul style="list-style-type: none"> • 높은 굴진속도 구현(0.5 ~ 40 m/min) • 장심도 시추에 우수 • 연료소모량 50% 이상 절감 • 친환경, 청결한 작업조건
단 점	<ul style="list-style-type: none"> • 공내 압착 시 복구 곤란 • 시공 속도 느림 • 시추비용 매우 높음 • 이수처리위한 대형 Pit 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 작업용수 정화 필요 • 용수량 200 ℓ/min 정도 필요 • 적용사례 빈약

나. Inner pipe 시공

- Inner pipe의 적용기술은 소재(Material) 특성과 생산성·시공성을 종합적으로 고려하여 선정되며, 지질조건(Geological condition)의 온도증온율(Temperature gradient)을 고려한 지열수(Geothermal water)의 온도를 고려하여 적용함을 원칙으로 기술 적용성 및 소재의 차이성은 다음과 같음
 - 기존(외국) 기술의 경우 크게 시추공 내 온도증온율 및 지열수 온도를 고려하여 복합튜브(Composite tube) 방식 [PP(Polypropylene)+steel]과 이중튜브(Double tube)방식 [이중 steel 진공관] 방식을 적용하며 세부적인 시스템 기술로는 유리섬유강화플라스틱(Glass fiber reinforced plastic, GFRP), 진공튜브(Vacuum isolated tube, VIT) 방식이 있음
 - 국내의 경우 단일공 동축(Single well Co-axial) 사례가 처음이며, 국내의 배관 생산업체가 주로 PE 소재를 생산하는 점과 본 과제를 수행하는 나주(羅州) 지역의 시추공 내 온도증온율 및 지열수 온도를 고려하여 시공의 차별화를 보여줌
 - 지중열교환기(BHE)의 Inner pipe 시공은 시추공 내 전열구간 과 단열구간을 고려하여 직경을 달리한 상부 Inner pipe(OD 165 mm, ID 134.4 mm)와 하부 Inner pipe(OD 90 mm, ID 60 mm)를 이용하여 시공하였으며, pipe 연결방식은 열융착방식인 맞대기 용착(Butt fusion)을 적용하여 전체 시추공 심도 2,002 m 구간에서 유공관 12 m를 포함한 1,974 m까지 시공을 실시함
 - 아래 표 2-15는 기존(외국) 기술과 금회 적용 기술에 대한 모식도를 보여줌

표 2-15 기존 기술 및 적용 기술



제 3장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1절 시설원예의 지열난방 현황

1. 농업용 온실의 난방과 신재생에너지

가. 원예시설의 난방

(1) 원예시설의 시작과 가온

- 시설원예는 1600년대 유럽과 네덜란드의 활발한 화훼사업을 중심으로 시작되어 독일, 프랑스 그리고 미국으로 확산되면서 발전한 것으로 알려져 있으며¹⁴⁾, 초창기 플라스틱온실, 유리온실 등 피복재의 진화와 함께 보온과 단열의 방법과 기술도 다양하게 발달되어 왔고, 단순한 온실내부 가온에서 작물육성에 쾌적한 환경을 조성하고 생력화, 에너지절감을 도모할 수 있는 적극적인 난방시설도 개발되고 보급되었음
- 일반적으로 난방설비는 강제열풍식난방기, 대류형난방기, 적외선난방기, 태양열난방 등이 있고 사용에너지는 경유, 석유, 벙커c유, 연탄, 석탄, 나무, 전기 등이 있으며, 관리적인 측면과 경제성을 고려하고 온실 규모와 지역에 적합하도록 개선되어 왔음
- 한국에서 주로 사용한 난방설비는 경유온수보일러, 벙커C유 온수보일러, 경유온풍기, 축열식 심야전기난방기가 있으며, 일부는 펠릿난방기, 페타이어 온수식 난방기를 설치하고 규모가 작은 온실은 연탄보일러나 난로를 사용하기도 함

(2) 원예시설 현황과 난방

- 한국의 시설원예는 1990년대부터 정부의 시설 현대화 지원정책에 따라 그 재배 면적이 꾸준히 증가하고 있으며, 연중 고품질의 고른 생산을 통하여 경쟁력을 갖춘 농업 분야로 각광받고 있고, 농작물 재배온실의 증가와 함께 동절기 가온에 따른 경유 등 연료소비도 많이 증가됨
- 지식경제부 에너지 총 조사 보고서에 따르면 2007년 기준, 농업분야 에너지 소비량은 2,086천 TOE¹⁵⁾로 그 비중은 석유류 72.7%, 전력 19.4%, 연탄 7.6% 순이며, 그 중 농업용 에너지소비¹⁶⁾의 63.6%가 시설 난방에 사용됨
- 2012년 기준, 1차 에너지 대비 국가 전체에서 신재생에너지의 비중은 3.2%로 선진국에 비하여 많이 낮은 수준으로 평가받고 있어, 기후변화에 대응하고 에너지 공급원의 다양화를 위해 정부에서는 많은 예산과 함께 정책지원에 대한 노력을 진행하고 있지만, 농림수산식품부 통계자료¹⁷⁾에 의하면 2012년도 화훼와 채소에 대한 원예시설 면적은 총 56,095 ha이며, 이중 37%인 20,975 ha가 연료 등을 사용하여 동절기 가온을 하고 있는데, 가온하는 원예시설에서 사용하는 에너지의 66%가 유류를 사용하고 있었으며, 신재생에너지를 이용하는 경우는 1%로 매우 낮은 것으로 나타남

14) PAUL V. NELSON, 'GREENHOUSE Operation and Management' PRENTICE HALL, 1991.

15) Tonnage of Oil equivalent, 석유환산톤

16) 에너지경제연구원, 면세유 자료, 농협중앙회, 2008.

17) 농림축산식품부 홈페이지(<http://library.mafra.go.kr/skyblueimage/15939.pdf>)통계자료발췌, 2014.12.

표 3-1 2012년 원예시설 재배면적(ha)과 사용에너지

구 분	합 계	무가온	가 온					
			계	고체연료	유류	신재생	가스	전기
화 훼	2,674	342	2,332	224	1,968	22	1	117
채 소	53,421	34,778	18,643	5,990	11,885	105	41	622
계	56,095	35,120	20,975	6,214	13,853	127	42	739
비 율	100%	63%	37%					
			100%	29%	66%	1%	0%	4%

- 원예시설 농가는 정부지원으로 난방용 면세경유를 이용하고 있으나 국제유가에 따라 경제적 부담이 크며, 특히 총 경영비 중 난방에 지출되는 비용은 대상 작물에 따라 약 19~58%로 상당 부분을 차지하고 있어 농업경쟁력을 약화시키는 요인으로 작용하고 있음
- 표 3-2와 같이 국내 농업전체의 에너지소비량의 63.6%를 시설원예의 난방에서 소비하는 것으로 조사되어, 개선 대책이 마련되어 추진하는 경우 그 효과도 대단히 클 것으로 예상됨
- 따라서 농가의 에너지비용 저감과 난방 에너지원의 약 92%가 외국에서 수입하는 유류로 의존하고 있는 현실을 감안할 때 시급히 안정적이고 환경 친화적인 에너지 공급방안이 필요하며, 이에 대한 대안으로 최근 정부의 적극적인 지원과 함께 지열히트펌프시스템 등 신재생에너지를 이용한 온실의 난방방법이 개발되고 다양하게 적용하고 있으나 더욱 효과적인 방안도 모색되어야 함

표 3-2 농업용 에너지 소비량

사 용 처	사용량(kℓ)	용도 별 비율
시설난방	1,256,000	63.6%
농 기 계	685,000	34.7%
기 타	34,000	1.7%
계	1,975,000	100.0%

나. 원예시설의 신재생에너지 보급

- 신재생에너지 중 하나인 지열히트펌프시스템은 1970년대 이후 제1차 석유파동에 따른 대체에너지로 유럽과 미국 등 선진국에서 건축물 난방에너지원으로 개발하여 활발히 상용화 및 보급이 시작됨

- 한국의 경우 대체열원에 대한 관심부족과 초기투자비가 많이 드는 점 등으로 보급과 이용이 저조한 편이었으나 화석연료의 사용저감을 통한 기후변화대응과 농가 난방비용을 절감하기 위해 2010년부터 정부의 적극적인 지원으로 원예시설에서의 지열히트펌프시스템을 적용하는 난방설비가 2009년 520억 원을 시작으로 2010년부터 매년 5배 이내씩 확대 보급됨¹⁸⁾
- 지열히트펌프 난방시설비의 80%를 정부에서 지원하기 때문에 시설도입 농가의 부담을 많이 덜어주었으며, 기존의 면세유 경유보일러나 온풍기에 비하여도 절반이상 난방운전비가 절감되고 있다는 것은 지열히트펌프 사용농가들의 일반적인 공통 의견이며, 설비의 운전, 관리상 편리함이 큰 것이 장점임
- 그렇지만 천부지열을 이용하는 지열히트펌프 난방시스템이 난방에너지의 절약의 효과가 있지만 온실에서 필요로 하는 온도와 열량까지 끌어올리기 위해서는 지열히트펌프의 가동이 반드시 필요하며, 전기에너지가 많이 소요되는 것은 단점임
- 그러나 원예시설 농가에서 사용하는 지열히트펌프시스템의 전기사용량이 많음에도 불구하고 전기사용요금이 낮은 것에는 기본적으로 상대적으로 값이 싼 농사용 전력요금을 적용받고 있기 때문에 농사용 전력요금은 일반용 전력요금에 비하여 절반 정도로 설비 운전에 따른 난방비용을 낮추는 중요한 요소로 작용함
- 2010년부터 정부와 한국농어촌공사에서 추진하는 지열히트펌프시스템을 이용한 ‘농업에너지이용효율화사업’의 2014년까지 보급 설치된 총 규모는 132.8 ha의 원예시설에 108,467 kW의 지열난방시스템이 설치됨¹⁹⁾

표 3-3 전국 연도별 지열시스템 설치현황

구 분	2010년	2011년	2012년	2013년	2014년	합 계
설치용량(kW)	41,896	26,483	18,577	15,655	5,856	108,467
면적 (ha)	59.2	28.9	22.3	16	6.4	132.8
농가수(호)	72	56	43	23	7	201

- 지열히트펌프시스템의 지역별 설치규모는 표 3-4 에서와 같이 경기, 전북, 전남, 충남, 제주 순으로 크며, 이들 5개 지역이 전체의 81.9% 차지함
- 다른 지역에 비하여 기온이 낮은 강원도의 경우 난방비용이 가장 많이 소요될 것으로 예상되어 신재생에너지에 대한 관심이 높을 것으로 추정됨에도 불구하고 지열히트펌프 난방시스템의 보급실적은 가장 낮은 것으로 조사됨

18) 류연수, ‘원예시설의 보일러와 지열난방시스템 부하분담에 관한 연구’, 농어촌연구원, pp. 8-12, 2012.

19) 박미란 외2, ‘재배작물 및 지역별 온실의 지열 냉난방 시스템 조사 분석’ 한국태양에너지학회 추계학술대회, 2014.11.

표 3-4 지역별 지열시스템 설치현황

구분	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	제주	합계
설치용량 (kW)	20,334	740	1,597	12,881	25,845	17,191	6,761	9,840	13,278	108,467
면적 (ha)	26.7	1.0	1.5	14.4	27	23.8	8.6	11.6	18.2	132.8
농가수 (호)	48	1	4	26	26	27	20	18	31	201
평균면적 (ha)	0.56	1	0.37	0.55	1.04	0.88	0.43	0.65	0.59	0.67

2. 지열난방설비의 에너지사용량

가. 지열난방 운용현황 조사

- 지열히트펌프시스템에 의한 난방비용을 추정하기 위해 히트펌프의 규격과 소비전력, 전력사용량과 전력요금에 대하여 22개 농가시설 방문조사를 수행함
- 지열히트펌프의 운전에 따른 전기에너지소비량을 확인할 수 있는 한국전력공사 발행 전기요금 명세서나 관련 기록 장부 등에 대하여는 8개 농가가 자료를 제공하여 주었으며, 나머지 농가는 관련 설비의 제원을 위주로 조사함
- 피복재 및 면적에 의한 유형별 조사온실 비율
 - 비닐 : 유리 = 70% : 30%
 - 면적 : 10,000 m²이상의 대형온실은 4개소

인용번호	GT-WWH-1-0087	냉방용량	NW12-25/15 107/117 kW
MODEL	AHP-1LX314G	제 냉방전력	24 / 21 kW
압정냉동용	12.87 RT	EER	4.39 / 5.49
전압	3φ 380V 60Hz	난방능력	NW40-5/10 18 / 135 kW
압축기	— kW	난방전력	31 / 31 kW
전류	— A	COP	—
냉매압력	— MPa	제품크기	X / X
냉매유량	— MPa	사용냉매	—
제조일자	2011	냉매충전량	— kg
		제조중량	— kg

연월	계기	전기요금	기타요금	합계	납부일자	납부금액
2014-11	11.45	35,033	2,047.710	2,047.710	2014-12-01	32.실시간자용
2014-10	0004.45	합산 13,751	804.780	804.780	2014-10-31	32.실시간자용
2014-09	0018.04	합산 9,012	591.010	591.010	2014-09-30	32.실시간자용
2014-08	0021.02	합산 17,213	854.870	854.870	2014-08-31	30.자용이체수
2014-07	0178.29	합산 7,315	513.200	513.200	2014-07-31	31.일시자용
2014-06	0706.06	합산 7,042	502.450	502.450	2014-06-30	32.실시간자용
2014-05	0569.22	합산 17,968	990.390	990.390	2014-06-02	32.실시간자용
2014-04	0567.45	합산 26,651	1,377.400	1,377.400	2014-04-30	32.실시간자용
2014-03	0423.38	합산 34,778	1,739.630	1,739.630	2014-03-31	30.자용이체수
2014-02	0220.54	합산 49,613	2,401.600	2,401.600	2014-02-28	30.자용이체수
2014-01	0157.21	합산 50,423	2,436.930	2,436.930	2014-02-03	30.자용이체수
2013-12	0487.51	합산 41,116	2,014.760	2,014.760	2013-12-31	30.자용이체수

그림 3-1 지열히트펌프 명판 및 전기요금명세서

표 3-5 지열히트펌프시스템 운영 농가 조사현황

지역	피복재	재배작물	규모(m ²)	조사내용
인천	주택	난방	13가구	지열설비
강원	비닐	토마토	10,000	지열설비 및 전기사용량
경기	유리	파프리카	19,800	지열설비 및 전기사용량
경기	비닐	장미	4,125	지열설비 및 전기사용량
충남	비닐	토마토	9,000	지열설비 및 전기사용량
충남	비닐	옥묘	9,900	지열설비
충남	비닐	토마토	2,178	지열설비
충북	비닐	양어장	2,058	지열설비
충북	비닐	미나리	5,600	지열설비
충북	비닐	호접난	2,080	지열설비 및 전기사용량
충북	유리	옥묘	5,125	지열설비 및 전기사용량
전북	유리	파프리카	8,000	지열설비 및 전기사용량
전북	유리	장미	10,000	지열설비 및 전기사용량
전북	유리	딸기	10,000	지열설비
전북	비닐	장비	9,919	지열설비
전북	비닐	장미	6,600	지열설비
전북	유리	파프리카	37,232	지열설비 및 전기사용량
전남	유리	옥묘	7,612	지열설비 및 전기사용량
전남	유리	파프리카	19,800	지열설비
경북	비닐	오이	6,825	지열설비
경북	유리	옥묘	5,000	지열설비 및 전기사용량
경남	비닐	파프리카	7,723	지열설비

나. 조사 온실 전기사용요금 분석

- 방문 조사한 10개 농가의 14개 설비에서 지열히트펌프의 난방용량과 소비전력(kW)을 표 3-6에서 평균을 구하였으며, 이를 토대로 국내 지열냉난방시스템 전체의 소비전력을 산출함
- 지열히트펌프의 난방용량과 소비전력의 비율은 평균 26.8%로 나타났으며, 이를 근거로 2013년까지 보급된 지열히트펌프용량 94,597 kW를 기준으로 한 소비전력은 25,352 kW로 산정함

표 3-6 히트펌프 규격과 소비전력

시설명	지열난방규격(A)	소비전력(B)	비율(B/A)
공주원예	171 kW	46.6 kW	0.272
	145 kW	38 kW	0.261
용인농원	65.2 kW	16.65 kW	0.254
용인화훼	140.3 kW	37.4 kW	0.267
	98.1 kW	32.6 kW	0.332
고양채소	169.3 kW	47.4 kW	0.279
고양화훼	169.3 kW	47.4 kW	0.279
전주화훼	168 kW	45.19 kW	0.269
화천채소	109 kW	27.8 kW	0.255
담양원예	140 kW	40.47 kW	0.289
	183 kW	53.28 kW	0.291
충주육묘	65.8 kW	12.3 kW	0.187
상주채소	135 kW	31 kW	0.230
	140.2 kW	40.47 kW	0.289
평균			0.268143

- 11개 시설원예의 면적(m²)당 연간 전력사용량 : 38.8~184.96 kWth
 - 피복재와 지역 그리고 작물재배 기간과 방법에 따라 차이 발생
- 단위면적당 평균 소비전력은 118.2 kWth/m², 전력요금은 6,095 원/m²임
- 2013년까지 지열히트펌프시스템이 보급된 총 시설원예 면적 116.9 ha의 연간 전기사용량은 138,175,800 kWth로 산정되고, 농사용(을)²⁰⁾로 적용한 난방전력요금은 7,125,055,000원으로 추정됨

20) 한국전력공사, <http://cyber.kepco.co.kr/ckepeco/front/jsp/CY/E/E/CYEEHP00105.jsp#>

표 3-7 지열시스템 연간 전기사용량과 요금

시설명	면적(m ²)	히트펌프	전력사용량	전력요금(원)	비고
공주육묘	5,358	171kW(2) 145kW(1)	554,885kWh	18,730,490	()대수
고양채소	20,000	169.3kW(13)	2,683,610kWh	142,078,850	-
고양화훼	4,125	169.3kW(1) 109kW(2)	314,134kWh	16,397,780	-
전주채소	8,000	162.2kW(4)	991,201kWh	52,706,120	-
논산채소	9,000	61kW(12)	541,429kWh	30,617,370	-
전주화훼	10,000	168kW(6)	1,849,600kWh	98,383,240	-
음성화훼	2,080	65.3kW(4)	258,280kWh	12,180,115	-
화천채소	10,000	109kW(7)	389,000kWh	23,286,100	-
담양육묘	7,612	140kW(3) 181kW(1)	796,372kWh	41,422,810	-
충주육묘	5,125	65kW(8)	566,555kWh	26,892,950	-
익산채소	37,232	709.96kW(5)	3,532,021kWh (5,062,954kWh)	259,703,525	8개월 (1년 추정)
계	118,532	-	14,008,020	722,399,350	-

- 원예시설 운영자의 일반적인 의견은 지열히트펌프를 도입하여 사용한 기간 동안 기존의 경유난방비에 비하여 50%이상 절감효과가 있다고 답하였으며, 부여온실에 대한 조사보고서²¹⁾에서도 53% 난방비용절감이 있는 것으로 분석됨
- 그러나 이러한 난방비용 절감효과에는 원예시설의 지열히트펌프 시스템에 적용되는 농사용 전력요금이 산업용이나 일반용 전력요금에 비하여 절반 정도로 저렴한 요금체제로 인한 영향이 크다고 볼 수 있음
- 지역별 기온과 세부작물과 재배방법, 온실관리방법에 따라 지열히트펌프의 가동시간이 달라져 에너지사용량이 차이가 나겠지만, 가장 작은 사용량과 가장 큰 사용량을 제외하고 작물재배별로 단위면적당 지열히트펌프시스템의 가동에 따른 연간 전기사용량과 전기요금을 비교한 결과는 다음과 같음
 - 육묘장 : 약 105 kWh/m² 내외 (전기요금 4,500 원/m²)
 - 화훼온실 : 115 kWh/m² (전기요금 5,000 원/m²)
 - 채소온실 : 130 kWh/m² 내외 (전기요금 7,000 원/m²)
 - 전체 평균 : 109 kWh/m² (전기요금 5,477 원/m²)

21) 농촌진흥청, '땅에서 찾아낸 에너지의 보고', pp. 14, 2009.8.

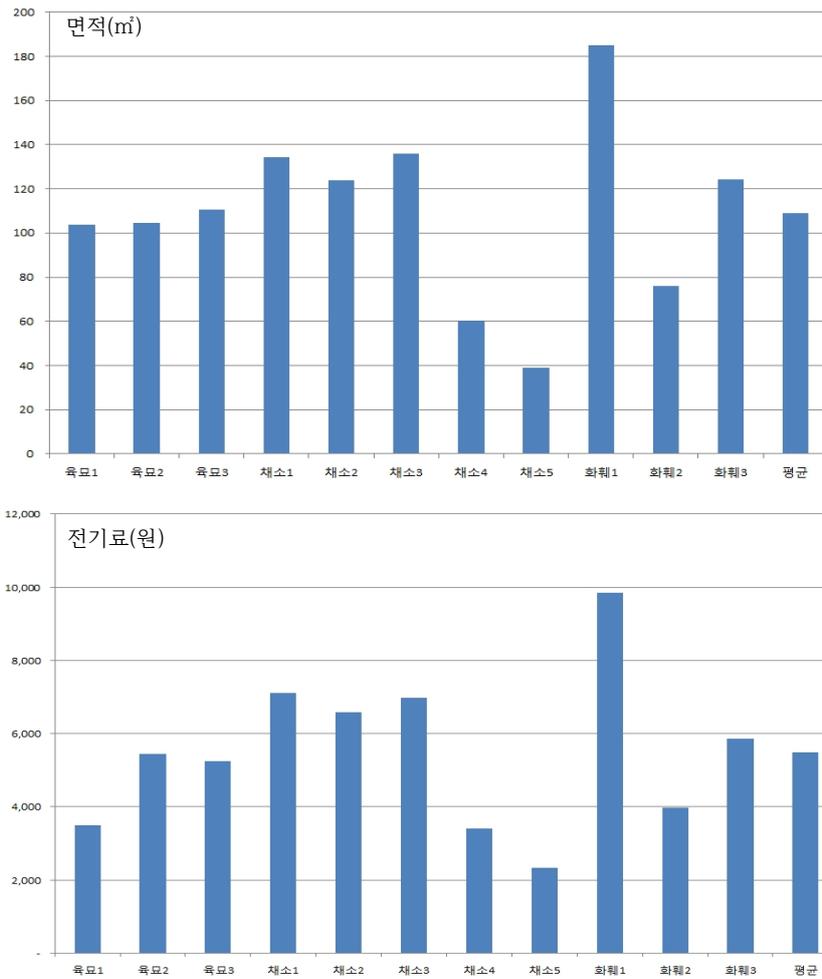
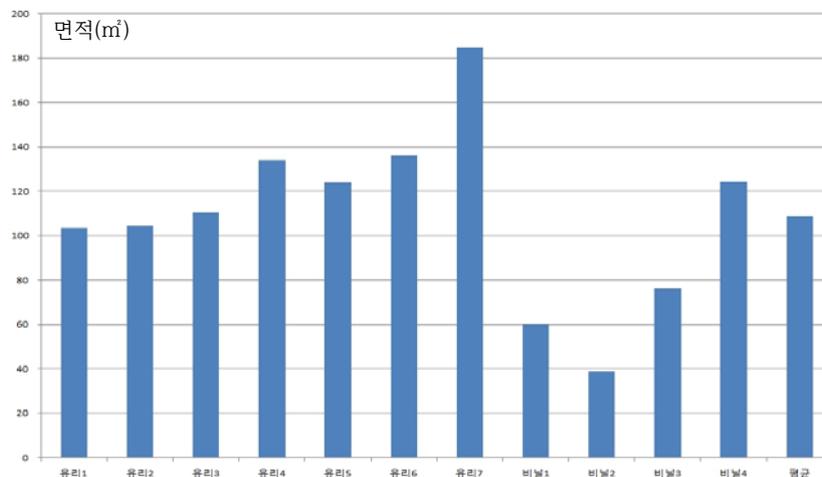


그림 3-2 작물별 단위면적당 연간 전력사용량(kWth/m²)과 전력요금(원)

- 온실의 피복재별로 단위면적당 지열히트펌프시스템의 가동에 따른 연간 전기사용량과 전기요금을 비교해보면 유리온실이 비닐온실에 비하여 높게 나타남
 - 유리온실 : 약120 kWth/m² 내외 (전기요금 6,000 원/m² 내외)
 - 비닐온실 : 약 70 kWth/m² 내외 (전기요금 4,000 원/m² 내외)



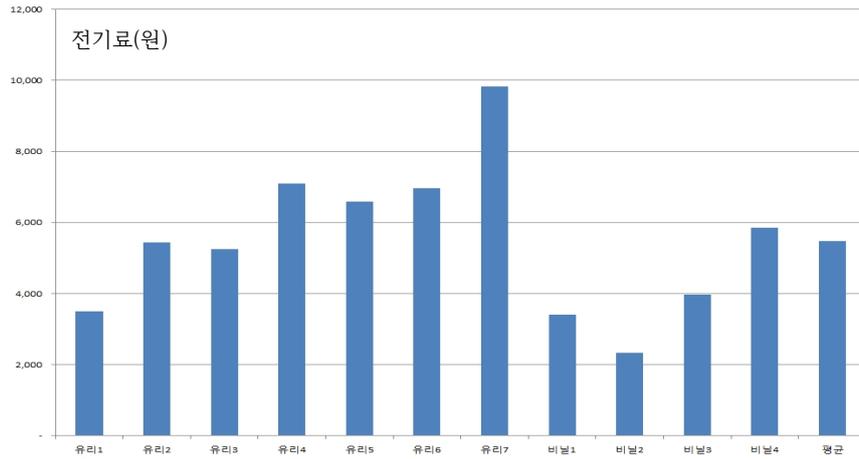


그림 3-3 피복재별 단위면적당 연간 전력사용량(kWth)과 전력요금(원)

다. 월별, 계절별 전기사용량 분석

- 원예시설에 지열히트펌프의 계절별 가동상태를 알아보기 위해 충남 공주에 위치한 옥묘장(유리온실 5,358 m²)과 전주의 화훼재배 온실(유리온실 10,000 m²)을 조사하고²²⁾ 분석함

(1) 공주옥묘장

- 옥묘장은 년 중 작물재배를 시설로 지열냉난방시스템이 중단이 없이 운전되고 있었으며, 2011년 9월부터 2012년 8월까지 운전관련 데이터를 조사함

표 3-8 계절별 외기온도와 온실내부 설정온도

계 절	기 간	온실 설정온도	외기평균온도
동절기	12월부터 이듬해 3월	주간 20℃, 야간 17℃	-0.095℃
환절기	4월 ~ 5월 10월 ~ 1월	주간 20℃, 야간 17℃	13.55℃
하절기	6월 ~ 9월	주야간 22℃ 내외	24.07℃

22) 류연수 외2, '원예시설 지열냉난방시스템 전기에너지 사용량 분석', 한국태양에너지학회 추계학술대회, 2014.11

표 3-9 월별 전력사용량과 외기온도

월	전기사용량(한전계량기)		전기요금 (원)	월평균 외기온도(°C)
	총(kWth)	면적당(kWth/m ²)		
9	27,326	3.415	1,019,010	20.63
10	22,190	2.773	843,220	12.61
11	28,889	3.611	1,061,680	10.45
12	66,108	8.263	2,180,820	-0.78
1	80,381	10.047	2,608,690	-2.55
2	78,012	9.751	2,357,850	-1.87
3	61,522	7.690	2,042,690	4.82
4	42,874	5.359	1,484,020	12.11
5	23,875	2.984	914,860	19.04
6	32,069	4.008	1,164,010	23.13
7	25,858	3.232	977,260	25.79
8	40,061	5.007	1,402,990	26.73
합	529,165	66.15	18,057,100	-
평균	44,097	5.51	1,504,758	-

- 동절기(12월부터 이듬해 3월) 전기사용량은 286,023 kWth으로 연간사용량(529,165 kWth)의 54%로 나타남
- 하절기(6월~9월)에는 전기사용량이 125,314 kWth으로 총 사용량의 24%였으며, 고온기 온실냉방부하임

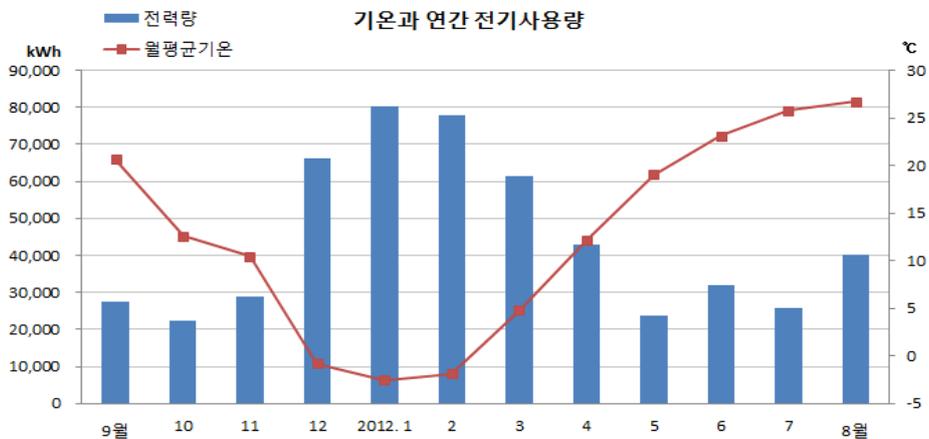


그림 3-4 월별 평균기온과 전력사용량

- 환절기 기간의 전기사용량은 117,828 kWth으로 전체의 22%임
- 난방운전을 하는 동절기는 냉방운전을 하는 하절기에 비하여 전기사용량은 2.3배
- 온실내부 설정온도와 외기기온의 온도차가 동절기에 비하여 하절기와 환절기에서 작고, 차광 및 채광조절에 의한 열 이용이 있음을 알 수 있음

(2) 전주화훼온실

- 2013년 9월부터 2014년 8월까지 1년간 총 전기사용량은 1,675,959 kWth였으며, 계절별 비중은 동절기 48%, 하절기 20%, 환절기 32%였음
- 2014년 9월 작물재배를 시작하게 됨에 따라, 여름철 지열히트펌프의 가동이 적었다는 시설 관리자의 의견을 감안하여 비교하면 공주육묘장 온실과 유사한 에너지 소비패턴을 보였음

표 3-10 월별 계절별 전기사용량

월	전기사용량(한전계량기)			전기요금 (원)
	총(kWth)	면적당(kWth/m ²)	계절별(kWth)	
9	129,199	12.92	(하절기)	6,453,000
10	97,254	9.73	(환절기)	5,614,530
11	143,940	14.39		7,461,440
12	167,846	16.78	807,105 (동절기)	8,727,470
1	225,186	22.52		11,633,730
2	230,951	23.10		11,857,010
3	183,122	18.31	541,737 (환절기)	9,505,160
4	182,111	18.21		9,400,790
5	118,432	11.84	327,117 (하절기)	6,605,780
6	76,727	7.67		4,564,269
7	56,491	5.65		4,163,564
8	64,700	6.47		6,302,581
합	1,675,959	167.60	-	92,289,324
평균	139,663	13.97	-	7,690,777

(3) 일사량과 전기사용량

- 동절기와 하절기에 일사량이 지열히트펌프 가동에 미치는 영향에 대하여 공주육묘장 유리온실 운전데이터를 이용하여 분석함
- 동절기인 2011년 12월 9일부터 2012년 2월 10일까지 유사한 외기기온(-2.0°C ±0.1°C)을 보인 6일간에 대하여 일일 일사량과 해당일의 전력사용량은 일사량이 5~8 MJ/m²이었던 날에 비하여 일사량이 높았던 11~12 MJ/m² 날에서의 전력사용량이 평균 약 400 kWth 정도 덜 사용된 것으로 나타남
- 동절기에는 일사량이 증가할수록 사용전력은 감소하며 일사량 1 MJ/m² 증가할 때 전력은 96.7 kWth절감되는 것으로 나타남

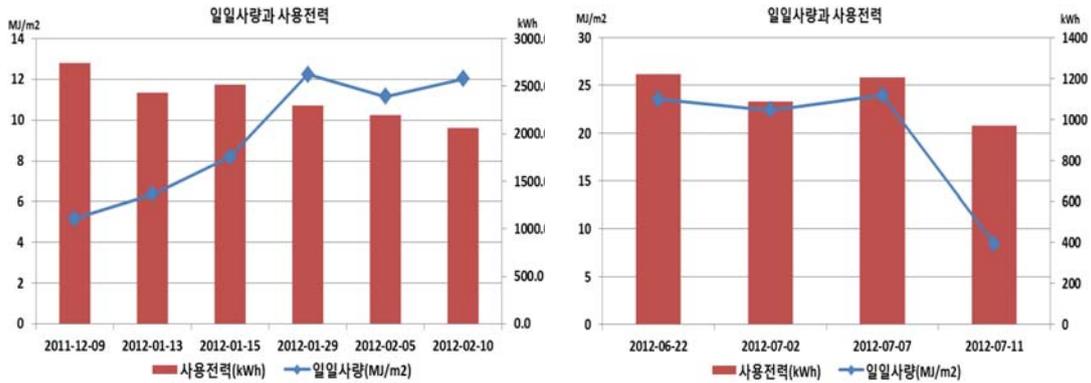


그림 3-5 일일 일사량과 전력사용량(좌: 동절기, 우: 하절기)

- 하절기 평균기온과 유사한 외기온(24.3°C ±0.1°C)을 보인 2012년 6월 22일부터 7월 11일 사이의 4일간에 대하여 해당일의 일사량과 전력량을 그림 3-5에 비교함
- 일일 일사량이 8 MJ/m²인 날의 전력사용량이 970 kWth이었지만 일일 일사량이 23~24 MJ/m²로 증가한 날의 평균 전력사용량은 1,200 kWth로 높았던 것으로 나타나 하절기 냉방부하가 일사량이 1 MJ/m² 증가할 때 전력도 16.2 kWth 증가함을 알 수 있음
- 체계적인 채광과 차단 등에 의한 온실내부 환경관리를 통하여 지열에너지를 합리적으로 이용할 필요가 있음

라. 설비요소 요소별 전기사용량 분석

- 공주육묘장 지열히트펌프시스템을 구성하는 각각의 설비별로 소비전력을 그림 3-6에서 보면, 히트펌프의 소비전력이 전체 소비전력의 75.8%로 대부분을 차지함
- 심부지열은 온실에 필요한 온도를 지중에서 바로 취득할 수 있기 때문에 히트펌프는 필요치 않으므로 이 부분에 대한 전기에너지를 줄일 수 있어 총 전력사용량의 70%정도를 절감을 예측할 수 있음

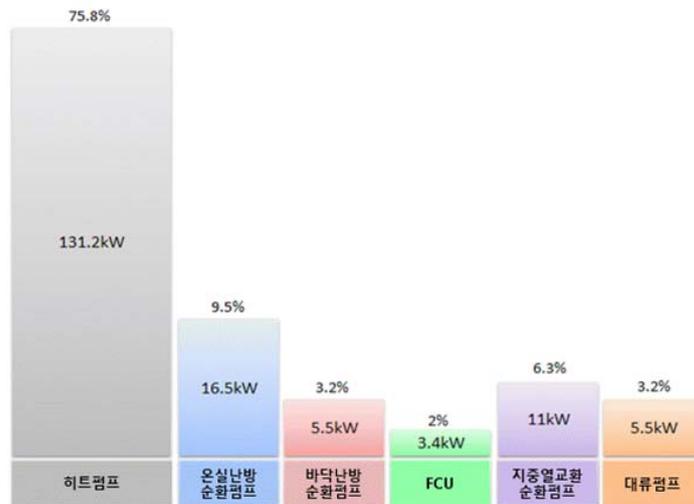


그림 3-6 공주육묘장 지열히트펌프설비의 요소별 소비전력

3. 지열난방설비의 시설비

가. 시설비 조사 및 분류

- 천부지열 히트펌프시스템이 경유를 사용하는 난방설비에 비하여 친환경적인 설비임에도 지중 열교환기에서 얻는 온도가 10℃ 내외로 온실에서 이용 가능한 온도까지 올리기 위해 히트펌프시스템을 사용하고 있음
- 또한 넓은 부지를 필요로 하는 다량의 시추공 공사와 함께 히트펌프설비의 설치에 따른 공사비가 많이 소요되고, 히트펌프의 가동에 따른 전기요금과 고장에 따른 유지관리비용이 많이 소요되어 농가의 부담으로 다가오는 것도 사실임
- 이에 비하여 심부지열을 이용하는 기술은 고온의 지열을 바로 사용하기 때문에 천부지열시스템의 단점을 극복할 수 있는 좋은 대안이나 심부지열 1공을 시추하는데 드는 비용과 열교환기의 설치와 운영기술에 대하여는 많은 기술개발을 필요로 함

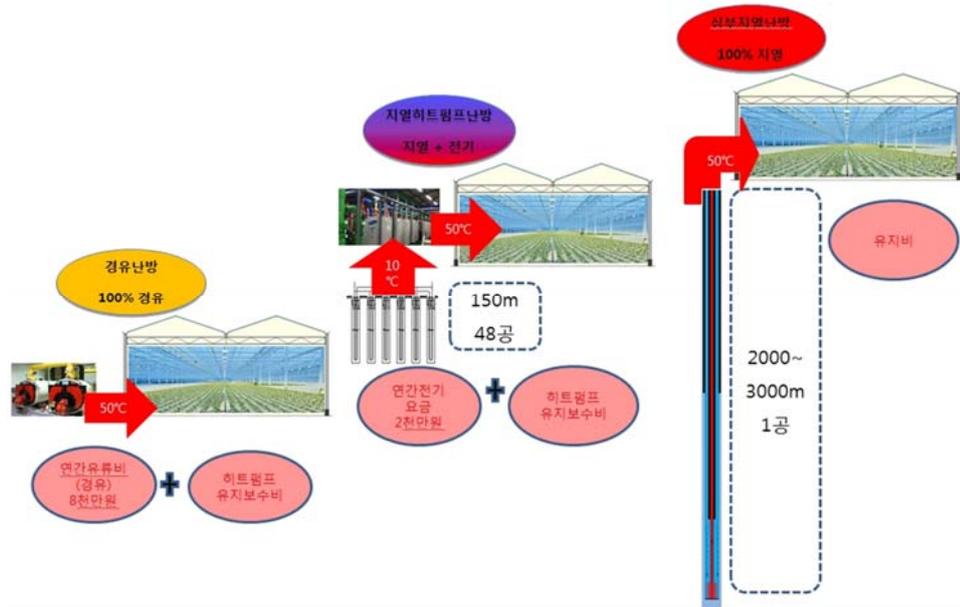


그림 3-7 열원별 난방시스템 구성 비교(1,600평 기준)

- 심부지열 도입에 요구되는 적정 시공비용의 범위를 추정해 보기 위해 현재 운영하고 있는 천부지열히트펌프시스템의 설비와 운영에 대하여 분석하고, 심부지열을 이용하는 시스템을 원예시설의 난방원으로 적용했을 때와 비교하였음

(1) 조사 원예시설 및 설비용량

- 경기도, 강원도 일원의 유리온실, 비닐온실로서 천부지열 난방시스템을 이용하여 운영하고 있는 히트펌프설비 난방규격 316~703 kW이내의 5개 시설에 대하여 조사를 수행함

(2) 시설비 산출 및 분류

- 시설비는 지열히트펌프시스템을 설치하기 위해서 발주 당시에 작성된 각 지구의 설계공사비 산출서를 기준으로 하였음
- 천부지열히트펌프시스템의 주요공정은 시추공, 히트펌프, 부대공사 등 3개로 분류하였으며, 심부지열을 이용하는 경우에는 히트펌프설비가 필요하지 않기 때문에 다음과 같이 비교하여 나타낼 수 있음
 - 천부지열 : 시추공 공사비 + 히트펌프설비비 + 부대시설비
 - 심부지열 : 시추공 공사비 + 부대시설비
- 조사한 5개 원예시설의 천부지열을 이용하는 지열히트펌프난방시스템에 대한 시설비를 주요공정별로 표 3-11과 같이 분류하여 정리하였음
- 지열난방설비의 규모는 온실난방부하의 60~70% 내외로 적용된 것이며, 시설규모에 따라 일정하게 공사비가 증감되지 않는 것은 이미 경유보일러로 난방하는 시설에서 시행되는 것으로, 원예시설 내부, 외부 현장의 여건과 부대시설의 내용 등이 다르기 때문인 것으로 판단됨

표 3-11 시설규모 및 주요공정별 공사비

*공사비 단위: 백만원

지 구	경기 이○○	연천 심○○	공주 박○○	용인 김○○	포천 허○○
시설규모	316 kW	408 kW	450 kW	508 kW	703 kW
구 분	공사비	공사비	공사비	공사비	공사비
시추공 공사	117	282	295	286	181
히트펌프	61	208	238	240	244
부대시설	199	205	128	136	127
공사비 계	377	695	661	662	552

나. 시설비용 비교 분석

- 기존운영중인 5개 온실의 천부지열 난방시스템 공사비 수집하고 주요 공정별로 공사비를 분류한 결과 시추공 31~45%, 히트펌프 16~44%, 부대시설 19~53% 범위이며, 평균비중은 그림 3-8과 같이 나타남
- 공정별 공사비의 평균비중은 시추공 공사비 > 히트펌프 > 부대시설 순으로 나타났으며, 3개의 주요 공정별 공사비 비중은 30% 내외로 비교적 고르게 분포하였고 심부지열로 대체할 수 있는 공정인 시추공과 히트펌프가 전체 공사비의 71%를 차지하였음

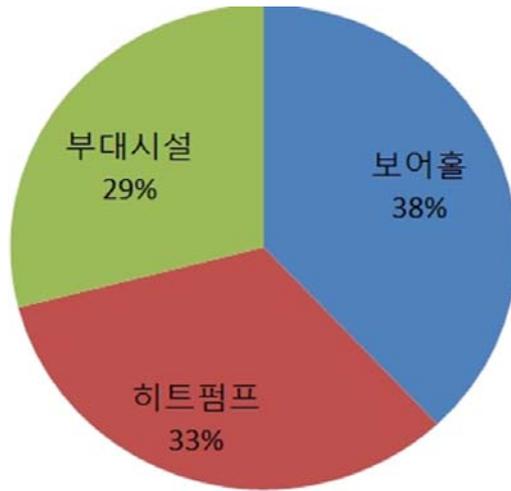


그림 3-8 천부지열히트펌프시스템 공사비 비중

- 2015년도 농림사업시행지침 농업에너지이용효율화사업의 지열난방 표준사업비는 1,638 천원/kW이므로 이를 기준으로 천부지열의 kW당 주요 공정별 시설비를 다음과 같이 나타낼 수 있음
 - 보 어 홀 : 622 천원/kW
 - 히트펌프 : 541 천원/kW
 - 부대시설 : 475 천원/kW
- 예를 들어, 현재의 지원제도에서 심부지열사업을 적용해보면 천부지열의 시추공 공사와 히트펌프를 합한 것으로 대체할 수 있으므로 1,163 천원/kW을 심부시추 및 지중열교환 시설비로 산정해볼 수 있음
- 따라서 이를 기준으로 충청지역 5,358 m²(1,600평) 온실의 지열난방용량 450 kW에 대하여 심부지열 시추 및 지중열교환 시설비로 추정해 볼 수 있는 사업비는 523백만원으로 나타낼 수 있으나 실제 현장에서 시행하는 공사비는 현장과 기술적 여건에 따라 크게 증감될 수 있으므로 연구진행과 논의가 필요함
- 현재 시행하고 있는 천부지열 이용의 지열히트펌프 난방시스템과 심부지열 도입에 따른 특징에 대하여 요약하면 다음과 같음
 - 2015년 농림사업지침 농업에너지이용효율화사업에서 지열히트펌프 설비용량 kW당 1,638,000 원으로 정하여 지원하고 있고, 5개 시설을 조사한 결과 주요공정별 사업비의 평균 비율은 시추공 38%, 히트펌프설비 33%, 기타 부대시설이 29%로 나타났음. 따라서 시추공은 622 천원/kW, 히트펌프설비 541 천원/kW, 부대설비 475 천원/kW이 소요되는 것으로 분석됨
 - 천부지열설비는 동절기 지중에서 열 교환한 10℃내외의 물을 히트펌프로 45~50℃로 높여 온실에 난방에너지로 공급하는 시스템으로 기름보일러보다 운전비가 약 70% 절감되지만, 시설비용, 전기요금, 고장수리비용이 큰 것으로 조사됨. 또한 난방부하에 대응하는 지중 열교환기기 설치를 위해 추가부지가 필요한데, 5,358 m² 온실의 경우 시추공 48공을 설치에 900 m², 19,561 m² 온실은 174공에 5,000 m²의 부지가 소요되어, 재배 온실면적의 17~25% 추가 부지확보가 요구됨을 알 수 있음

- 심부지열은 시추공을 땅속 1~3.5 km 이상 시추하고 지열로부터 50℃ 이상의 고온을 취득하여, 히트펌프 없이 바로 온실 난방에너지로 공급 가능하나 시추공의 시추 깊이에 따라 비용이 상대적으로 많이 소요될 것으로 예상됨. 그러나 시추공 소요부지가 매우 적고, 히트펌프설비가 필요 없어 이에 따른 시설비의 절감과 운전비용(전기요금 및 유지보수비)을 절감할 수 있는 커다란 장점이 있음

4. 소 결

- 가. 2010년부터 정부지원사업으로 보급된 지열히트펌프 난방시스템은 201농가, 난방면적은 132.8 ha 이상이며, 대부분은 시추공 깊이가 150~200 m로 많은 천공으로 넓은 부지가 필요함에도 경유보일러에 비하여 연료비 절감에 효과가 커 많이 보급되어 운영 중에 있음
- 나. 지열히트펌프 난방시스템에서 히트펌프는 소비전력이 큰 장치로 설비 전체 전력소비의 75%를 차지하고 있어, 전국 보급농가의 연간 전기사용량은 140 GWh에 이를 것으로 나타났다. 연료비 절감효과가 큰 것은 저렴한 농사용 전기요금 적용이 가장 큰 이유로 향후 전력요금정책에 따라 난방비용의 부담이 커질 수 있으며, 사용기간이 지남에 따라 히트펌프시스템 유지보수비용이 많이 들게 될 것으로 추정됨
- 다. 지열히트펌프 난방시스템의 동절기 12월 이듬해 3월까지의 난방사용 비중은 전체 사용량의 48~54%로 나타나 환절기의 난방가동을 더하면 70%가 난방부하 사용량으로 추정됨
- 라. 2015년 농림사업지침 농업에너지이용효율화사업에서 지열히트펌프 설비용량 kW당 1,638,000원으로 정하여 지원하고 있으며, 5개 시설을 조사한 결과 주요 공정별 평균사업비는 시추공 622 천원/kW(38%), 히트펌프 541 천원/kW(33%), 부대설비 475 천원/kW(29%)이 소요되는 것으로 분석됨
- 마. 따라서 심부지열 시추공 공사비용을 1163 천원/kW이내에서 추진할 경우, 사업비용에서 효과가 클 뿐 아니라 설치 후 운영 중에서는 기존의 지열히트펌프시스템에 비하여 전기요금, 유지관리비용이 대폭 절감될 수 대안이 된다는 점에서 다양한 발전방안이 필요한 시점임

제 2절 과제 적용 현황

1. 위치현황

- 본 과업구간은 전라남도 나주시 산포면 등수리 81-1 일원으로 전라남도 농업기술원 으로부터 제공 받은 부지에 대하여 「심부지열을 이용한 원예시설 난방활용 기술 개발 및 경제성 분석」 과제와 관련된 설계와 시공을 수행함
- 본 구간은 광주광역시로부터 직선거리로 약 15 km 떨어져 있으며, 「화강암(Granite)」을 기반으로 하는 지층 조건으로 설계를 위한 「시추공 온도 검층 데이터」는 2013년 12월 (주)한진디엔비가 수행한 3.5 km 시추공(광주 서구 덕흥동 소재)에서의 데이터를 적용하여 설계를 수행함

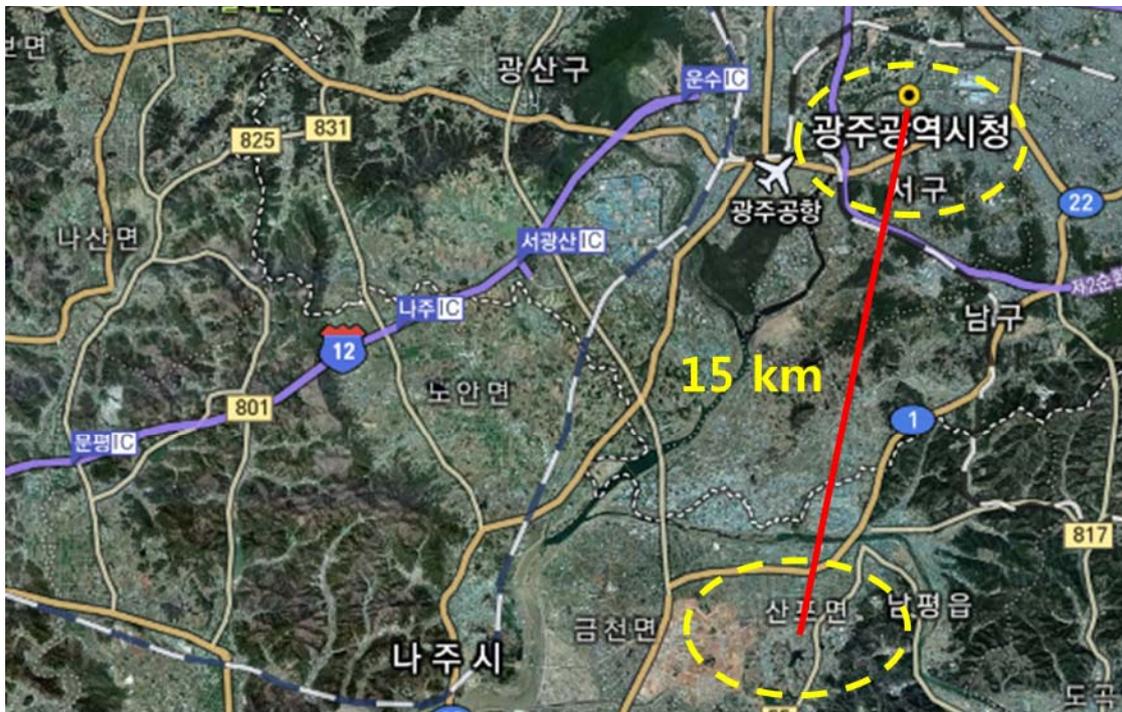


그림 3-9 위치 현황



그림 3-10 시공부지 전경부

2. 지질현황

- 본 과업 구간에 해당하는 나주시 산포면 등수리 일원은 「평야지대」의 지형적 특성에 맞추어 최 상부층인 「제 4기 충적층」이 넓게 분포하며, 최 하부층인 선캄브리아기의 「화강암질 편마암」을 본 과업구간의 기반암을 형성하는 쥬라기의 「흑운모 화강암」이 관입 및 피복하는 지질학적 특징을 가진

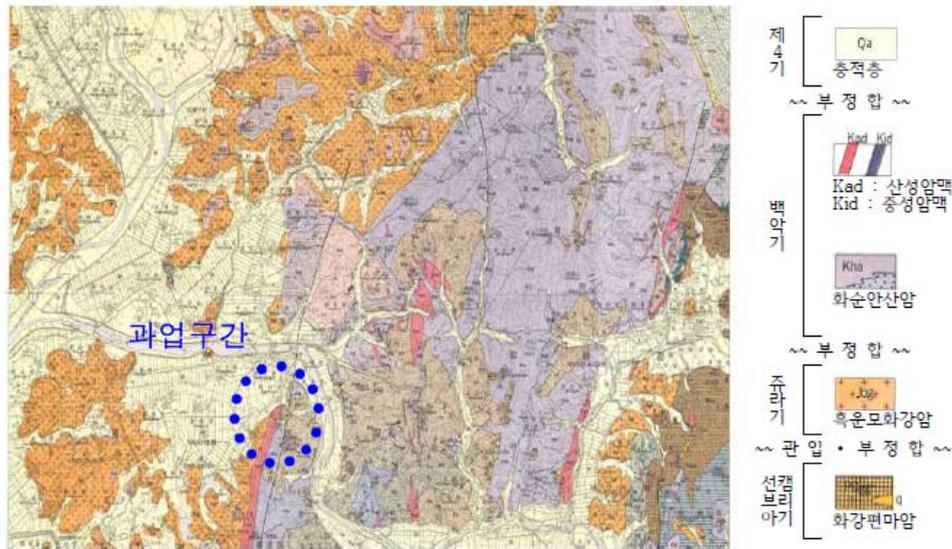


그림 3-11 시공부지 전경부

- 과업구간인 전라남도 농업기술원 부지에 대한 사전 지반조사 결과는 다음과 같음

표 3-12 지층 개황

지 층	층 후(m)	두께(m)	지층 설명
매립층	0.0~2.0 m	2.0 m	· 풍화토 매립층
풍화토	2.0~22.0 m	20.0 m	· 실트질 모래의 풍화토로 층구성 (황갈색), 습윤 상태, 완전 풍화
풍화암	22.0~46.0 m	24.0 m	· 중립질의 모래질 구성된 암편석인 풍화암층으로 구성(황갈색), 심한풍화
기반암	46.0~	-	· 화강암(Granite) · 풍화암층 하부 기반암이 시작되는 지점으로 다수의 불규칙 절리 분포에 따른 암편상~단주상 암석코아가 채취됨




제 3절 심부지열 시스템 설계 및 시뮬레이션

1. 시스템 설계

- 위치 : 전라남도 농업기술원 부지(전라남도 나주시 산포면 등수리 81-1)
- 시추공 - Single well(단일공) 2,002 m 시추
- 유리온실 면적
 - 지열적용 유리온실 : 256 m²
 - 경유난방 유리온실 : 320 m²
- 지중열교환기 Inner pipe : 이중 구조 적용
 - 상부심도(0~120 m) : 직경(내경) 134.4 mm,
 - 하부심도(120~1,962 m) : 직경(내경) 90 mm
- 지상배관(시추공~유리온실) : 175 m
- 열교환기 : 평판형 75,000 Kcal/hr

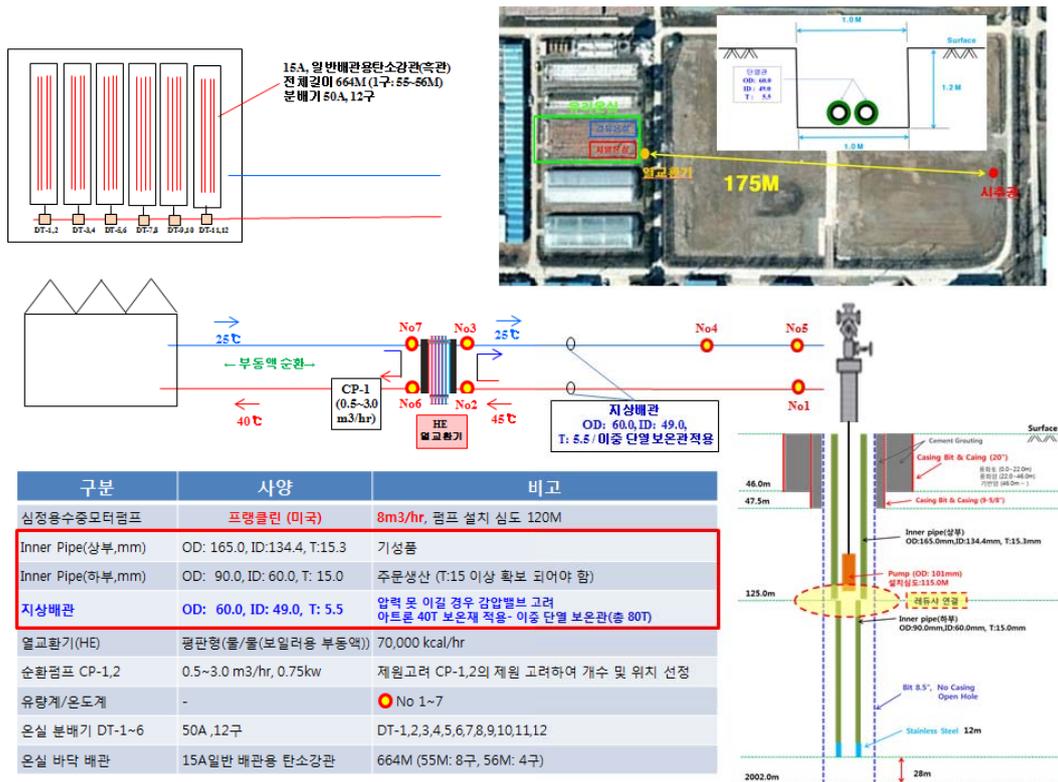


그림 3-12 전체 시스템 모식도

- PLC 판넬 : 시추공부 1개, 유리온실부 1개, 총 2개 설치
 - 유리온실부에 Data logger 장착
- 인버터 제어반 : 수중펌프의 유량 조절 및 작동을 위한 장치

- 온도 센서 : 시험구 18개, 대조구 18개, 외부 2개, 시추공부 3개, 열교환기 4개, 총 45개
- 유량 센서 : 시추공부 3개, 열교환기 2개, 총 5개
- 유리온실 순환펌프 : 0.75 kW(1 HP)

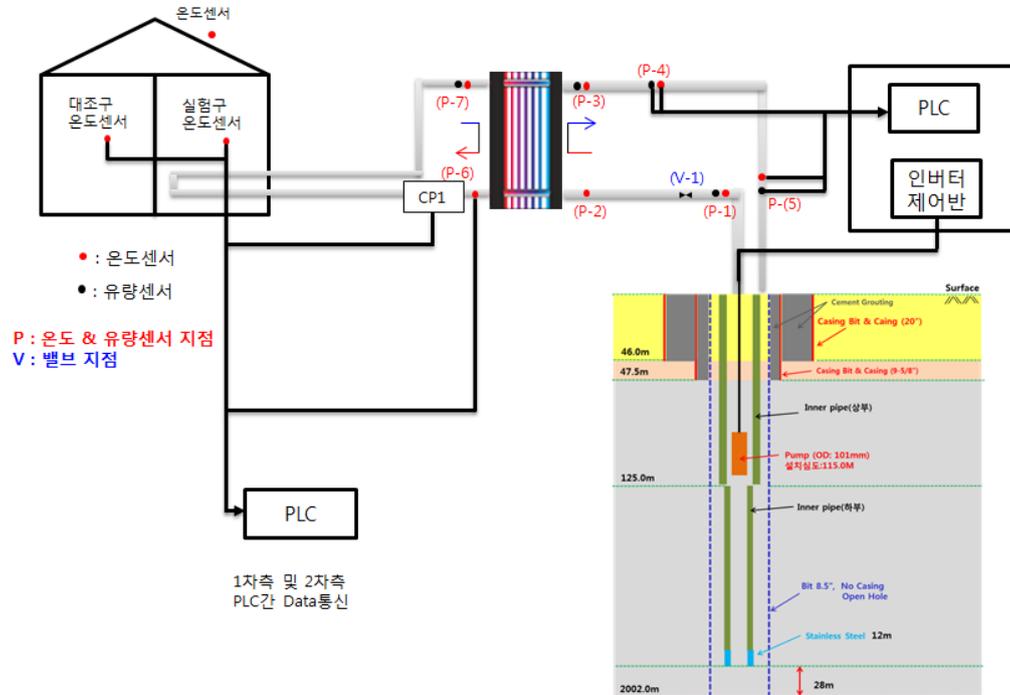


그림 3-13 전체 시스템 회로도

- 인자별 센서 선정 및 보정
 - 센서는 USA WITRA社의 선행 연구 자료를 바탕으로 광량 센서, 온도 센서, 습도 센서, CO₂ 센서를 선정함

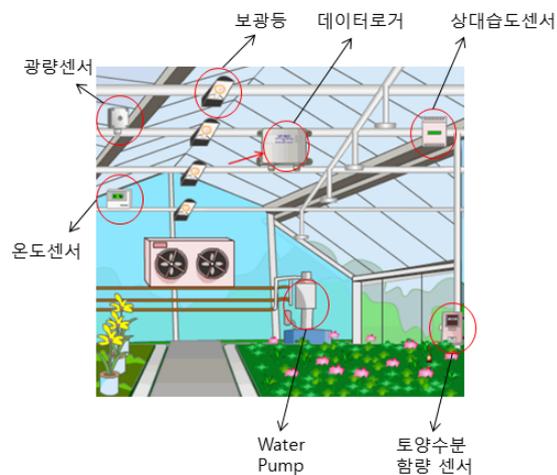


그림 3-14 온실 제어 선행 연구 (USA WITRA)

- 자동 제어 및 모니터링 시스템 기술 확보 및 ID(Interface Device) 구성 완료
 - 온실 내부의 환경 요인을 각 인자별 Sensor를 통하여 계측하고 데이터는 cDAQ로 수집하는 모니터링 시스템을 구축함
 - Software는 Labview로 신호를 수집하여 데이터를 저장하고 PC에 모니터링함
 - 원격 데이터 수집은 TCP/IP 통신을 이용하여 구축함

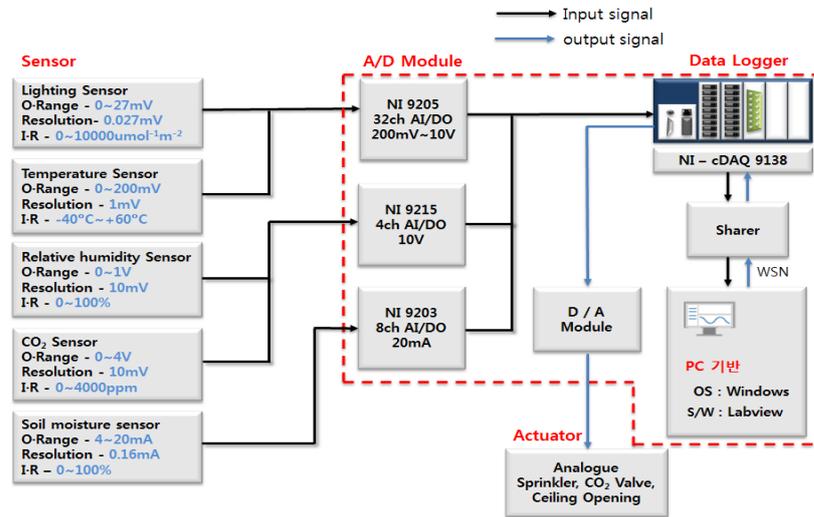


그림 3-15 ID 개념도

- NI A/D 모듈을 통해서 온도, 습도, 광량, CO₂ 센서를 데이터 로거인 NI-cDAQ에 신호를 전달하여 실시간으로 작물 성장 환경을 계측 및 모니터링 할 수 있는 시스템을 구축함
- 데이터 로거 내 소프트웨어를 이용하여 실시간으로 보정하는 시스템을 구축함
- 각 인자를 센서를 통해서 계측하고 출력된 Voltage 값이 cDAQ에 Save된 이후 공유기를 거쳐 신호가 PC로부터 신호를 받은 후 모니터링하는 시스템을 완성함

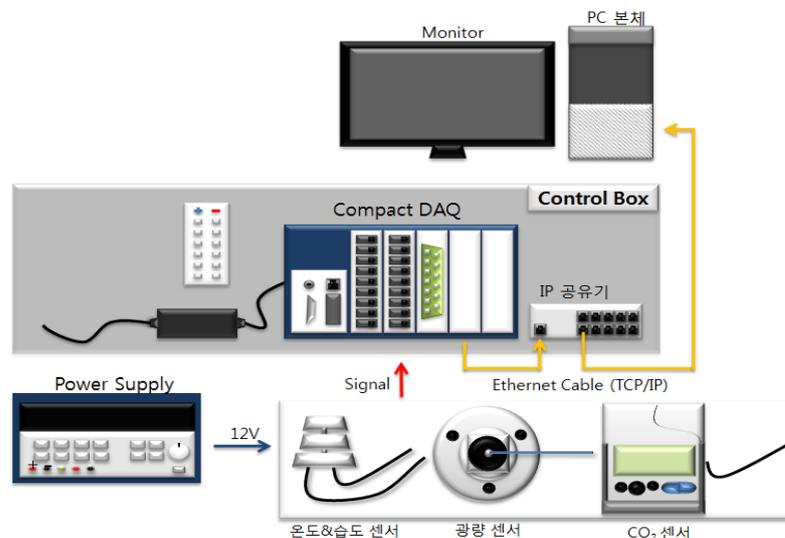


그림 3-16 모니터링 하드웨어 구성 개략도



그림 3-17 모니터링 장비 셋팅



그림 3-18 실험실 내 모니터링 장비 셋팅 사진

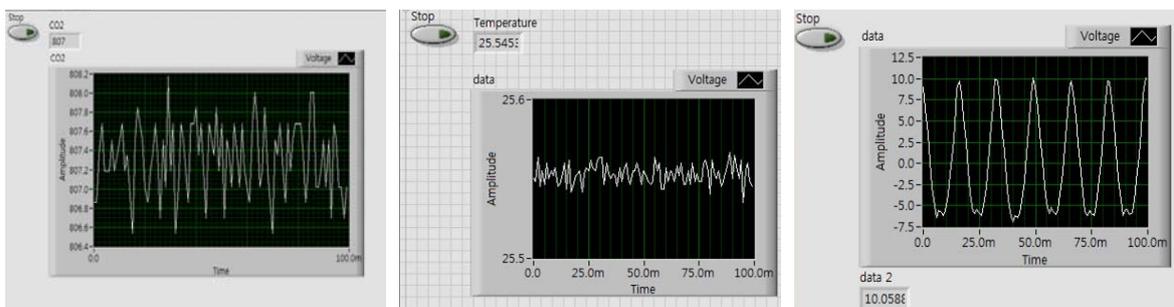


그림 3-19 모니터링 시스템 화면

2. Hole design simulation

가. 시뮬레이션 설계를 위한 기본 정보

(1) 지질학적 정보

- 시추지역인 나주의 지질학적 정보는 46 m 퇴적층 아래 화강암으로 이루어져 있으며, 화강암 암반에 대한 비열용량 및 열전도도율의 평균값은 한국 암석의 열적 특성 연구에 기초하여 사용함. 또한 암편 열전도율은 광주 시추 지역의 3.5 W/m·k 암편 열전도율을 이용하였으며, 퇴적층의 열적 특성은 VDI 4640²³⁾에 근거하여 지정함

표 3-13 나주 시추 지역의 지질학적 구성

암질	심도(m)	두께(m)
미사 모래	0-22	22
모래	22-46	24
화강암	46-2,500	2,500

표 3-14 나주 시추 지역의 열적 특성

암질	비열용량(MJ/m ³ K)	열전도율(W/m·k)
미사 모래	2.4	1.8
모래	2.5	2.4
화강암	2.2	3.57

(2) 열수요 용량 산정

- 열수요량 산정을 위해 온실면적 1500 m², 온실 난방 최대 공급 유동 온도 50℃로 산정함
- 나주현장의 열수요 용량 산출을 위하여 2012.1.~2014.12.의 나주지역 온도 분포 이용함
- 나주지역 평균 온도값을 이용하여 외부온도 -5℃일 때 온실의 최대 열수요량 350 kWth 와 +25℃일 때 온실의 열 공급이 필요 없음을 산정한 후 선형거동을 가정하여 다음 그림 3-21과 같은 외부온도에 따른 열수요량을 산정함

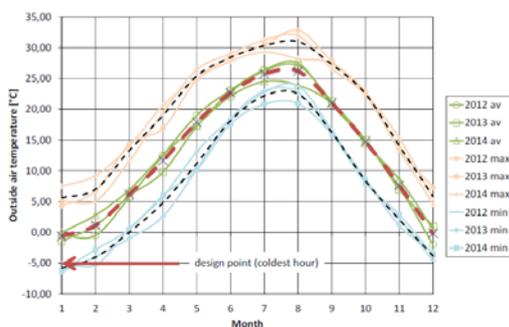


그림 3-20 나주 지역 월별 기상 조건 (2012~2014년)

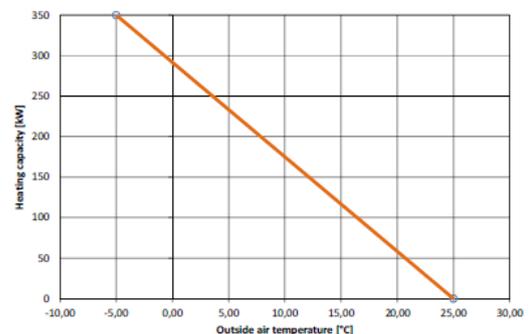


그림 3-21 평균 외기 온도 함수를 이용한 열수요량

23) VDI 4640 PART1, 'Thermal use of the underground-Fundamentals, approvals, environmental aspects', 2010

- 나주지역 월 평균 온도를 이용하여 각 달의 평균 열수요 값을 그림 3-22와 같이 산정함

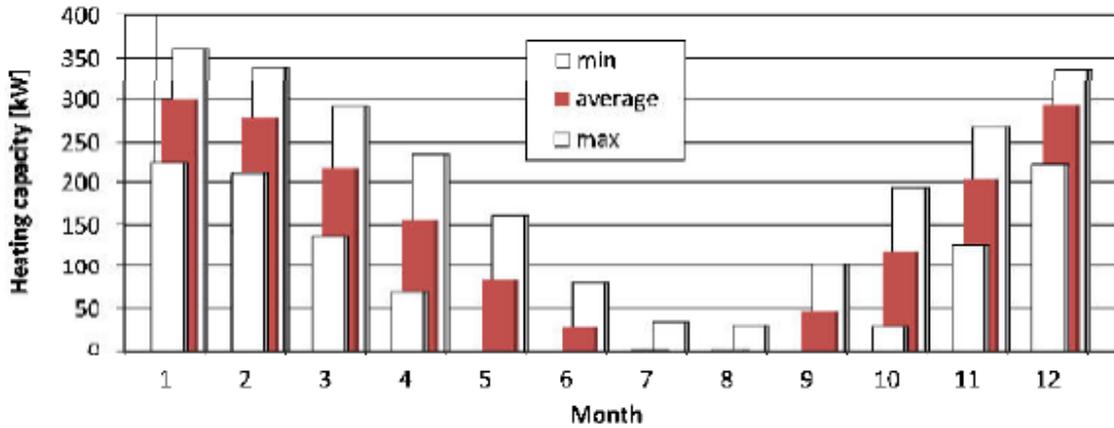
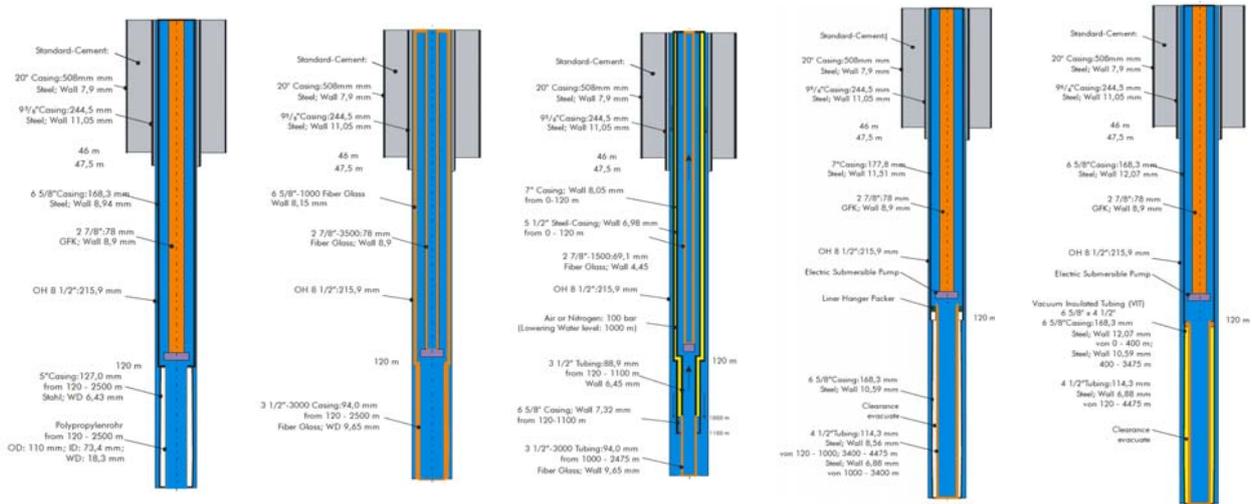


그림 3-22 월간 평균, 최소, 최대 열수요 값

나. 시추공 열교환기 설계

- 열교환기 설계를 위해 복합튜브(Composite tube), 유리섬유강화플라스틱튜브(Glass fiber reinforced plastic tube, GFRP tubd), 이중튜브(Double tube), 진공튜브(Vacuum insulation tube, VIT) 등의 시스템을 이용하여 열교환기 설계를 수행함
- 시추공 열교환기 시스템



(a) Composite tube (b) GFRP tube (c) Double/GFRP (d) Double tube (e) VIT

그림 3-23 시추공 열교환기 시스템

다. 지중열교환기 시뮬레이션

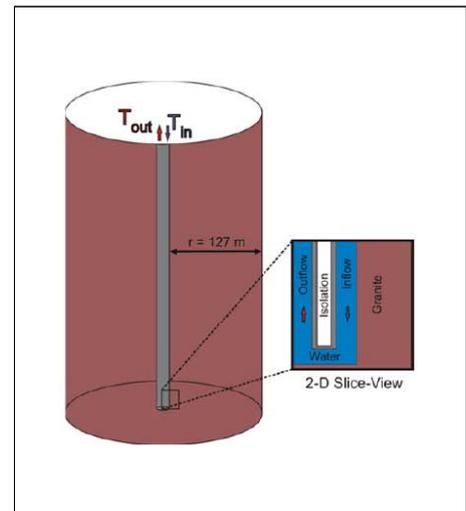
- Clauser가 개발한 SHEMAT Software를 이용하여 지중열교환기(BHE) 내 열교환을 산출을 위한 시뮬레이션을 수행함

(1) 시뮬레이션 모델 설정

- 초기 암반 온도를 일정하게 유지하기 위해 시추공부와 주변 암반의 영향 범위를 크게 하여 다음과 같이 모델을 설계함
- Simulation을 위해 사용된 열 물성치는 표 3-15와 같으며, 비열 용량 및 열전도율은 국내 사례(VDI4640 혹은 Park²⁴⁾)를 인용
- 특히 물의 열 물성은 온도, 압력, 농도에 의해 결정되며, Simulation을 위해 GTN社의 경험을 바탕으로 온도 55℃, 압력 5 bar, 0.001 mol/kg의 몰농도를 가지는 물의 열 물성치를 사용함

표 3-15 대상 지반 및 시추공 열 물성치 및 모델링 단면도

항목	비열 용량 (MJ/m ³ K)	열전도율 (W/m·k)
Water	4.2	0.65
Air (Vacuum)	0.0012	0.02
Polypropylene	1.6	0.15
Casing	3.12	45.0
Cement	2.0	1.3
Silty Sand	2.4	1.8
Sand	2.5	2.4
Granite	2.2	3.57



24) Park et al., 'Thermal Properties of Rocks in the Republic of Korea', Econ. Environ Geol. 42, pp591-598

- 모델의 암반 온도는 나주 현장에서 14 km 떨어진 광주 시추 현장의 암반온도를 이용하여 모델을 설계함

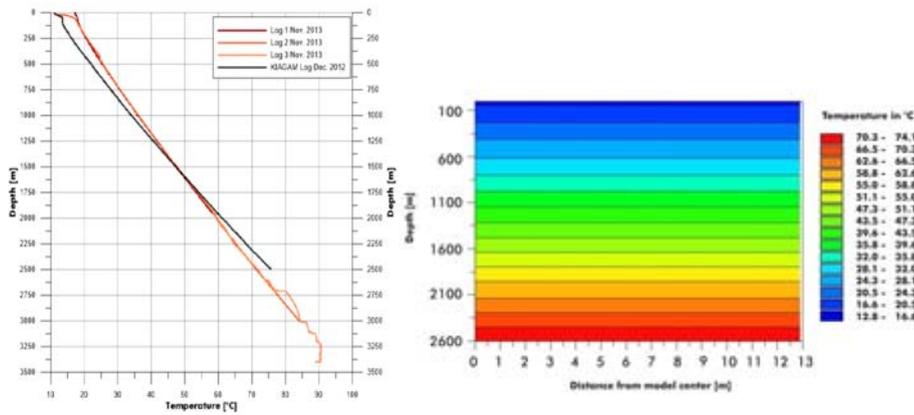


그림 3-24 광주 지온경사도 및 모델 암반온도

- 시뮬레이션을 위한 월별 주입온도 및 유량은 다음과 같이 설정하였으며, 7월과 8월의 경우 나주지역 평균온도가 25°C 이상이기 때문에 온실 내 열공급이 필요 없으므로 시뮬레이션을 수행하지 않음

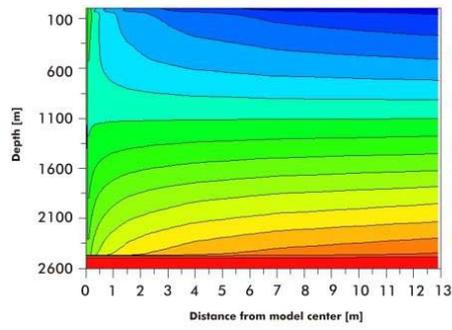
표 3-16 시뮬레이션 유량 및 주입온도

월	유량(m ³ /h)	주입온도(°C)
1월	26	42
2월	24.2	42
3월	19.1	42
4월	13.6	37
5월	7.2	37
6월	4.7	37
9월	8.1	37
10월	10.4	37
11월	17.6	42
12월	25.5	42

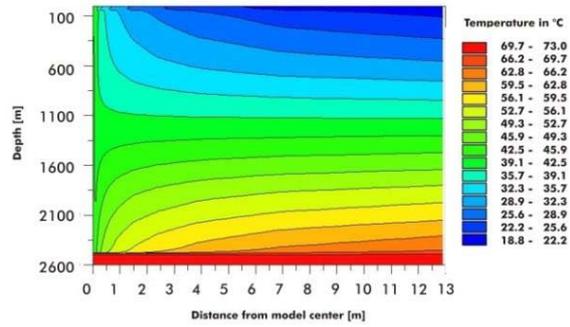
(2) 시뮬레이션 결과

표 3-17 지중열교환기(BHE) 시뮬레이션 결과 (2.5 km 이하 심도)

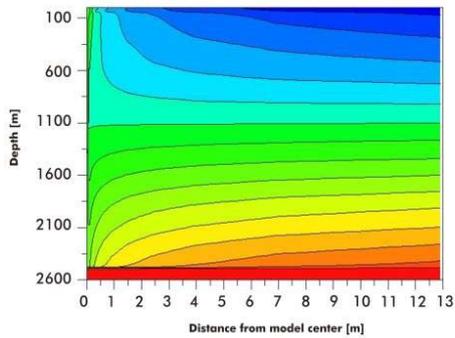
항 목	단 위	복합튜브	GFRP	이중튜브 / GFRP	이중튜브	VIT
암반온도	°C	72	72	72	72	72
BHE 지열수 온도	°C	43.8	44.3	44.1	44.5	44.5
지상 지열수 온도	°C	42.8	41.8	42.1	43.8	44.3
열 손실률	K/km	0.4	1.0	0.8	0.3	0.1
동절기 최대 열용량	kW	16	3~6	10~13	10~13	30~40



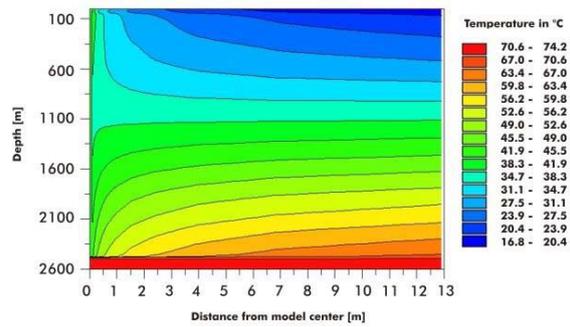
(a) 복합튜브



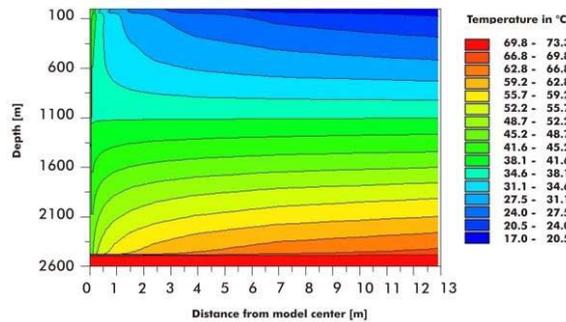
(b) GFRP 튜브



(c) 이중튜브/GFRP



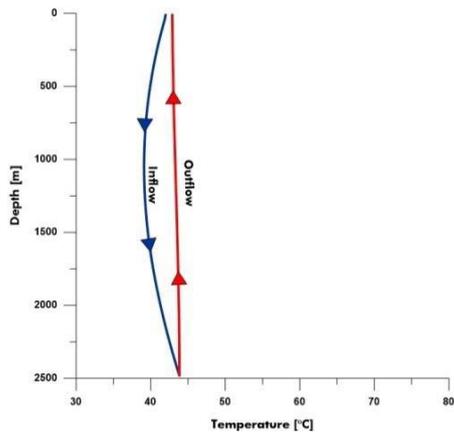
(d) 이중튜브



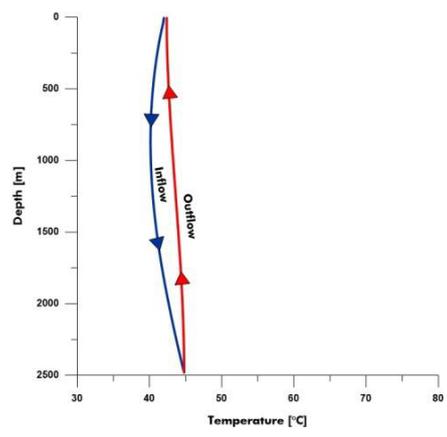
(e) VIT

그림 3-25 시뮬레이션 결과 (6년 후 지층 온도 분포)

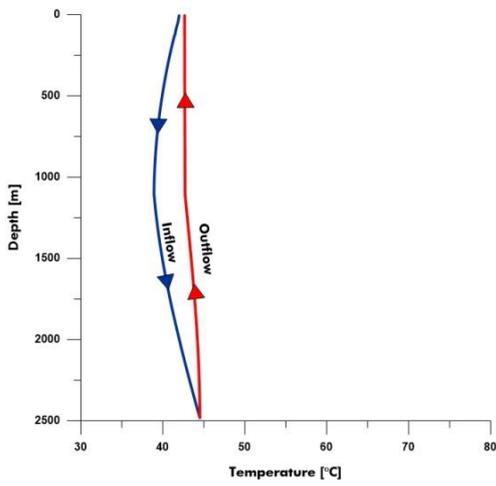
- 상기 그래프(그림 3-25)는 시추공 기준 반경 2.0 m 이내의 암체 온도의 변화에 대한 시뮬레이션 결과 보여주는 그래프로서 각각의 시추심도 2,500 m에 대한 6년 후의 지층온도 분포를 나타냄
 - 모델링 결과 지중열교환을 통한 지중 암반의 온도 변화는 시추공을 기준으로 반경 2.0 m 이내에서 나타나는 것을 알 수 있음
- : 암반온도 변화 양상은 지표 상부에서부터 1,300~1,400 m까지 지열수 순환에 따른 주변 암반 온도가 상승하는 양상을 보이며, 이 이하인 GL.-1,400 m 이하 구간에서부터 약 10°C 정도 지중 암반의 온도가 하락하는 양상을 보임



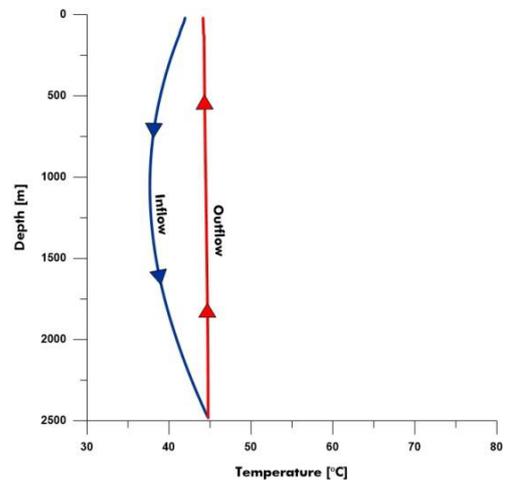
(a) 복합튜브



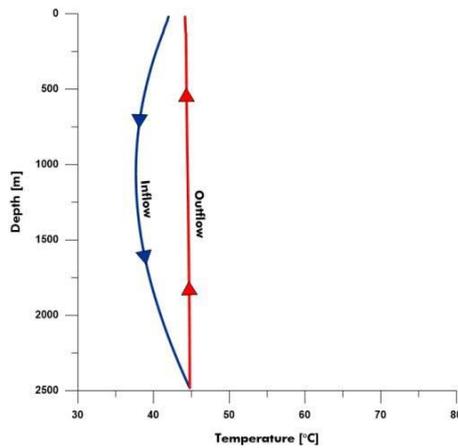
(b) GFRP 튜브



(c) 이중튜브/GFRP



(d) 이중튜브



(e) VIT

그림 3-26 주입수의 온도변화

- 각 지중열교환기 모델의 주입수의 온도변화에 대한 모델링 결과는 그림 3-26과 같음
 - 모델링에서 주입수가 환체 공간으로 이동할 때 최저 온도는 37.1~39.1℃, 열교환기 공저부 온도는 43.8~44.5℃로 산출됨
 - Inner Pipe 내부를 거쳐 토출되는 온도는 41.8~44.3℃로 추정되며, 열 손실률은 표 3-18과 같음

표 3-18 시스템에 따른 열 손실률

구 분	열 손실률(K/km)
복합튜브	0.4
GFRP	1.0
이중튜브 / GFRP	0.8
이중튜브	0.3
VIT	0.1

- 열수요량 대비 열 추출량의 모델링 결과는 다음과 같음

(가) 복합튜브

- 지중열교환기(BHE) 심도 2.5 km 지점의 암반 온도는 72℃를 보이며, 4월부터 10월까지 37℃ 보다 더 낮은 주입온도로 인하여 여름 동안 최대 64 kW의 열 추출량을 생산할 수 있음
- 겨울철 온실 시스템의 주입온도는 42℃로서 지중열교환기(BHE)의 주입온도와 토출온도의 온도 차이가 적으므로 이 기간 동안 최대 열 추출량은 16 kW를 나타냄
- 가장 열수요가 낮은 6월과 9월에만 온실 시스템의 열수요를 충족시킬 수 있음

(나) GFRP

- 4월부터 10월까지 37℃ 보다 더 낮은 주입온도로 인하여 여름 동안 최대 26~51 kW의 열 추출량을 생산할 수 있음
- 겨울철 온실 시스템의 주입온도는 42℃로서 지중열교환기(BHE)의 주입온도와 토출온도의 온도 차이가 적으므로 이 기간 동안 최대 열 추출량은 3~6 kW를 나타냄
- 가장 열수요가 낮은 6월과 9월에만 온실 시스템의 열수요를 충족시킬 수 있음

(다) 이중튜브/GFRP

- 4월부터 10월까지 37℃보다 더 낮은 주입온도로 인하여 여름 동안 최대 58~62 kW의 열 추출량을 생산할 수 있음
- 겨울철 온실 시스템의 주입온도는 42℃로서 지중열교환기(BHE)의 주입온도와 토출온도의 온도 차이가 적으므로 이 기간 동안 최대 열 추출량은 10~13 kW를 나타냄
- 가장 열수요가 낮은 6월과 9월에만 온실 시스템의 열수요를 충족시킬 수 있음

(라) 이중튜브

- 4월부터 10월까지 37℃보다 더 낮은 주입 온도로 인하여 여름 동안 최대 65 kW의 열 추출량을 생산할 수 있음
- 겨울철 온실 시스템의 주입온도는 42℃로서 지중열교환기(BHE)의 주입온도와 토출온도의 온도 차이가 적으므로 이 기간 동안 최대 열 추출량은 10~13 kW를 나타냄
- 가장 열수요가 낮은 6월과 9월에만 온실 시스템의 열수요를 충족시킬 수 있음

(마) VIT

- 4월, 5월, 10월의 경우 전체 소요 열용량의 42~65%에 해당하는 열을 추출할 수 있음
- 겨울철의 경우 필요 열용량의 9~13%의 열을 추출할 수 있음
- 가장 열수요가 낮은 6월과 9월에만 온실 시스템의 열수요를 충족시킬 수 있음
- VIT의 경우 다른 시스템 보다 1년 동안 열 추출량이 가장 많음

3. 시추공 취득온도 시뮬레이션

가. 이론적 접근

(1) 지중온도

- 지역에 따라 다르지만 일반적으로 한반도의 지중 20 m에서의 심도지온 평균값은 Kringing법의 산술평균을 이용할 때 14.1°C²⁵⁾이며, 남한지역의 지중심도 3,000 m에서의 온도분포는 44.2~110.9°C로 조사되고 있음

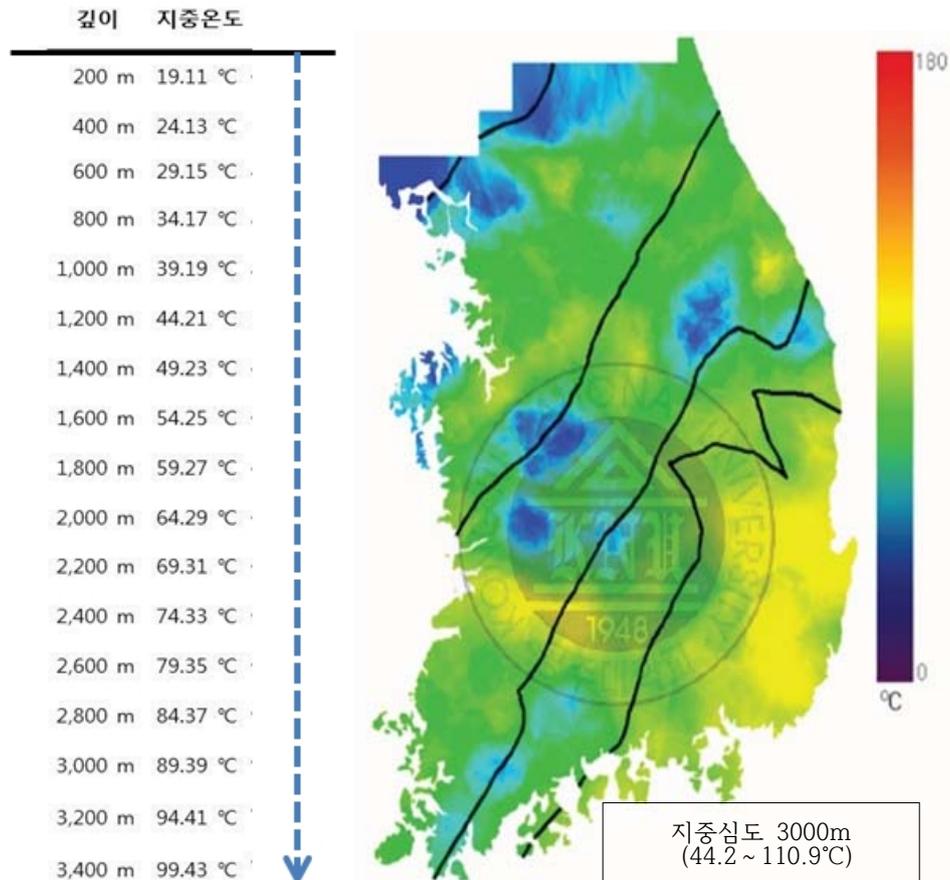


그림 3-27 지중심도 3000m, 90°C 기준에서 깊이에 따른 온도

- 땅속 3,000 m 깊이의 온도가 90°C 내외인 지역의 경우 깊이에 따라 1 km당 25.1°C 씩²⁶⁾ 높아진다는 기존연구를 근거로 하여, 3,400 m 깊이까지의 지중온도를 200 m 간격으로 분할하여 표시하면 그림 3-27과 같이 나타낼 수 있음
- 만일, 땅속에 수직으로 매설하여 되돌아오는 지중관로의 입구에 15°C의 물을 주입하면, 수직 지중관로를 흐르는 동안 지온의 영향으로 출구로 나올 때의 물의 온도는 변할 것이며, 변화의 크기는 관의 형상, 열전달 성능, 물의 이동속도 등과 함께 매 깊이에 따라 달라지는 지중온도의 영향에 의해 결정될 것임

25) 김형찬 외1. '지온 경사 산출을 위한 효과적인 온도검증자료 이용방법 연구', Econ. Environ. Geol. Vol.32, pp. 503-517, 1999.

26) Hyunchan Kim and Youngmin Lee, 'Heat flow in the Republic of KOREA', Journal of Geophysical Research, Vol.112, B05413, doi:10.1029/2006JB009,266, 2007.

(2) 지중관로의 전열량

- 지중배관 외부의 온도가 일정하다고 가정하고, 관속에 흐르는 물의 이동속도에 따른 출구온도의 변화를 추정해 보는 그림 3-28과 같은 관로에서 대수평균온도차(LMTD: Log Temperature Difference)를 사용, 온수유동에 대한 전열량(q)의 평형방정식을 이용하여 다음과 같이 유도하였음

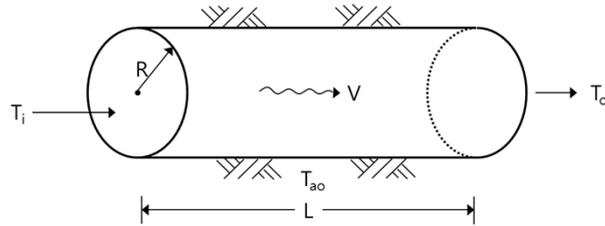


그림 3-28 지중 온수관로

$$q = UA \frac{(T_{ao} - T_i) - (T_{ao} - T_o)}{\ln [(T_{ao} - T_i)/(T_{ao} - T_o)]} = \rho WC_p (T_o - T_i)^{27)} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, q : 전열량 [kJ], U : 열전달계수 [w/m \cdot k], A : 관 둘레면적($2\pi RL$) [m 2],

ρ : 온수밀도 [kg/m 3], W : 유량($\pi R^2 V$) [m 3 /hr], C_p : 온수비열 [kJ/kg.k],

T_i : 온수 입구온도 [°C], T_o : 온수 출구온도 [°C], T_{ao} : 관 주위온도 [°C]

식(1)에 대하여 정리하면

$$q = UA \frac{+1}{\ln [(T_{ao} - T_i)/(T_{ao} - T_o)]} = \rho WC_p [kJ] \dots\dots\dots (2)$$

식(2)에 의해 관의 입구에 주입되는 물의 온도(T_i)가 배관에서 이동하는 동안 지중온도 (T_{ao})에 영향을 받아 변화된 출구 온수온도(T_o)를 유도하면

$$\begin{aligned} \frac{+UA}{\rho WC_p} &= \ln [(T_{ao} - T_i)/(T_{ao} - T_o)], \\ - \frac{+UA}{\rho WC_p} &= \ln \frac{T_{ao} - T_o}{T_{ao} - T_i} \\ e^{-\frac{+UA}{\rho WC_p}} &= \frac{T_{ao} - T_o}{T_{ao} - T_i} = 1 + \frac{T_i - T_o}{T_{ao} - T_i} \\ T_o - T_i &= \left(1 - e^{-\frac{+UA}{\rho WC_p}} \right) \times (T_{ao} - T_i) \end{aligned}$$

27) 송재엽, '공동주택 바닥난방 시스템용 자동온도조절기의 제어특성 및 열환경 해석에 관한 연구', 강원대학교 석사학위논문, pp. 9-10, 2006.

$$\begin{aligned}
T_o &= T_i + (T_{ao} - T_i) \cdot [1 - \exp(-\frac{+UA}{\rho WC_p})] \\
&= T_i + (T_{ao} - T_i) \cdot [1 - \exp(-\frac{+U \cdot 2\pi R \cdot L}{\rho \cdot \pi R^2 \cdot V \cdot C_p})] \dots\dots\dots (3)
\end{aligned}$$

출구 온수온도(T_o)는 관의 길이(L)에 비례하며, 유속(V)에 반비례하는 지수함수 특징으로 나타나는 것을 알 수 있음

(3) 지중 수직관로의 전열량

- 식(3)에 의하여 땅속으로 깊어질수록 해당 깊이의 지중온도가 상승하는 경우에 있어는 이에 따른 영향에 의하여 관속에 흐르는 물의 온도에 대하여는 다음과 같이 나타낼 수 있음
- 표 3-20의 우측 그림에서 땅속 120 m의 관로 x1 지점에서 물의 온도는 입구에서 들어오는 물의 온도(T_i)와 x1 지점 관로주위 온도(T_{a1})라고 하였을 때 이 지점에서의 관로 내부 물의 온도(T_{x1})는 다음과 같음

$$T_{x1} = T_i + (T_{a1} - T_i) \cdot [1 - \exp(-\frac{+U \cdot 2\pi R \cdot L}{\rho \cdot \pi R^2 \cdot V \cdot C_p})] \dots\dots\dots (4)$$

여기서, $C = [1 - \exp(-\frac{+U \cdot 2\pi R \cdot L}{\rho \cdot \pi R^2 \cdot V \cdot C_p})]$ 으로 대치하면

$$\begin{aligned}
T_{x1} &= T_i + (T_{a1} - T_i) \cdot C \\
&= (1 - C) T_i + C T_{a1} \dots\dots\dots (5)
\end{aligned}$$

이와 같이 x2 지점에서의 관로내부 물의 온도(T_{x2})를 나타내면 다음과 같고, 이 지점에서의 관로주위 온도는 T_{a2} 임

$$\begin{aligned}
T_{x2} &= T_{x1} + (T_{a2} - T_{x1}) \cdot C = (1 - C) T_{x1} + C T_{a2} \\
&= (1 - C)^2 T_i + (1 - C) C T_{a1} + C T_{a2} \dots\dots\dots (6)
\end{aligned}$$

x3 지점에서의 지중 관로주위 온도를 T_{a3} 라고 할 때 관로내부 물의 온도(T_{x3})를 나타내면

$$\begin{aligned}
T_{x3} &= (1 - C) T_{x2} + C T_{a3} \\
&= (1 - C)^3 T_i + (1 - C)^2 C T_{a1} + (1 - C) C T_{a2} + C T_{a3} \dots\dots\dots (7)
\end{aligned}$$

따라서 n번째 지점의 관로내부에 순환되는 물의 온도는 정리하면 다음과 같음

$$T_{xn} = (1 - C) T_{xn-1} + C T_{an}$$

$$\begin{aligned}
&= (1-C)^n T_i + (1-C)^{n-1} C T_{a2} + (1-C)^{n-2} C T_{a3} + \dots \\
&\quad \dots + (1-C) C T_{n-1} + C T_{an} \\
&= (1-C)^n T_i + \sum_{s=1}^n C(1-C)^{n-s} T_{as} \dots \dots \dots (8)
\end{aligned}$$

대치한 C를 환원하면

$$\begin{aligned}
T_{xn} &= (1 - (1 - \exp(-\frac{U \cdot 2\pi R \cdot L}{\rho \cdot \pi R^2 \cdot V \cdot C_p})))^n T_i \\
&+ \sum_{s=1}^n (1 - \exp(-\frac{U \cdot 2\pi R \cdot L}{\rho \cdot \pi R^2 \cdot V \cdot C_p})) \\
&\quad \cdot (1 - (1 - \exp(-\frac{U \cdot 2\pi R \cdot L}{\rho \cdot \pi R^2 \cdot V \cdot C_p})))^{n-s} T_{as} \dots \dots \dots (9)
\end{aligned}$$

식(9)에서 열전달계수 U는 지중열교환기에서 일어나는 총 열전달 계수이며, 열 저항 값으로 사용되는 R_c, R_p, R_s 에 의하여 다음과 같이 식으로 나타낼 수 있음

$$U = \frac{1}{R_t}, \quad R_t = R_c + R_p + R_s \dots \dots \dots (10)$$

여기서, U : 지중관의 전체적인 열전달 계수(W/m°C)

R_t : 파이프의 물과 토양 사이에서 일어나는 전체 열 저항(°C/W)

R_c : 유체 및 파이프 내면 사이의 대류 열전달에 대한 열 저항(°C/W)

R_p : 파이프 재질을 통해 일어나는 전도열전달에 대한 열 저항(°C/W)

R_s : 파이프 외부와 토양에서 일어나는 전도 열전달에 대한 열저항(°C/W)

지중관 및 주변 토양간의 열전달을 계산하기 위한 각 R_c, R_p, R_s 의 열전달 계수는 다음 식을 사용하여 결정됨

$$\begin{aligned}
R_c &= \frac{1}{2\pi r_1 L h_c}, \\
R_p &= \frac{1}{2\pi L k_p} \ln \frac{r_1 + r_2}{r_1}, \\
R_s &= \frac{1}{2\pi L k_s} \ln \frac{r_1 + r_2 + r_3}{r_1 + r_2} \dots \dots \dots (11)
\end{aligned}$$

여기서, r_1 : 파이프 내부 반지름(m), r_2 : 파이프 두께(m),

r_3 : 파이프 외부표면과 토양사이의 거리(m), L : 파이프 길이(m),

h_c : 배관 내부 표면에서의 대류 열전달 계수, k_s : 흙의 열전도율(W/m°C),

k_p : 파이프의 열전도율(W/m°C)

지중의 토양이나 암반 그리고 지중열교환기 배관에 대한 열전도율은 표 3-19의 값을 참고하여 이용할 수 있고, 열 교환하는 관로 내부표면에서의 대류 열전달계수(h_c)와 레이놀즈 수(Re), 너셀 수(Nu)는 다음 식에 의해 계산됨

$$h_c = \frac{N_U k_w}{2r_1}, \quad N_U = \frac{(f_w/2)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7(f_w/2)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)},$$

$$f_w = (1.58 \ln Re - 3.28)^{-2}$$

여기서, k_w : 물의 열전도율(W/m°C), Nu : 너셀 수,

Re : 레이놀즈 수, Pr : 프란틀 수

레이놀즈 수(Re)와 프란틀 수(Pr)는 다음 식으로 산출

$$Re = \frac{V \times D}{\nu} = \frac{\rho \times V \times D}{\mu}, \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu \times Cp}{kw}$$

여기서, ν : 동 점성계수(m²/s), α : 열확산율(m²/s),

μ : 점성(점성계수/1000)]

수직으로 매설된 지중열교환기 파이프의 규격과 내부에 흐르는 물의 유속(V), 시간(t)에 의해 유량을 얻을 수 있으며, 여기에 입구온도(T_i)와 출구온도(T_o) 차이를 적용하여 임의의 유속에서 지중으로부터 취득하는 열량(Q)을 알아볼 수 있음

또한 관을 통과하는 물의 속도와 온도의 상관관계를 이용하여, 유속을 가변시켜 지중열에서 취득하는 열량의 변화 특성을 살펴볼 수 있음

우선 취득열량(Q)는 물이 얻은 온도와 관을 통과한 물의 질량에 관계하며, 일반식은 다음과 같음

$$\begin{aligned} Q &= C_p G \Delta T = C_p G (T_2 - T_1) \\ &= C_p G (T_o - T_i) \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

여기서, Q : 취득열량 [kJ/hr], G : 유량 [kg/hr]

따라서 지중심도에 따라 지온이 상승하는 경우 x지점에서의 취득열량은 식(12)에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있음

$$Q = C_p G (T_{xn} - T_i) \dots\dots\dots (13)$$

표 3-19 토질 및 HDPE관 물성

매질	열전도율(W/m.K)	비열(10 ³ J/m ³ .K)	제품군	물성	단위	HDPE(고밀도)
자갈	0.7~0.9	1.4	수도관	밀도	g/cm ³	0.953
거친모래	0.7~0.9	1.4	수도관	비열	kcal/kg°C	0.55
가는모래	0.7~0.9	1.4	수도관	선팽창계수	cm/cm°C	11 × 10 ⁻⁵
점토	1.2~2.4	2.4~3.3	수도관	신율	%	6000이상
점토	0.85~1.1	3.0~3.6	수도관	연화온도	°C	121
석회암	1.5~3.3	2.13~5.5	수도관	열전도율	W/cm°C	0.4
점적 석회암	2.5~4.3	2.13~5.5	수도관	용융지수	g/10min	0.08~0.12
사암	2.3~6.5	2.13~5.0	수도관	용점	°C	128
협암(이판암)	1.5~3.5	2.30~5.5	수도관	저온취화온도	°C	-40
균열 화성암/변성암	2.5~6.6	2.2	수도관	충격강도	kgcm/cm ²	13
화성암/변성암	2.5~6.6	2.2	수도관	포하손비		0.4
			수도관	항복인장강도	kg/cm ²	2000이상
			수도관	흡수율	%	0.008

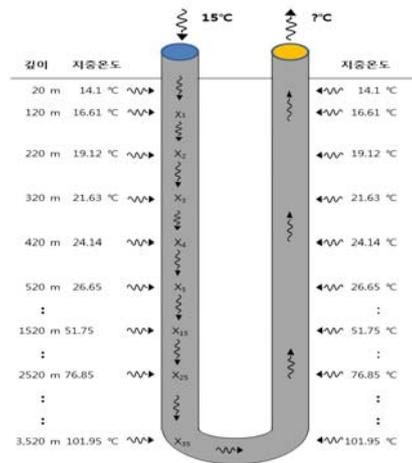
나. 취득온도 및 열량 시뮬레이션

(1) U-Tube 지중 열교환기 방식

- 조건 : 시추공의 열교환기는 Single well에서 U tube방식의 밀폐형관을 사용하고, 지중 심도 20 m에서 14.1°C와 이후 땅속 깊어질수록 온도는 25.1 °C/km 증가하며, 지중심도 3,500 m에서 회수되어 지상으로 돌아오는 부분에 대하여는 충분히 단열되어 손실이 없는 것으로 함
- 관로의 입구에 15°C의 물을 주입하고, 유속을 0~20 %로 가변하면서 관의 출구로 회수되는 물의 온도와 열량에 대한 시뮬레이션 세부조건은 표 3-20과 같음

표 3-20 시뮬레이션 조건 및 지중 수직관로

구분	조건	비고
지중 20m	14.1 °C	-
T_{ao}	25.1 °C/km	적용 지온
T_i	15 °C	주입 물온도
V	0 ~ 20 %	관로 유속
R	32.5 mm	관 반지름
ρ	1,000 kg/m ³	온수 밀도
C_p	4,184 kJ/kg.k	온수 비열
U	2.72 w/m.k	열전달계수
L	3,500 m	관 길이



- 수직밀폐형열교환기에서 관로 내부의 유속에 따른 출구의 온도와 취득열량에 대한 유도식을 MATLAB P/G으로 작성하고 유속-온도, 유속-취득열량을 다음과 같이 수행하여 분석함

- 열전달계수 U 의 값은 한국냉동공조인증센터에서 2008년부터 수행한 천부지열 열교환기 36건의 측정값 중에서 가장 빈도가 높았던 범위 2.50~2.99 (W/m²·K)의 중간 값인 2.74을 적용함
- 관로 입구에 15°C의 물을 넣고 유속을 0에서부터 20 %까지 가변했을 때 출구 물의 온도 특성을 살펴봄

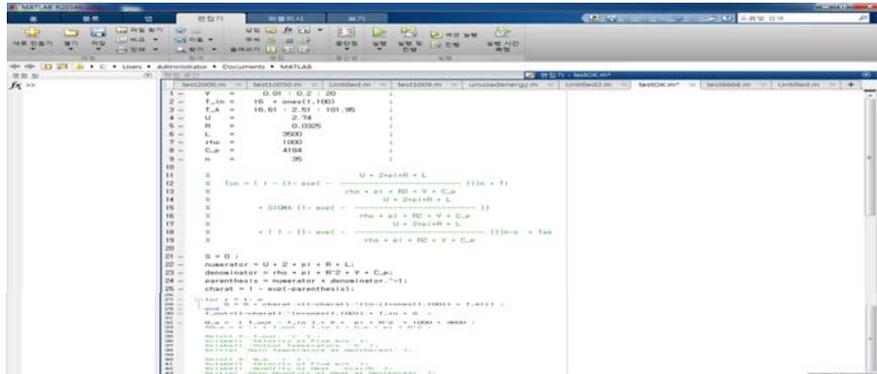


그림 3-29 MATLAB P/G

- 유속 1 %이하에서는 출구 물의 온도가 83°C이상으로 나타남
- 유속이 빨라질수록 심부지열로부터 열을 취득하여 회수된 물의 온도는 점점 낮아져 13 % 이상에서는 30°C이하로 수렴하는 것으로 그림 3-30과 같이 나타남
- 농작물을 재배하는 원예시설의 온실에서는 일반적으로 온수난방으로 사용하는 물의 온도가 50°C 내외이며, 이를 기준으로 했을 때 유속은 4.4 %이었으며, 이 이하에서 유속이 느려질수록 출구 물의 온도는 빠르게 상승하는 것을 볼 수 있었음

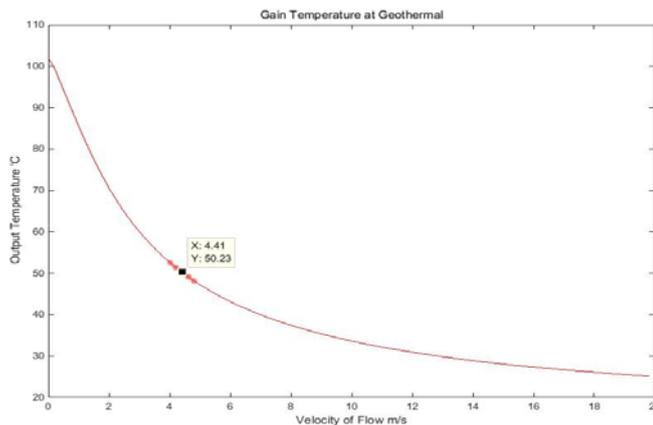


그림 3-30 Temperature and Velocity Graph

표 3-21 Temperature and Velocity Table

X(유속, m/s)	Y(온도, °C)
4.01	52.572178
4.21	51.363829
4.41	50.227702
4.61	49.157858
4.81	48.148939

- 출구 물의 온도가 50°C, 유속 4.4 m/s일 때, 심부지열로부터 얻는 열량은 499,300 kcal/hr로 나타났으며, 유속이 빨라질수록 증가하다가 14 m/s 이상에서는 둔화되어 520,000 kcal/hr 내외였고, 유속이 2 m/s 이하로 느려질 때는 취득열량이 급격히 감소되는 경향을 그림 3-31에서 볼 수 있음

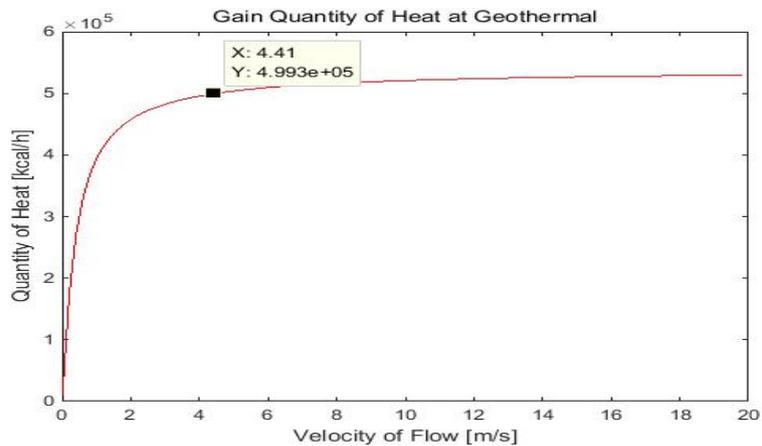


그림 3-31 Quantity of Heat and Velocity Graph

표 3-22 Quantity of Heat and Velocity Table

X(유속, m/s)	Y(열량, kcal/hr)
4.01	495,600
4.21	497,500
4.41	499,300
4.61	500,900
4.81	502,400

- 수직 지열열교환기의 관로 직경을 65 mm에서 직경 100 mm관으로 하여 증가시키고 다른 조건들은 같은 상태에서 회수되는 물의 온도와 열량에 대한 시뮬레이션을 실시, 관경 증가가 온도와 취득열량에 미치는 영향을 분석함
- 배관내부에서 물의 유속이 4.41 m/s일 때
 - 65 mm 배관에서 출구의 온수온도 : 50.23°C
 - 100 mm 배관에서 출구의 온수온도 : 40.46°C

- 열교환기의 관경을 크게 하는 경우 관경이 작았을 때에 비하여 9.77°C 낮아진 것으로 나타나 관경의 증가가 출구 물의 온도는 낮아지는 경향을 보였음
- 따라서 100 mm 배관에서는 출구 온수온도를 50°C이상을 확보하기 위해서는 열교환기 관로내부의 유속은 3 ㎍이하로 유지하여야 함을 알 수 있었음

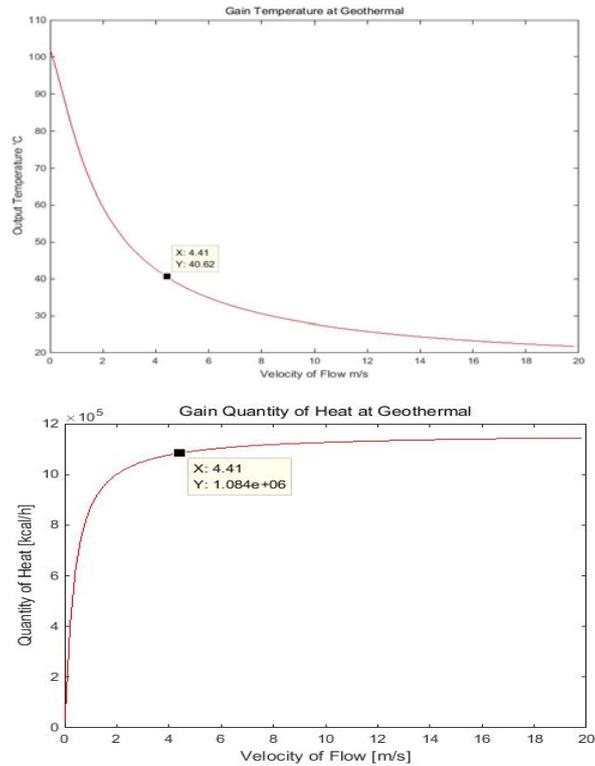


그림 3-32 Temperature, Quantity of Heat and Velocity(100mm)

- 유속이 4.41 ㎍일 때 100 mm 열교환기가 지중으로부터 취득하는 열량은 1,084,000 kcal/hr였으며, 65 mm의 경우에 비하여 584,700 kcal/hr 증가하는 것으로 나타났음
- 관경을 증가시켰을 때 출구 물의 온도는 낮아졌지만 관경 증가에 따른 유량의 증가 영향이 더 커 취득되는 열량이 증가한 것으로 나타남
- 온실 난방에 유용한 출구 온수온도를 50°C이상 유지하기 위하여 유속을 3 ㎍로 하였을 경우에는 1,050,000 kcal/hr 열량을 얻는 것으로 나타났으며, 이는 65 mm 관로에서 출구온도 50°C를 유지하였을 때 얻는 열량에 비하여 550,700 kcal/hr 증가한 것임
- 따라서 지중열교환기의 배관 관경의 증가는 출구 물의 온도가 낮아지는 경향은 있지만 취득되는 열량은 증가하므로 일정 이상의 출구 물 온도 확보와 최대 열량 취득을 위해서는 유속을 적절히 제어할 필요가 있음을 알 수 있었음
- 추가적으로 관로내부 유속의 가변은 온도와 취득열량에 대한 고려와 함께 관로 내부의 난류 발생과 제작 가능한 펌프모터 등 실용적인 부분에 대하여도 검토가 필요하고 인버터를 적용하여 펌프모터를 가변속 운전을 하는 경우 전동기의 소비전력과 최대열량을 비교할 필요가 있음

- 인버터에 의한 제어운전의 현장 실험한 사례에서 보면, 특정한 유출량지점에서 최대 효율을 나타내며, 그 이하나 이상의 유출량을 갖도록 운전하는 지점에서는 운전 에 따른 소비전력 대비, 유량의 효율은 낮아지는 경향을 보였음
- 또한 인버터로 최대 효율 점으로 속도 제어하여 운전할 경우 연간 전력비용이 32.78% 절감되는 것으로 나타나²⁸⁾ 심부 지열에서도 최대열량을 취득하면서 소비전력이 낮은 전 동기 속도지점에서의 운전이 필요함을 알 수 있음
- 따라서 심부지열의 열교환기 시공은 시공의 난이도가 높고 비용이 많이 드는 점을 고려할 때 하나의 시추공에서 최대한 안정적으로 열량을 취득하는 것이 바람직하므로 지중 관로 내에 유속에 따른 출구온수의 온도변화특성과 이에 따른 취득열량의 추이에 의해 최대효율의 열량취득을 위한 가변속 운전이 필요함을 알 수 있었고, 현장의 여건은 이론적으로 감안하는 요소 이외에 지온, 열전달률 등 여러 변수가 다르기 때문에 유량, 입·출구온도, 소비전력 등을 측정·분석하는 것을 기반으로 현장실험을 통해 실제값에 접근하도록 진행하였음
- 또한 하나의 시추공에서 취득할 수 있는 열량을 추정할 수 있게 되어 열량공급과 이에 적합한 온실규모에 따른 시스템설비의 구성 등을 효과적으로 계획할 수 있었음

(2) Co-axial 열교환기

- 시추공의 열교환기가 그림 3-33과 같이 Co-axial방식으로 설치되는 경우, 시추공 외벽 주변으로 주입되어 들어간 물은 심부지열과 열교환 후 시추공 중앙에 설치된 파이프를 통하여 지상으로 돌아오기 됨에 따라 Co-axial방식에서의 시추공에 공급되는 유량에 대한 단면적은 회수용 파이프의 단면적을 제외한 부분으로 볼 수 있음

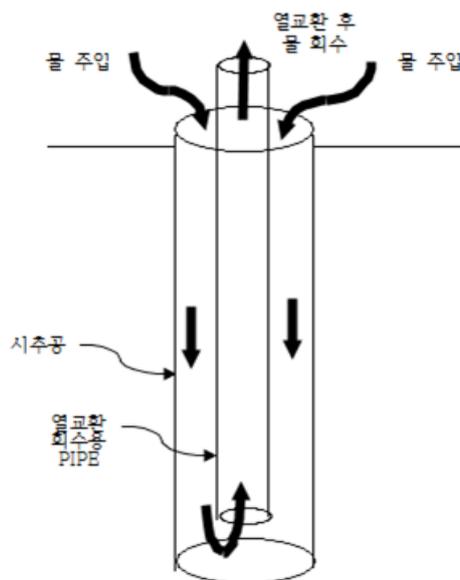


그림 3-33 Co-axial

28) 정만호, '수도설비의 인버터 모터 적용 방안' 한양대학교, 석사학위, pp. 46-52, 2010.8.

- U-tube방식에서 유도한 출구온도의 관계식에서 그림 3-34와 같이 시추공 내부 반지름을 R1이라하고, 그 내부에 설치되는 회수용 파이프의 외경에 대한 반지름을 R0라고 할 때, 시추공 전체 단면적에서 내부 회수용 파이프의 단면적을 고려함
- 열교환 후의 출구온도는 식(9)를 이용하여 다음과 같이 유도할 수 있음

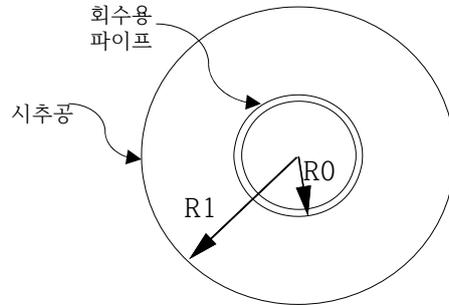


그림 3-34 Co-axial 시추공 및 관로 단면

$$\begin{aligned}
 T_{xn} = & \left(1 - \left(1 - \exp\left(-\frac{U \cdot 2\pi R_1 \cdot L}{\rho \cdot \pi(R_1^2 - R_0^2) \cdot V \cdot C_p}\right) \right) \right)^n T_i \\
 & + \sum_{s=1}^n \left(1 - \exp\left(-\frac{U \cdot 2\pi R_1 \cdot L}{\rho \cdot \pi(R_1^2 - R_0^2) \cdot V \cdot C_p}\right) \right) \\
 & \cdot \left(1 - \left(1 - \exp\left(-\frac{U \cdot 2\pi R_1 \cdot L}{\rho \cdot \pi(R_1^2 - R_0^2) \cdot V \cdot C_p}\right) \right) \right)^{n-s} T_{as} \quad \dots\dots\dots (14)
 \end{aligned}$$

- 식(14)에서 지중열교환기 총 열전달계수 U는 열교환용 물과 심부지중에서 일어나는 전체열저항(°C/W) R_t 의 역수이므로 R_c (시추공 내면 사이의 대류 열전달에 대한 열 저항), R_p (시추공을 통해 일어나는 전도열전달에 대한 열 저항), R_s (시추공과 지중에서 일어나는 전도 열전달에 대한 열저항)의 합으로 산출함
- R_c 는 $R_c = \frac{1}{2\pi r_1 L h_c}$ 식에 의해, R_p , R_s 에 대하여는 화강암 지반을 시추하여 사용하므로 화강암의 열전도율을 적용하여 시뮬레이션을 수행함
- 시뮬레이션 조건
 - 화강암 지반으로 깊어질수록 25.1 °C/km씩 지온 증가함
 - 지중심도 3,500 m에서 지상으로 돌아오는 파이프는 열 손실이 없음
 - Co-axial 방식 시추공의 관로 입구에 15°C의 물을 주입함
 - 관로내부 유속 0~20 ㎥/s
- 심부지열 지중 열교환 후 관의 출구로 회수되는 물의 온도와 열량에 대한 시뮬레이션은 표 3-23의 조건과 식(14)을 이용하여 MATLAB P/G으로 작성, 수행하여 분석함

표 3-23 시뮬레이션 조건

구분	조건	비고
지중 20m	14.1 °C	-
T_{ao}	25.1 °C/km	적용 지온
T_i	15 °C	주입수 온도
V	0 ~ 20 m/s	시추공 내부 유속
r_1	107.9 mm	시추공 내경의 반지름
r_0	55.0 mm	회수관 외경의 반지름
ρ	1,000 kg/m ³	온수 밀도
C_p	4,184 kJ/kg.k	온수 비열
k_s, k_p	2.5~6.6 W/m.k	시추공 벽측 열전달계수(화강암)
L	3,500 m	시추공 길이

```

70 Rpa = (2 + pi * L * kp) .^ -1 ;
71 Rpb = (r1 + r2) * (r1 .^ -1) ;
72 Rpb = Rpb + log(Rpb) ;
73 Rp = Rpa + log(Rpb) ;
74
75 Rsa = (2 + pi * L * ks) .^ -1 ;
76 Rsb = (r1 + r2 + r3) * ((r1 + r2) .^ -1) ;
77 Rsb = Rsa + log(Rsb) ;
78
79 Rt = Rc + 0.11 + 0.11 ;
80 Ut = (Rt) .^ -1 ;
81
82 S = 0 ;
83 numerator = Ut * 2 + pi * R1 * L ;
84 denominator = rho * pi * (R1^2 - R0^2) + V * Cp ;
85 parenthesis = numerator ./ denominator .^ -1 ;
86 charat = 1 - exp(-parenthesis) ;
87
88 for j = 1 : n
89     S = S + charat .* (1 - charat) .^ ((n - j) + ones(1, 100)) * T_A(j) ;
90 end
91 T_out = (1 - charat) .^ (n + ones(1, 100)) * T_in + S ;
92
93 Tdf = (T_out - T_in) ;
94 Q_a = Tdf * V * pi * (R1^2 - R0^2) + Cp * 3600 ;
95 %Q_a = V .* ( T_out - T_in ) * Cp + pi * (R1^2 - R0^2) ;
96
97 %plot( V, T_out, 'r' ) ;
98 %xlabel( 'Velocity of Flow [m/s]' ) ;
    
```

그림 3-35 시뮬레이션 P/G(MATLAB)

- 시추공 내의 열교환용 물의 유속이 2 m/s에서 열교환 후 나오는 물의 온도가 60°C, 4 m/s에서 43°C, 등 유속이 빨라질수록 점점 낮아지는 것으로 그림 3-36과 같음
- 유속에 따른 온도와 취득열량의 변화 패턴은 U-tube방식과 유사하였으며, 65 mm 배관인 경우보다 다소 낮고 100 mm보다는 다소 높은 온도였음

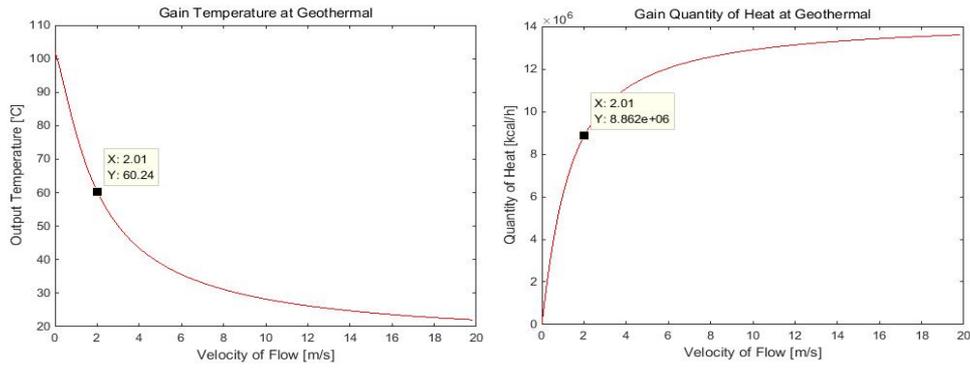


그림 3-36 Co-Axial방식에서 유속에 따른 온도와 열량

- 취득열량은 유속이 빠르면 증가하다가 6 m/s 이상에서는 증가폭이 둔화되었으며 U-tube 방식에서의 65 mm 배관이나 100 mm 배관인 경우보다 취득열량이 높음
- 시추공의 관경이 커져서 같은 유속에서도 유량의 증가와 함께 지층과의 접촉 면적이 커짐에 따른 영향으로 추정됨

(3) 물리검층 지온자료에 시뮬레이션

(가) 광주 하수종말처리장 지온자료에 의한 분석

- 위치 : 심도지온은 실험현장에서 북쪽으로 14 km지점 떨어진 광주시 서구 치평동 하수종말처리장 부지에 (주)한진디엔비에서 굴착한 심부시추공을 2012년 12월에 측정하여 ‘심부시추공 온도, 전기전도도, 자연감마선 물리검층’ 보고서에서 제시한 2,500 m 지층온도 자료를 이용함
- 지온 : 2,500 m 최종깊이 이수온도에 따른 측정온도는 74.47°C이었으며, 추정되는 지층온도는 온도변화 16.57°C를 고려한 91.04°C로 추정됨²⁹⁾
- 깊이별 지온 : 지중 20 m 지점은 14.1°C, 100 m 지점은 17.1776°C, 200 m 지점은 20.2552°C등으로 3.0776 °C/m씩 상승하여 지중 2,500 m 지점에서는 91.04°C에 이르게 되며, 이를 시뮬레이션의 지층온도로 적용함

29) 황세호 외2, ‘심부시추공 온도, 자연감마선 물리검층 기술자문보고서’, 한국지질자원연구원, (주)한진디엔비, 2012.12.



그림 3-37 물리검층 심부시추공 및 실험시추 현장위치

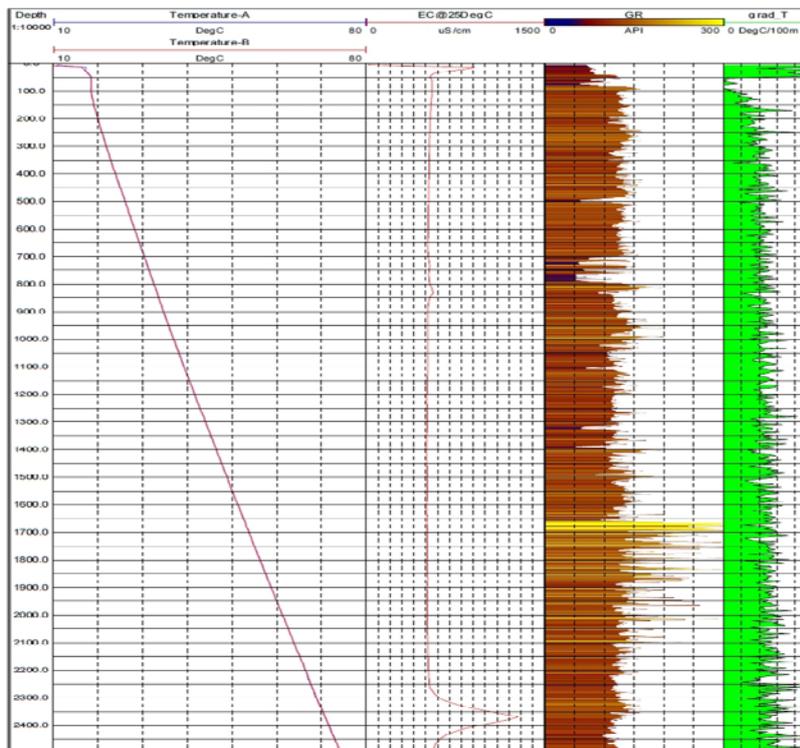


그림 3-38 광주하수종말처리장 심부시추공 물리검층

- 지열을 취득하기 위해 지상에서 넣는 물은 직경 215.9 mm의 시추공으로 투입되어 지하 2,500 m까지 내려가며 열교환 한 후, 내경 73.4 mm의 Inner pipe(열전도도 0.15W/m.k)를 통하여 지상으로 회수됨
- 심부시추공 지열로부터 취득하는 온도에 대한 시뮬레이션은 2,500 m까지 내려가는 동안에 대하여 분석, 실험현장 시추공의 시공 상태와 심부지온, 회수관로의 단열성능에 따라 실제 지상에서 취득하는 물의 온도는 달라질 것으로 추정됨

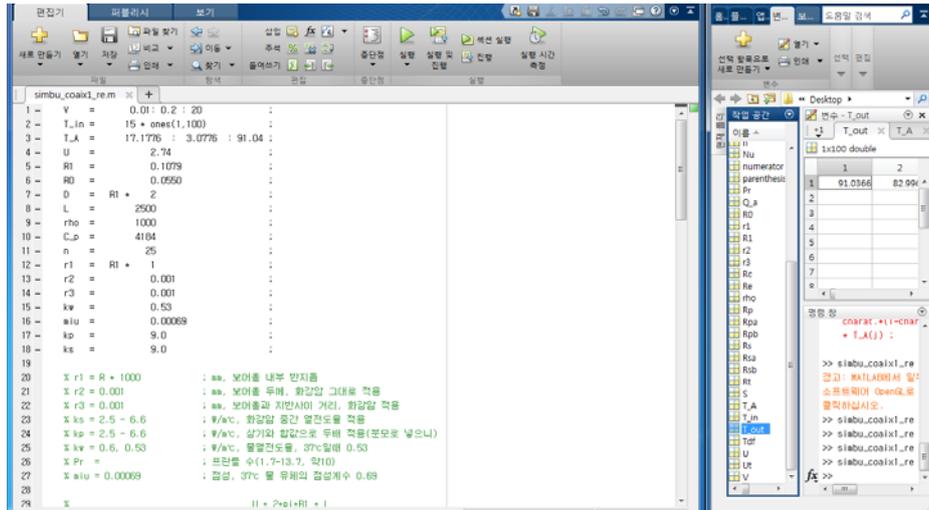


그림 3-39 실험현장 심부지열 취득온도 시뮬레이션 P/G

- 원예시설의 온실에서 일반적으로 이용하는 난방 온수가 50°C 내외임을 감안하여 볼 때 그림 3-40의 그래프에서 유속은 1.21 m/s에서 심부심도 2,500 m에서 취득되는 물의 온도는 51.09°C로 나타남
- 유속이 느려질수록 출구 물의 온도는 빠르게 상승하고 유속이 빨라질수록 점진적으로 온도가 낮아짐을 볼 수 있음
- 취득열량은 유속이 빠를수록 많아지며, 4 m/s까지는 급속히 상승하다가 그 이상에서는 유속을 증가시켜도 취득열량의 증가는 둔화되는 것으로 나타났음

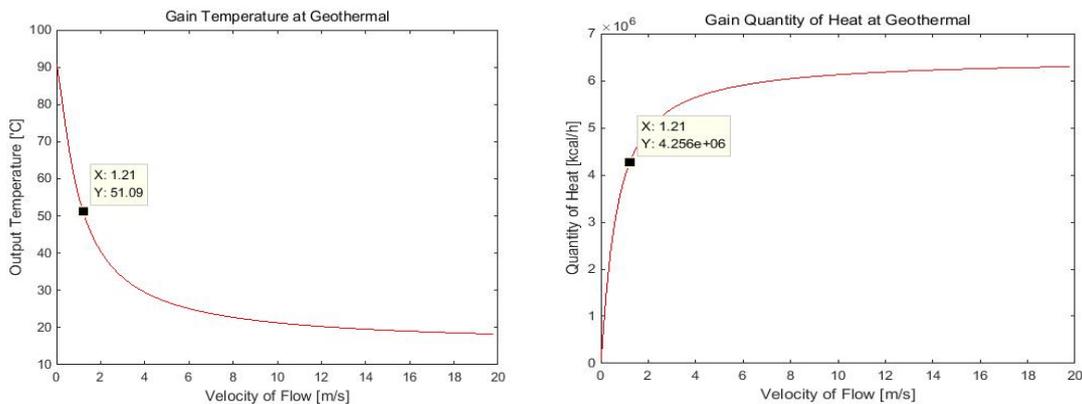


그림 3-40 실험현장 유속에 따른 온도 및 열량 시뮬레이션

- 열교환 후 Inner pipe를 통하여 회수되는 물의 유속은 연속의 법칙에 의해 변화되는데, 시추공에 흐르는 유속이 1.21 m/s에서는 7.741586875 m/s로 빨라지며 회수되게 되므로, 현장설치에서는 기술적인 검토가 요구됨
- 시추공에 흐르는 유속은 취득온도와 열량은 물론 회수관로의 유속에도 영향을 주므로 기술적으로 적절한 유속을 고려하여야 함

표 3-24 유속과 취득온도 및 열량 시뮬레이션

시추공 유속(m/s)	Inner Pipe 유속(m/s)	취득온도 (°C)	취득열량 (kcal/hr)
0.21	1.34	83.00	1.392×10 ⁶
0.61	3.90	66.61	3.068×10 ⁶
1.21	7.74	51.09	4.256×10 ⁶
1.41	9.02	47.68	4.491×10 ⁶
1.81	11.58	42.43	4.839×10 ⁶

- 지상으로부터 15°C물이 유속 0.21 m/s로 시추공 내부를 흘러 지하 2,500 m까지 내려갔을 때 지열을 취득하여 수온은 83°C로 상승하는 것으로 나타났으나 Inner pipe를 통하여 지상으로 되돌아오는 동안 열손실에 의하여 수온은 낮아질 것으로 추정되며, 이에 의해 취득열량도 감소할 것으로 판단됨
- 이 시뮬레이션에는 유속이 느리면 취득온도는 높고 열량은 감소하며, 빠른 유속에서는 수온은 낮아지지만 취득열량은 커지는 것으로 나타났음

(나) 전남농업기술원 지온자료에 의한 분석

- 본 연구의 실험현장 위치 : 전남 나주시 산포면 등수리 81-1 전남농업기술원
- 시추공 시추깊이 : 2,002 m
- 온도검층 : 한국지질자원연구원에서 2016년 5월 3~4일 실시
- 물리검층 결과 : 그림 3-41과 같이 최하부의 공내수 온도는 1,924.75 m에서 55.30°C으로 측정됨

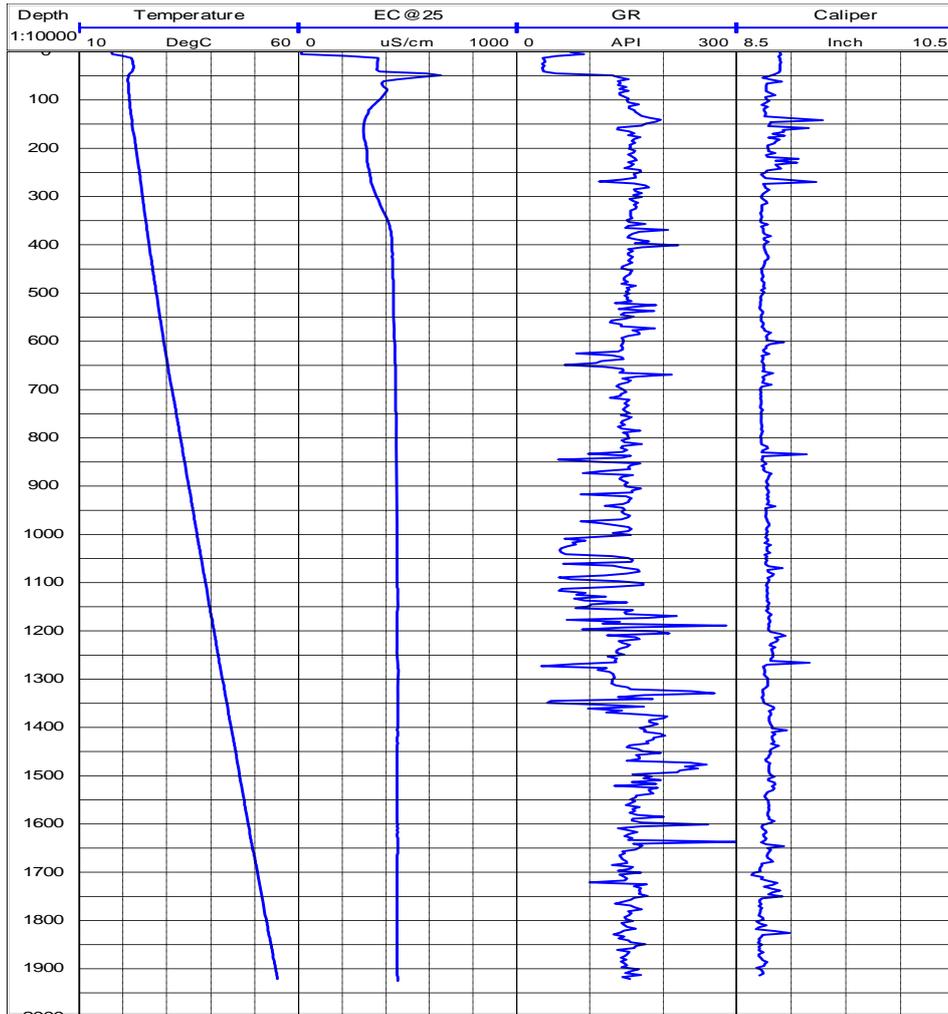


그림 3-41 2,002 m 시추공에 대한 물리검층 결과

- 시뮬레이션은 실험현장의 2,002 m 시추공 최하부 이수온도 55.3°C와 추정 증가율 고려온도 15°C를 감안한 지층온도 70.3°C로 추정한 값과 시추공, Inner pipe 등 시공된 규격에 의하여 실행함
- 실험현장의 시추공에 지중열교환기는 그림 3-42와 같이 Closed Co-axial방식이며, 심부지열 취득온도에 대한 시뮬레이션의 순서는 우선, 지중심도 2,000 m까지 내려가면서 지열을 흡수하고 온도가 올라가는 구간과 내부의 하부관(Inner pipe)를 통하여 되돌아오는 구간에서 관외부 물의 온도차에 의하여 열을 빼앗기는 부분으로 나누어 MATLAB program을 이용하여 시뮬레이션을 수행함
- 시뮬레이션 매개변수 : 표 3-25 참고

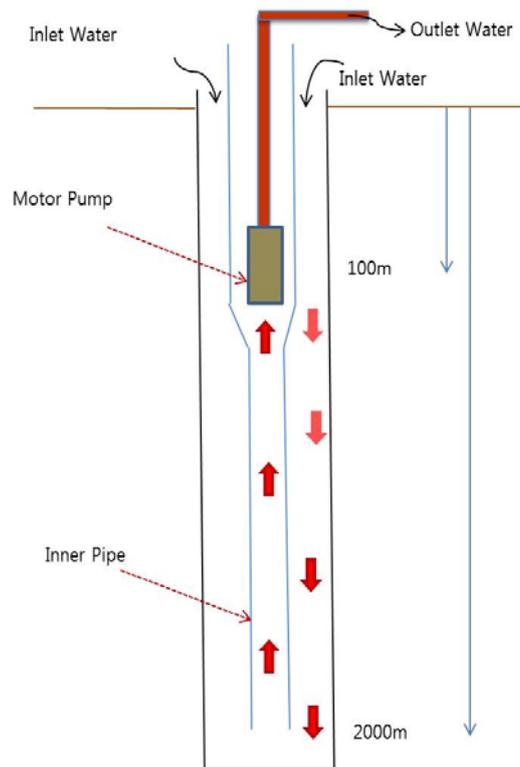


그림 3-42 Closed co-axial type borehole

표 3-25 Simulation parameters

Item	Description
T_{ao} [°C]	17 ~ 70
T_i [°C]	15, 25, 35
V [m/s]	0 ~ 10
R [mm]	Borehole : 107.95, Inner Pipe : 30(t15)
ρ [kg/m ³]	1,000
C_p [kJ/kg · k]	4,184
k [w/m ² · C]	Borehole(granite) : 2.9, Inner Pipe(HDPE) : 0.37
L [m]	2,000

① 지중심도 2,000 m 열교환 온수온도

- 시추공 시추공에 공급수의 온도를 각각 15°C, 25°C, 35°C로 하여 주입하고 유속을 0~10 m/s로 가변하면서 지중심도 2,000 m에 이르렀을 때 지열과 열교환을 마친 물의 온도를 시뮬레이션 했을 때 그림 3-43과 같이 나타남
- 여기에서 시추공 내부의 지중과 열교환하는 구간에서 유속(V)이 0.11 m/s 와 0.21 m/s 일 때 공급수 온도 차이에 따른 영향은 거의 없는 것을 알 수 있음
- 유속이 0.11 m/s일 때 지중심도가 2,000 m에 이르렀을 때 물의 온도는 65°C가 되며, 0.21 m/s로 증가하게 되면 59°C 내외로 나타남

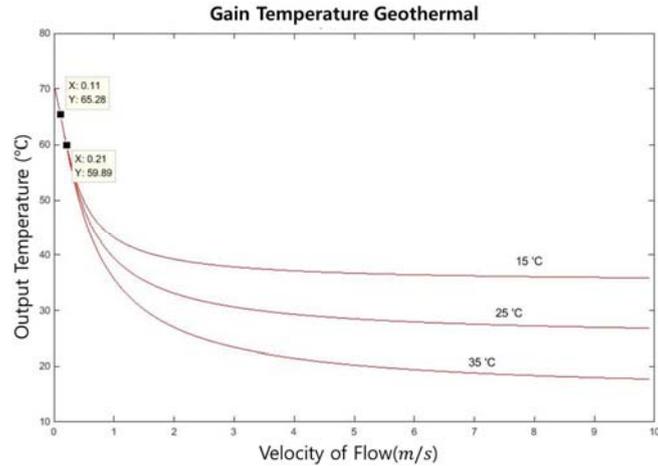


그림 3-43 2,000 m에서 유속에 따른 취득온도

표 3-26 2,000m에서 주입수온과 유속에 따른 취득온도

Input Water Temperature [°C]	V (Flow Velocity) [m/s]	Water Temperature at 2,000m [°C]
15	0.11	65.28
	0.21	59.70
25	0.11	65.28
	0.21	59.79
35	0.11	65.28
	0.21	59.89

- 유속 0.5 m/s 이상에서는 유속이 증가됨에 따라 공급되는 물의 온도에 의해 온도차가 커짐을 알 수 있고, 표 3-26은 두 유속지점의 근처에서 지중심도 2,000 m의 물의 온도를 나타낸 상세 데이터임

② 지중 열교환 후 지상 출구 환수온도

- 유속(V)이 0.11 m/s로 지중심도 2,000 m에 이르러 물이 65°C가 된 후, 하부의 내부관을 통하여 지상으로 환수되었을 때 출구 온도를 산정하여 그림 3-44에 나타내었으며, 이때 환수되는 구간의 유속은 내부관의 규격에 의해 산정되며 지열을 얻는 시추공 구간에 비하여 유속이 빨라짐
- 35°C의 물이 시추공 내에 공급되어 2,000 m의 시추공을 0.11 m/s로 지나면서 지열을 흡수하여 65°C로 상승한 후 내부관을 통하여 1.21 m/s로 지상으로 되돌아올 때 최종 물의 온도는 41°C로 계산되었으며, 유속이 증가할수록 취득되는 온도는 높아지는 것을 알 수 있음

- 공급되는 물의 온도가 25°C, 15°C로 낮아지면 최종 출구에서 얻어지는 온도도 낮아지는 것으로 나타남

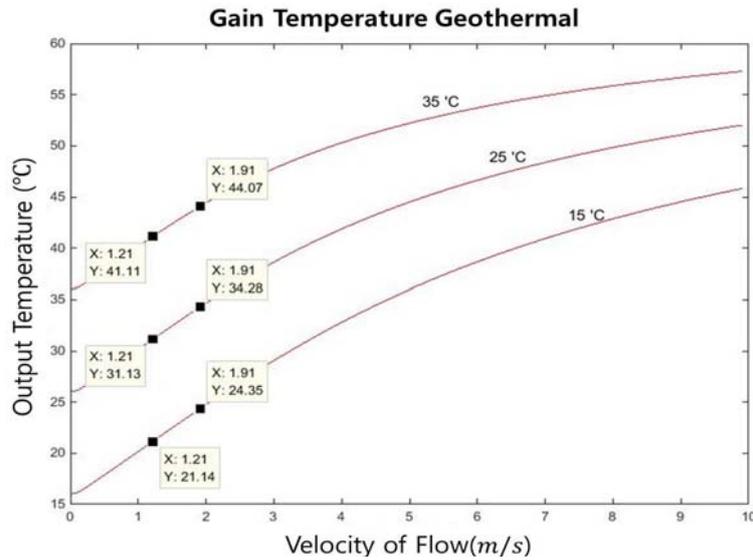


그림 3-44 지중취득온도 65°C에서 유속과 회수온도

- 시추공 지중 열교환 구간의 유속을 0.21%로 하여 지중심도 2,000m에서 물이 59°C로 되고 내부관을 2.41%의 유속으로 통과하여 지상으로 환수되었을 때 취득된 물의 온도는 그림 3-45과 같이 45°C로 나타남
- 또한, 공급되는 물의 온도를 각각 25°C, 15°C로 낮추었을 때 최종 취득온도도 비례하여 낮아지고, 유속을 증가를 증가시켰을 때는 온도가 높아지는 것을 알 수 있음
- 지중 시추공 열 교환 구간에서의 유속이 느린 경우 지하 2,000 m에서의 물의 온도는 높지만 회수되어 돌아오는 구간에서의 열손실로 인하여 유속이 빠른 경우에 비하여 최종 취득되는 물의 온도가 낮음을 그림 3-44와 그림 3-45에 의해 알 수 있음

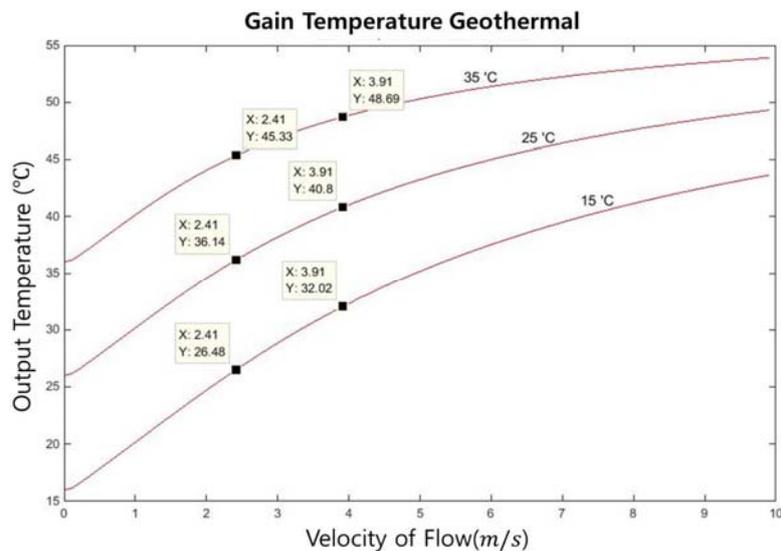


그림 3-45 지중취득온도 59°C에서 유속과 회수온도

- 시뮬레이션의 결과를 두 가지로 요약해 보면
 - 시추공에 주입되는 물의 온도를 15°C에서 25°C 그리고 35°C로 증가시켰을 때, 지중 2,000 m에서의 지열을 취득한 물의 온도는 유속 0.11 ㎥에서 각각 65.28°C, 65.28°C, 65.28°C로 변화가 없었고, 또한 유속 0.21 ㎥에서도 각각 59.70°C, 59.79°C, 59.89°C로 거의 변화가 없었음, 이는 지중 2,000 m 깊이에서 물의 온도는 주입되는 물의 온도에 크게 영향을 받지 않음을 보여주는 사례임
 - 지중 열교환하는 시추공 구간에서 물의 유속을 2배로 증가시켰을 때, 지중 2,000 m 시추공에서의 물의 온도는 일반적으로 5°C 내외로 감소하였으나, 이때 회수관로를 통하여 돌아오는 물의 속도도 2배로 증가되고, 시추공 출구로 나오는 최종 물의 온도는 3~4°C 정도 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 유속의 증가가 지중 시추공에서 지열 취득이 감소하지만, 회수관로의 구간에서 열손실이 줄어드는 효과가 있는 것으로 추정할 수 있음
- 따라서 유속제어를 통해 적절한 심부지열 취득이 가능하며, 회수관로의 단열성능이 매우 중요함을 알 수 있음

다. 소 결

- (1) 지중관로의 전열량 평형방정식을 이용하여 심부지열의 지중 열교환기 U-tube방식과 Co-axial방식에서 내부 유속에 따른 출구 온수의 취득온도 산출방정식을 유도하였으며, Matlab P/G으로 작성 취득온도와 열량의 변화특성을 이론적으로 선행 분석하고, 현장실험을 진행하였음
- (2) 나주 시추현장의 시추공 조건에서 U-tube방식을 적용할 경우, 내부유속 4.4 ㎥에서 출구온도가 50°C 내외였으며, 느릴수록 취득온도는 비선형적으로 높아지나 열량은 감소하였음. 또한 광경의 증가는 취득온도가 낮아지나 취득열량은 증가하는 것으로 나타나, 관 내부의 유속과 광경의 크기가 출구 수온과 취득열량에 중요한 요소임을 알 수 있었음
- (3) 나주 현장 시추공 내부에 설치한 Co-axial 방식으로 시뮬레이션을 적용했을 경우, 지중 열 취득구간의 내부유속이 0.11 ㎥일 때 지중 2,000 m에서의 수온은 65.28°C에 이르며, 지상으로 돌아왔을 때의 수온은 41.11°C로 되어 회수구간에서의 열손실이 큼을 알 수 있음. 유속을 증가시켰을 경우 회수 수온은 45°C로 나타나, 유속의 가변으로 취득온도와 열량을 높일 수 있는 것으로 나타났음

4. 온실제어 시뮬레이션

가. 심부지열 순환 시스템 시뮬레이터 제작

- 지중 수중 펌프, 온실 순환 펌프, 실내 열교환기 모니터링, 제어 알고리즘 시스템 개발
 - 지중 펌프로 지열수를 끌어올려 온실에 공급하기 위해서는 공급 온도와 리턴온도가 고정되도록 제어하여야 함

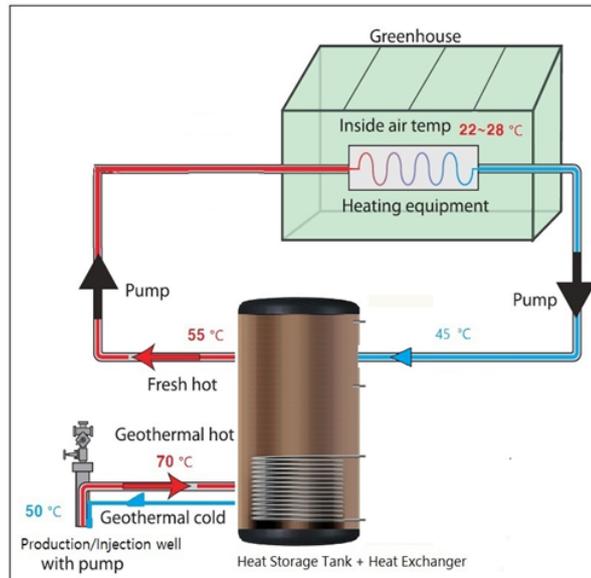


그림 3-46 지열 온실 난방 시스템 개략도

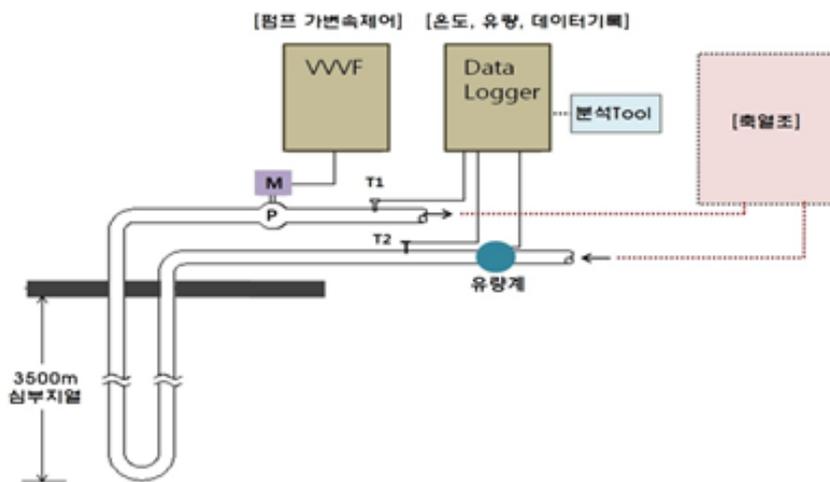


그림 3-47 지중 펌프 모니터링 및 제어 개념도

- 선행으로 연구된 미국의 Chewonki社의 GHP(Geothermal heat pump) 모니터링 시스템을 참조하여 지열 시스템을 제어하기 위한 센서로 입출구의 온도 센서 및 유량계, 실내외 온도 센서를 선정함

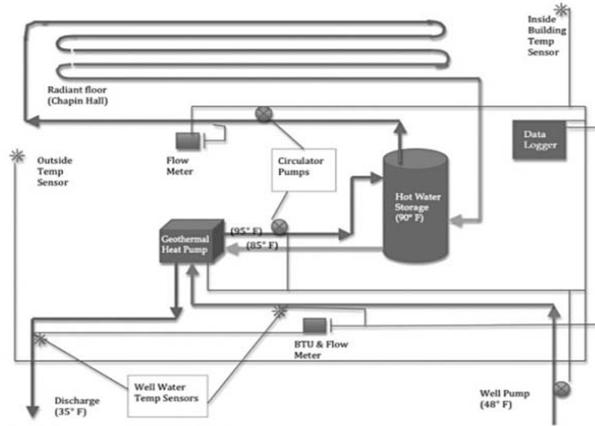


그림 3-48 미국 Chewonki社 GHP 모니터링 시스템

- 수중펌프, 순환펌프 모니터링 및 제어 알고리즘 시스템 개발
 - 시뮬레이터 장치는 실시간 원격 모니터링 및 제어를 위하여 Data logger 및 Controller인 NI-cDAQ를 이용하여 하드웨어를 구성함
 - 소프트웨어는 NI-LabVIEW, 운영체제는 Windows 8에서 운용되도록 시스템을 구성함

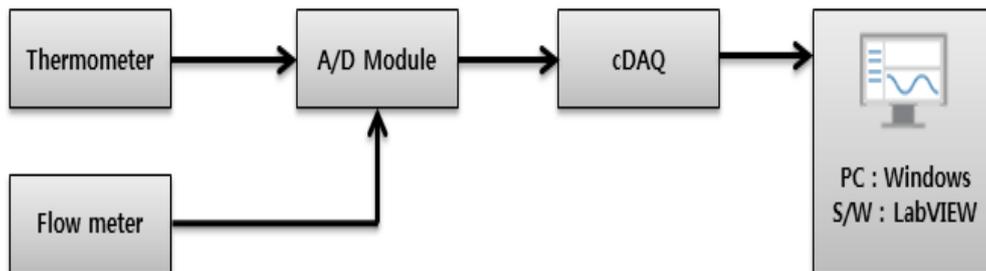


그림 3-49 모니터링 시스템 블록 선도

- 온도 센서, 유량계의 데이터를 모니터링 하기 위해서 A/D 컨버터 모듈인 NI 장비를 사용하여 Data logger인 NI-cDAQ에 데이터를 전달하였고 소프트웨어를 통해서 온도 범위를 조정하여 순환펌프를 On-off 제어할 수 있도록 프로그램을 구성함

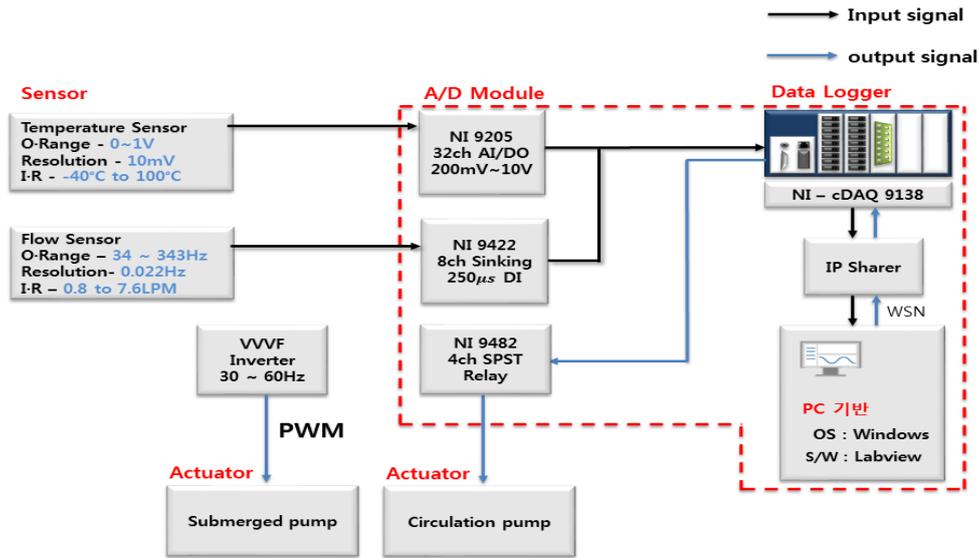


그림 3-50 시뮬레이터의 모니터링 및 제어 개념도

- 단상 220 V, 주파수 60 Hz의 수중펌프를 제어하기 위하여 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency) Inverter를 제작함
- 주파수를 변동시켜 수중펌프에 PWM 방식으로 신호를 전달하여 수중펌프를 변속 제어함
- VVVF 인버터 내의 다이얼로 원하는 주파수 값을 세팅하게 되면 수중펌프의 속도가 변속되고 유량값을 제어할 수 있으며 소비전력 또한 낮출 수 있도록 구성함

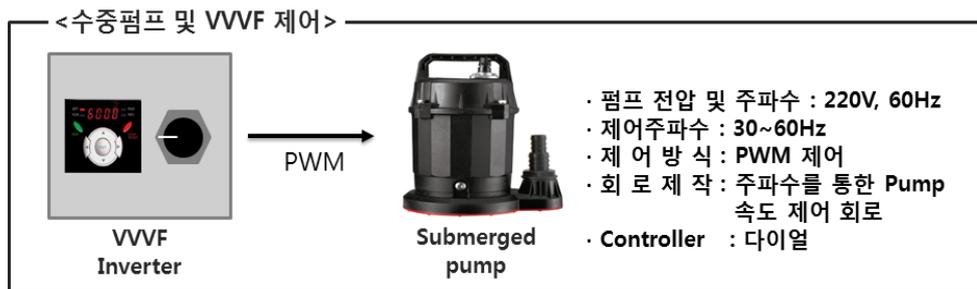


그림 3-51 수중펌프의 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency) 제어

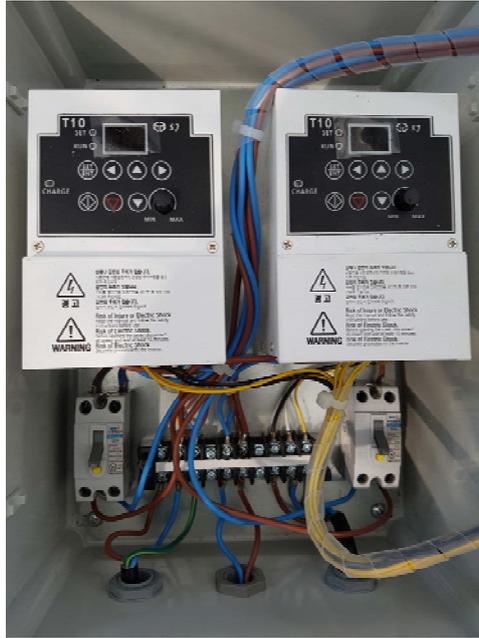


그림 3-52 VVVF 인버터 사진

<AC 가변속 드라이브 사양>



- 출력 전압 : 24V
- 주파수 설정용 전압 : 0 ~ 10V
- 입력 전압 : 220 ~ 230V, 1Phase
- 인버터 용량 : 0 ~ 400Hz, 0.75kW

AC 가변속 드라이브

그림 3-53 VVVF 인버터 스펙

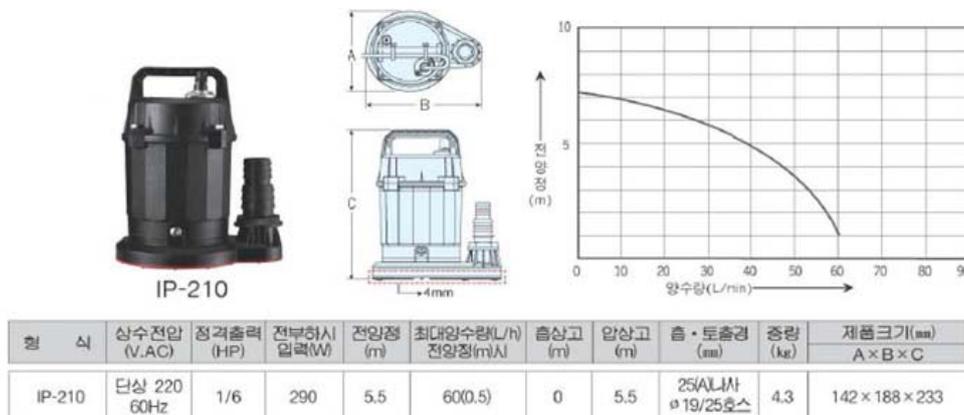


그림 3-54 수중펌프 스펙

- 단상 220 V의 순환펌프를 SPST(Single Pole Single Throw) 제어 방식을 통해 On-off 제어함
- 프로그램 내에서 On-off 온도 범위를 세팅하게 되면 D/A 모듈인 NI-9482에서 Relay 신호가 전달되어 순환펌프가 On-off 제어됨

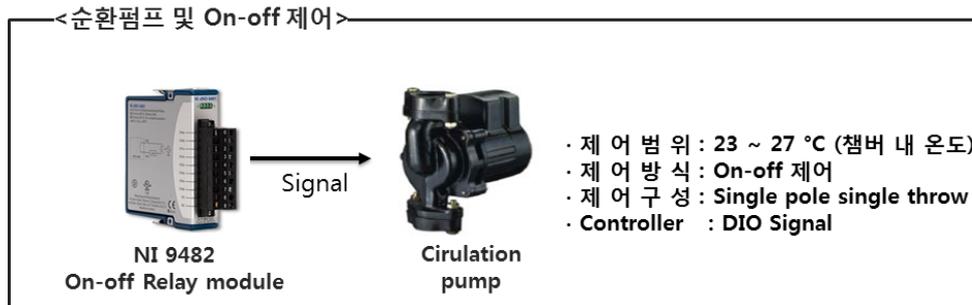


그림 3-55 순환펌프 On-off 제어

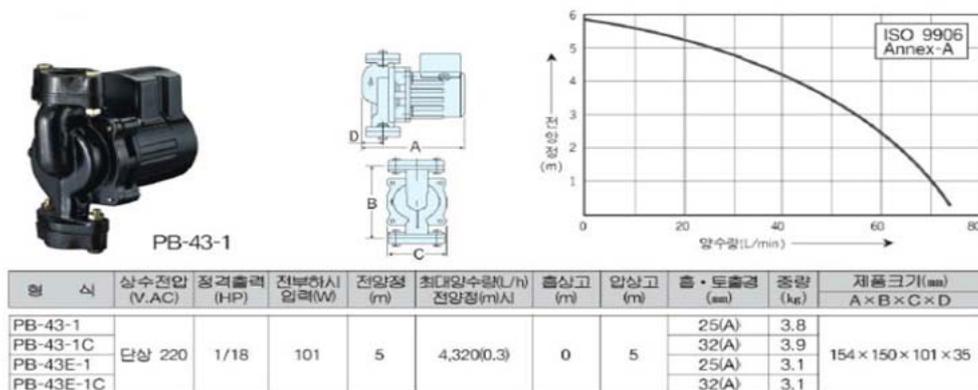


그림 3-56 순환펌프 스펙

○ 시뮬레이터 제작 및 구성

- 지중 깊이에 따른 심층수의 온도 변화를 나타내기 위하여 순환수로 물을 사용하고 수조 내부에 히터와 수중펌프를 설치한 후에 가열된 물을 열교환기로 순환되도록 하여 1차측 인 지중부를 재현함
- 온실을 재현한 챔버 내에 배관을 설치하고 순환펌프를 통해서 버퍼 탱크를 거쳐 물을 순환시키는 방식으로 2차측 온실부를 재현함
- 시뮬레이터의 열교환기는 50,000 kcal 용량의 열교환기가 사용됨
- 25A 규격의 PE-XA 재질의 배관을 시뮬레이터에 사용됨
- COP 값 산출을 위하여 6개의 온도계와 유량계 2개, 전력계 2개를 설치함

- 수중펌프는 VVVF Inverter의 다이얼 게이지로 주파수를 조정하여 변속 제어하는 방식을 조정하였고 순환펌프는 소프트웨어의 프로그램 내에 온도 범위 세팅으로 Relay 신호를 받아 On-off 제어되도록 구성함

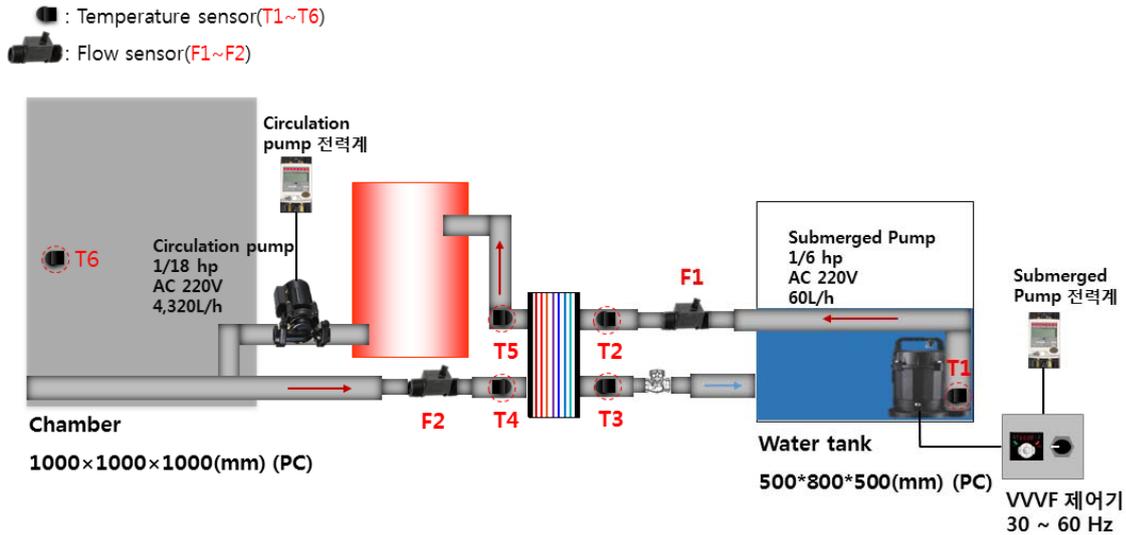


그림 3-57 시뮬레이터 개략도

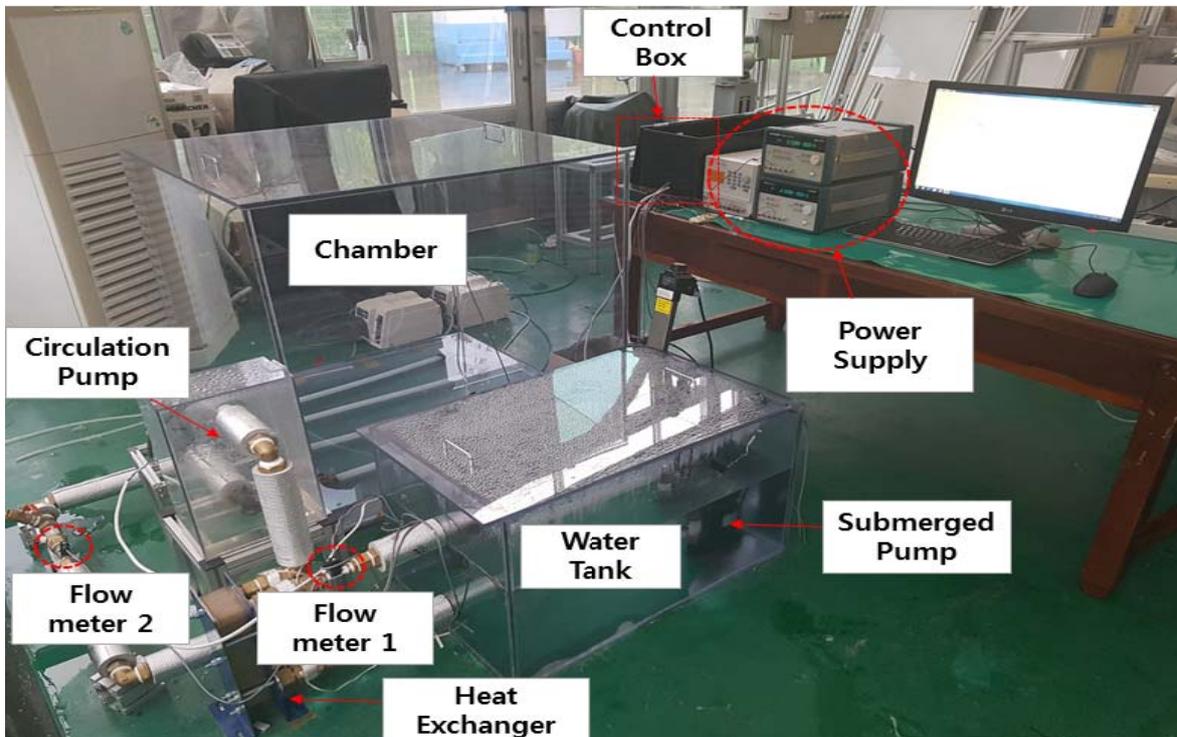


그림 3-58 시뮬레이터 사진

표 3-27 시뮬레이터 스펙

시뮬레이터	사양 설명
수조	20L
챔버	100L
버퍼 탱크	15L
열교환기	50,000kcal
수중펌프	Single-phase, 220V, 1/6hp
순환펌프	Single-phase, 220V, 1/6hp
온도 센서	AO, Thermistor, Range : -40 ~ +100°C
유량 센서	DO, Pulse output, Range : 0.5 ~ 7.5LPM
컨트롤러	AI, AO, DI, DO
인버터	220V, Range : 0 ~ 60Hz
전력계	230V, 60Hz Range : 0 ~ 16A

나. 실험 방법 및 계획

○ 난방 성능 이론 적용

- 지열히트 펌프의 시스템의 난방 성능과 비교 분석하기 위하여 난방 성능 이론 적용함
- 지중 열교환기 열 전달량 및 지열 히트 펌프 시스템 성능계수는 다음과 같이 계산됨

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

(\dot{m} : 질량 유량(L/s), $C_{p,w}$: 물의 비열(kcal/kg), ΔT : 열교환기 입구의 온도차(°C))

$$COP_h = \frac{Q_H}{W_{hp} + W_p}$$

(Q_H : 시스템 난방 능력(kW), W_{hp} : 히트 펌프 소비전력(kW), W_p : 펌프 소비전력(kW))

- 난방 성능 이론을 시뮬레이터에 적용시켜 시스템 난방능력을 계산하면 다음과 같이 계산됨

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

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

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

($W_{s,p}$: 수중펌프 소비 전력(kW), $W_{c,p}$: 순환펌프 소비 전력(kW))

○ 시뮬레이터의 성능 계수 실험 조건

- 심부지열 시스템에서 물의 온도는 1,250~2,250 m일 때 40~60℃까지 취득 온도가 증가함
- 지중 깊이에 따라 시스템의 성능 계수에 미치는 영향을 시뮬레이터로 실험을 수행하기 위하여 수조 내 히터로 수조 내의 온도(T_1)를 40~60℃ 내에서 약 10℃ 간격으로 증가시켜 온도 변화에 따른 시스템 성능 계수 실험을 수행함
- 1차측 수중펌프를 가변속시키면 유량 값과 소비 전력이 변동되므로 1차측 성능 계수와 전체 시스템의 성능 계수가 변하게 됨
- 주파수 변속에 따른 성능 계수의 변동을 파악하기 위하여 정격 60 Hz의 수중펌프를 가변속 제어하여 주파수 30~60 Hz 범위 내에서 10 Hz의 간격으로 수중펌프 주파수 변화에 따른 시스템 성능 계수를 구함
- 2차측 순환펌프를 on-off 제어하면 소비 전력 값이 변화하여 시스템 성능 계수에 영향을 미치게 됨
- 수조 내 수온 조건을 약 43~58℃로, 챔버 내의 온도 조건 23~27℃로 설정하여 실험을 통해 순환펌프의 On-off 제어에 따른 시스템의 성능 계수를 구함

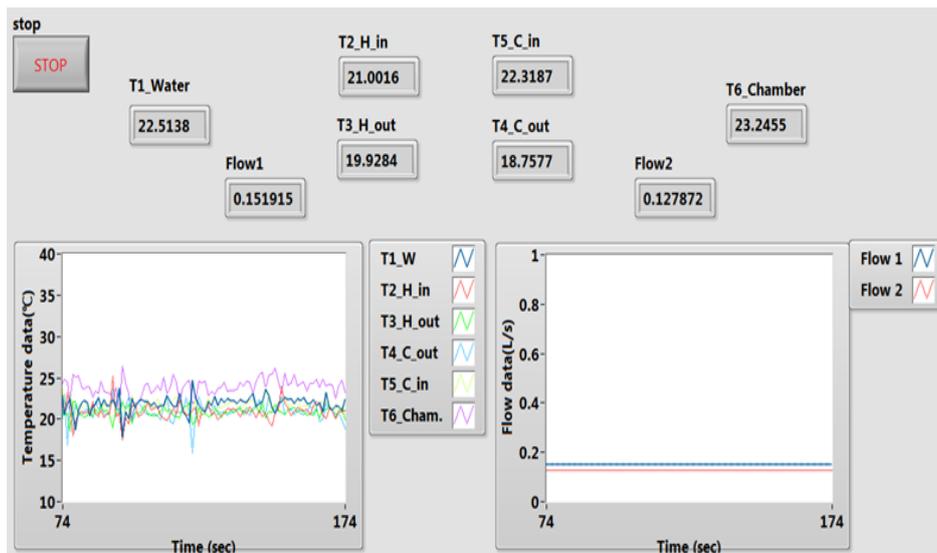


그림 3-59 모니터링 시스템의 프론트 패널

다. 실험 결과 분석 - 제어 기법을 활용한 시뮬레이터의 난방 성능 분석

- 수조 내 물의 온도 변화에 따른 시스템의 성능 계수
 - 수중펌프를 정격 60 Hz로 가동하고 수조 내 설정 온도(T_1) 조건을 42, 51, 55°C로 설정하여 실험을 수행함
 - 수중펌프와 순환펌프를 3시간 가동하여 챔버에 난방 에너지를 공급하였음
 - 각 펌프 소비 전력은 수중펌프 0.18 kW, 순환펌프 0.07 kW를 기록하였고 유량은 1차측 0.154 L/s, 2차측 0.110 L/s를 기록함

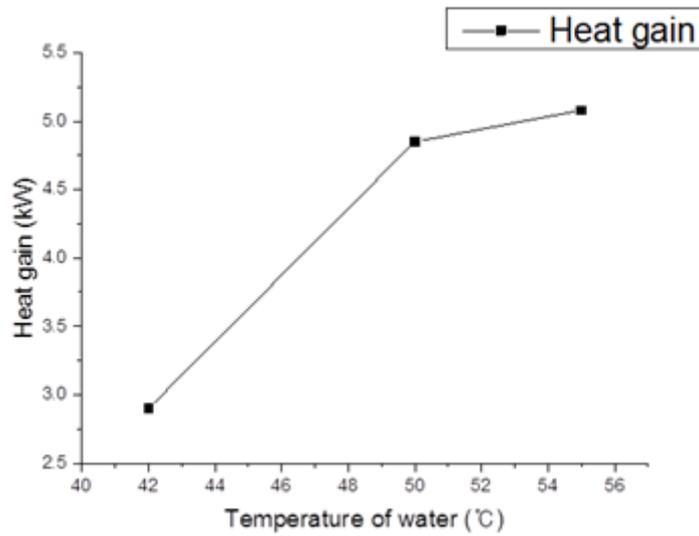


그림 3-60 수조 내의 물의 온도에 따른 취득 열량

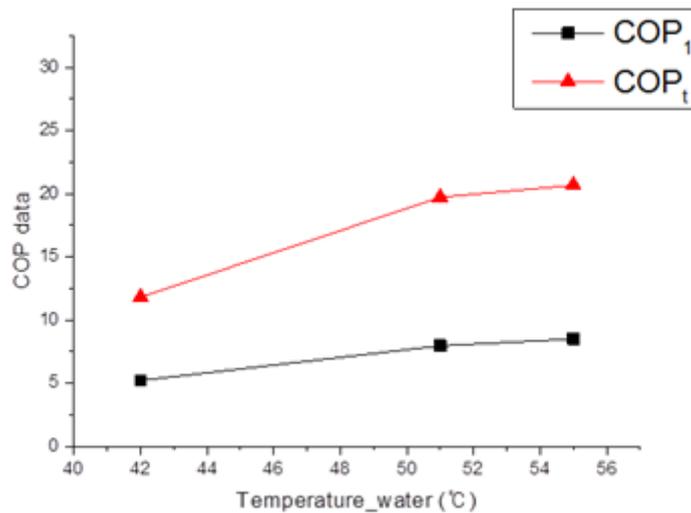


그림 3-61 수조 내의 물의 온도에 따른 COP 데이터

- 수조 내 온도(T1) 값이 상승함에 따라 COP의 값들이 증가하였고 55°C의 경우에 COP_t의 값이 최대 20.67까지 증가하였음
- 전체 시스템 성능의 계수인 COP_t가 1차측 성능 계수인 COP1보다 전체적으로 높은 것을 확인할 수 있었음
- 일반적으로 지열히트 펌프를 사용하는 시스템의 난방 성능 계수는 약 2.5~3.8에 불과함. 그러나 심부지열 시스템의 경우에는 그림 3-61에 나타낸 바와 같이 시스템 성능 계수가 10 이상이기 때문에 히트 펌프를 이용하는 시스템보다 시스템 성능 계수의 값이 훨씬 높게 나타났음
- 수중펌프의 주파수 변화에 따른 시스템의 성능 계수
 - 수조 내 온도를 42°C로 고정하고 정격 주파수 60 Hz의 수중펌프를 변속 운전하였고 주파수는 인버터를 이용하여 30~60 Hz의 범위에서 10 Hz의 간격으로 변화시켜 변속 운전하였으며 순환펌프는 각 실험 조건에서 3시간 가동하여 실험을 수행하였음
 - 수중펌프를 정격 60 Hz로 운전할 경우 평균 유량은 0.154 L/s이며, 소비 전력은 0.18 kW임. 수중펌프를 50 Hz로 운전하였을 경우에는 열교환기에 유입되는 유량이 0.128 L/s로 나타남
 - 수중펌프를 40 Hz로 운전하였을 때 평균 유량은 0.100 L/s로 감소되었고 소비전력은 0.08 kW를 기록하였으며 시스템 COP_t 값은 최대치인 28.95로 증가함
 - 수중펌프를 30 Hz로 운전하였을 경우에는 COP의 값이 감소하였음. 이는 유량이 감소함에 따라 온도 차이가 커져야 되지만 열교환기의 성능으로 인하여 40 Hz 운전보다 온도 차이가 나지 않고 유량 값만 감소하였기 때문에 COP 값이 감소한 것으로 보임

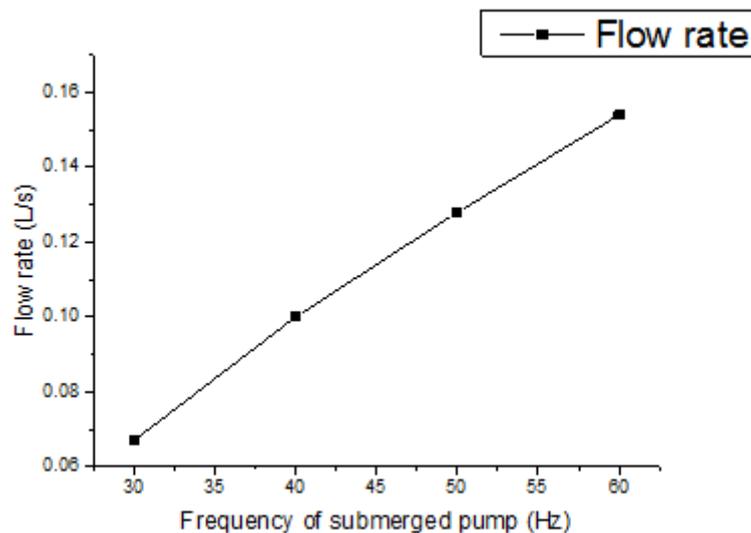


그림 3-62 수중펌프의 주파수 변화에 따른 유량

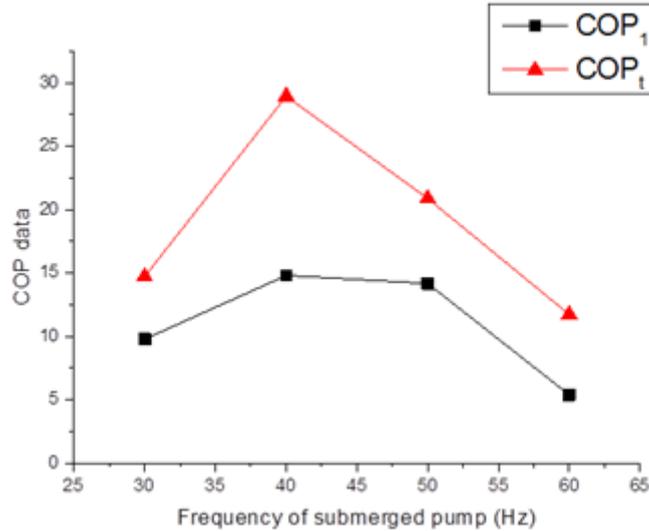
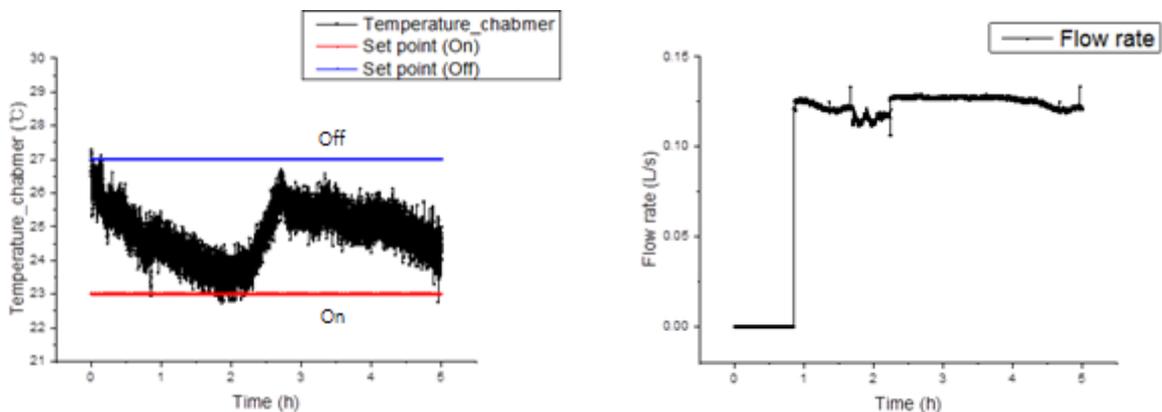


그림 3-63 수중펌프의 주파수 변화에 따른 COP 데이터

- 순환펌프 On-off 제어에 따른 시스템의 성능 계수
 - 수중펌프는 정격 60 Hz로 가동하였고 순환펌프는 Set point 25°C, Dead band 2°C로 설정하여 On-off 제어하였으며 수조 내 설정 온도(T1) 조건을 42, 51, 55°C로 설정하여 실험을 수행하였음
 - 각 데이터는 관내 질량 유량이 일정하게 유지되는 1시간 후부터 취득하였음
 - 수조 내 물의 온도를 42°C로 설정하였을 때 챔버 내 온도(T6)는 27°C 이상 올라가지 않았음
 - 수조 내 온도가 51°C일 때는 순환펌프가 2번 작동되었고 평균 25°C 이상을 유지하였음. 수조 내 온도가 상승함에 따라 순환펌프의 On-off 횟수가 증가하고 소비 전력 값이 감소하였음

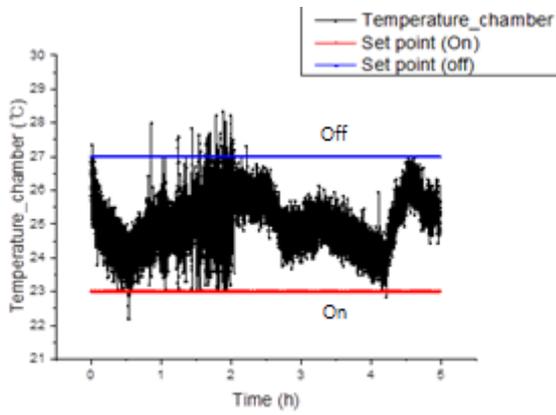


(a) 챔버의 온도

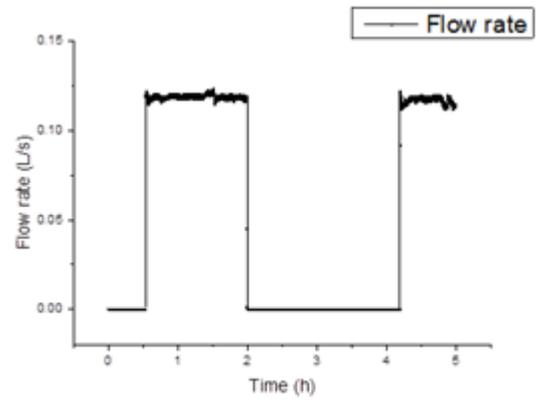
(b) 유량

그림 3-64 T₁=42°C의 조건에서 순환펌프 On-off 제어했을 때의 온도와 유량

- 수조 내 온도가 55°C 일 때는 순환펌프가 3번 작동되었고 작동 시간이 길지 않으므로 소비 전력은 0.006 kW를 기록하였고 COP_t 값은 27.82로 최고치를 기록하였음
- 수조 내 수온이 증가함에 따라 순환펌프의 소비 전력이 감소함을 알 수 있음

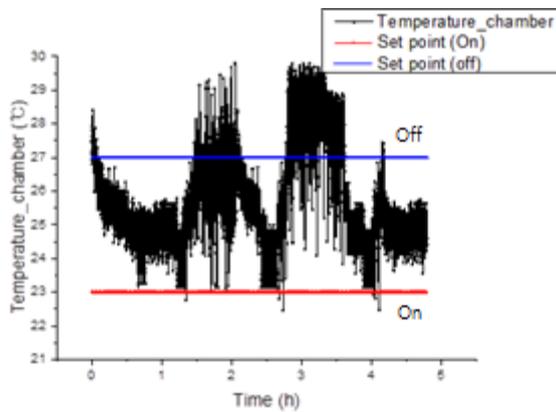


(a) 챔버의 온도

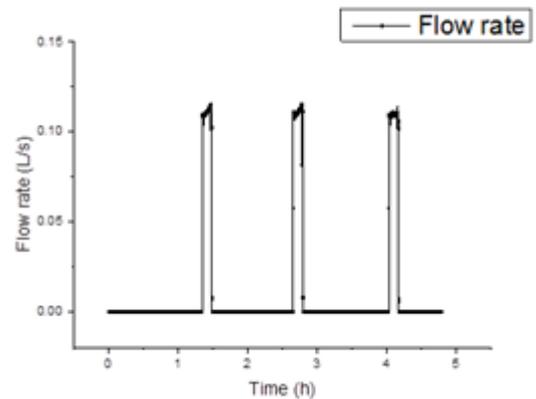


(b) 유량

그림 3-65 $T_1=51^\circ\text{C}$ 의 조건에서 순환펌프 On-off 제어했을 때의 온도와 유량



(a) 챔버의 온도



(b) 유량

그림 3-66 $T_1=55^\circ\text{C}$ 의 조건에서 순환펌프 On-off 제어했을 때의 온도와 유량

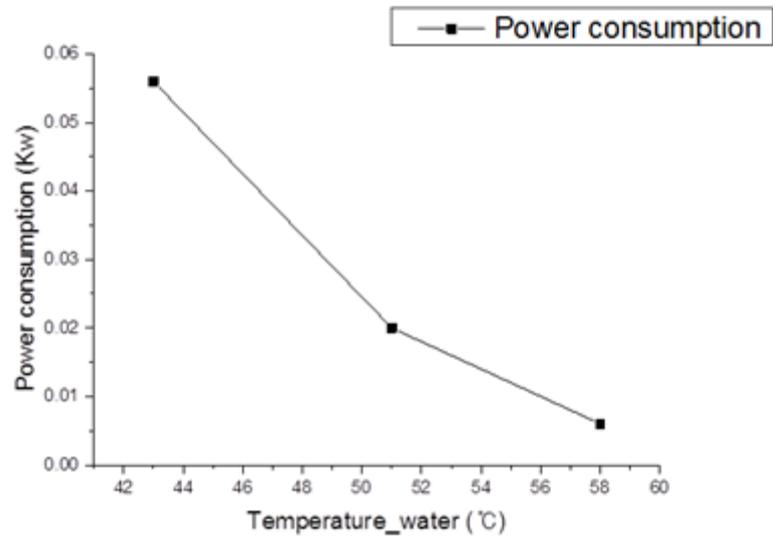


그림 3-67 순환펌프를 On-off 제어했을 때 수조 내 물의 온도에 따른 순환펌프의 소비 전력

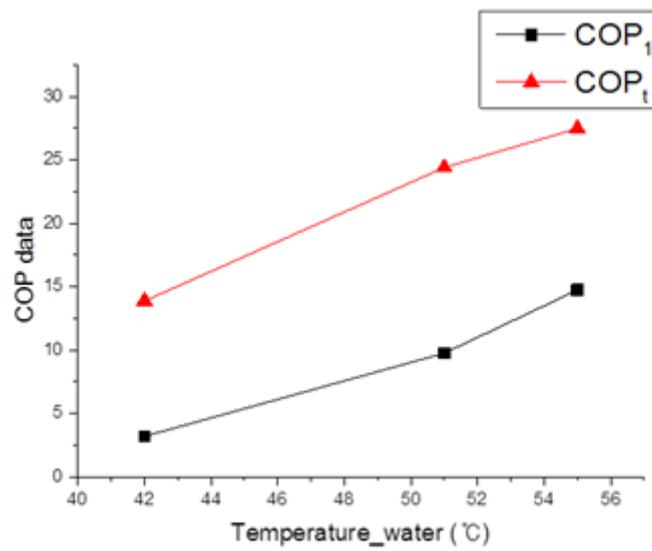


그림 3-68 순환펌프를 On-off 제어했을 때 물의 온도에 따른 COP 데이터

표 3-28 COP_t 값 비교

Operating condition	COP _t values of total system		
Without control	11.8	19.7	20.67
On-off control	13.87	24.41	27.32
Setting temperature T1 (°C)	42°C	51°C	55°C

- 점차 수조 내 온도가 상승함에 따라 순환펌프의 작동 시간이 짧아지고 소비 전력이 감소하여 전체 시스템 성능 계수인 COP_t가 증가하였음
- 수조 내 수온 조건을 42, 51, 55°C로 설정하여 실험을 수행하였을 때 수온이 높아짐에 따라 시스템 성능의 계수의 차가 커졌고 순환펌프를 On-off 제어했을 때 제어를 하지 않은 경우보다 시스템 성능의 계수가 더 높게 나타났음
- 순환펌프를 On-off 제어하고 수조 내 설정 온도가 55°C일 때 전체 시스템 성능계수는 최대치인 27.32로 나타났음

제 4절 심부지열공 시공

1. 장심도 시추장비 운용

- 본 과제의 장심도 시추 장비 운용 시스템은 인양력 45톤 이상급인 45W를 기준으로 Water hammer 시추방식을 적용하였으며, 그에 따른 투입장비의 운용 계획은 다음과 같음

표 3-29 투입장비 운용계획

장비 목록	단위	제원	운용기간
Drilling Rig 45W	1대	Pull up capacity 45 ton	2015.09 ~ 2016.02
power pack	1대	250 HP×2EA	
water pump	4대	1300 L/Min	
water tank	2대	20 feet container type	
rod feeder	1대	API 12 m drill pipe	
sludge conveyor	2대	20 feet container type	
mixing pump	2대	500 CFM	
compressor			
지게차	1대	최대하중 2,500 kg	
로우더	1대	버킷용량 0.3 m ³	

- 장심도 시추와 관련하여 과제의 개발 목표인 시추심도 2.0 km 이상에 대하여 시추심도 2,002 m 굴착, 8.5 inch Water hammer bit를 적용한 시추공 형성을 통하여 심부지열공 시공을 완료함



그림 3-69 적용 장비 및 적용 비트 8.5 Inch

- D&B-45W 장비는 파워팩, 믹싱 펌프, 워터펌프, 슬러지 컨베이어, 물탱크를 포함하는 시스템으로 현장 및 장비 배치는 다음과 같음

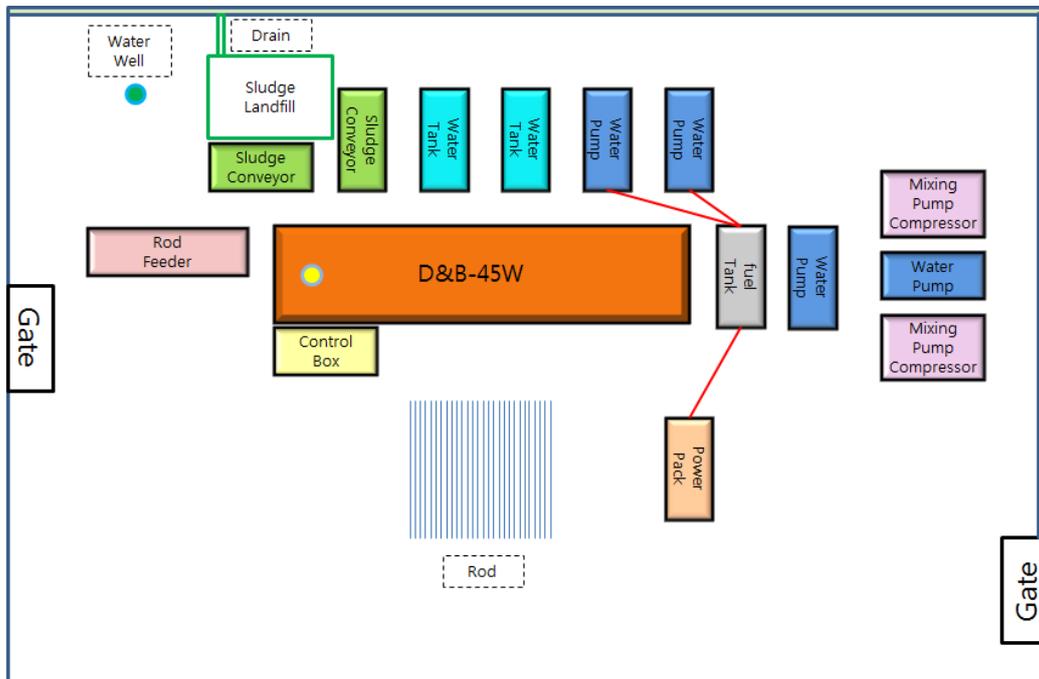


그림 3-70 장비 배치도

2. 장심도 시추 시공 및 결과 분석

- 본 구간의 지층 구성은 크게 풍화토(상부 표층부 포함), 풍화암, 기반암인 화강암 (Granite)으로 구성되며, 시추작업의 안정화를 위하여 풍화토 구간에 대하여 20 inch casing, 풍화암 구간에 9-5/8 inch Casing을 설치하여 지층의 안정성을 도모 하였으며, 지층구성 및 굴착 제원은 다음과 같음

표 3-30 장심도 시추 굴착 제원

심도	지층	굴착 제원
· 0.0~46.0 m	풍화토	20 inch casing bit & casing
· 46.0~47.5 m	풍화암	9-5/8 inch casing bit & casing
· 47.5 0~2,002 m	화강암	8.5 inch water hammer bit, No casing-open hole

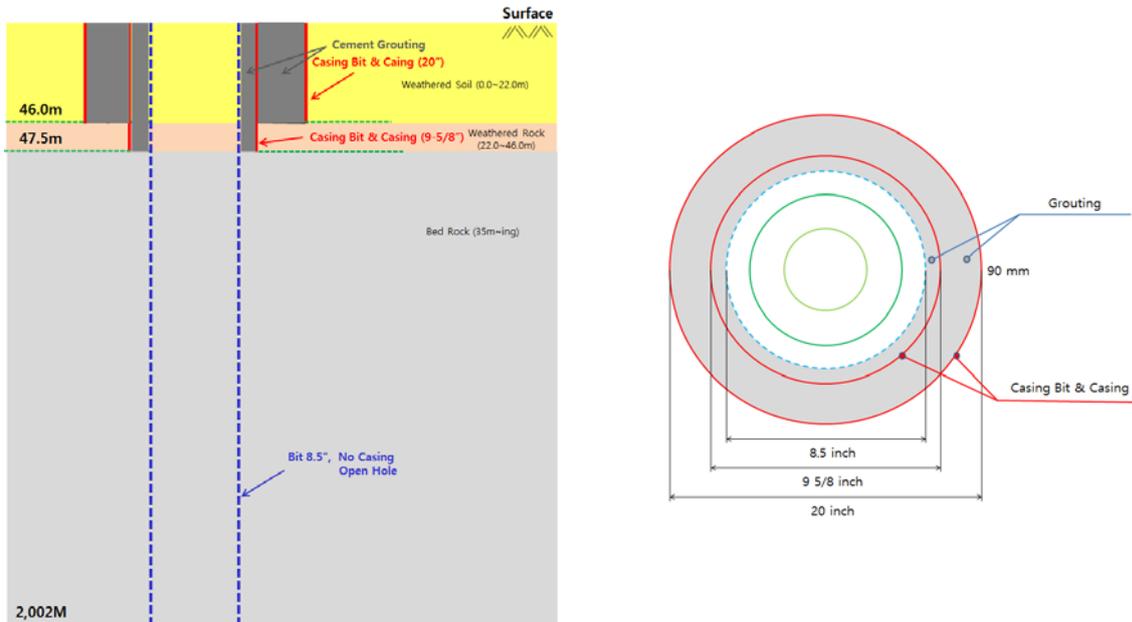


그림 3-71 시추공 모식도

- 본 과업구간의 경우 반경 500 m이내에 주거단지 및 연구기관, 병원, 사찰 등이 분포하며, 소음으로 인한 민원 방지 대책으로 「방음벽」을 설치하여 시추작업에 대한 민원을 최소화하기 위한 대책을 세움
 - 시추기 및 부대장비 주변부로 전체길이 약 40 m 높이 약 10 m 의 「방음벽」 설치함

표 3-31 시추 현장 주변 현황(좌) 및 위치도(우)

No.	주변현황	이격거리 (m)
①	나사렛요양병원	150 m
②	철성사(사찰)	305 m
③	팔마코이스(아파트)	350 m
④	에덴동산 교회	180 m
⑤	남평미래병원	370 m
⑥	노블레스노인요양병원	410 m
⑦	교원리 주거단지	410 m

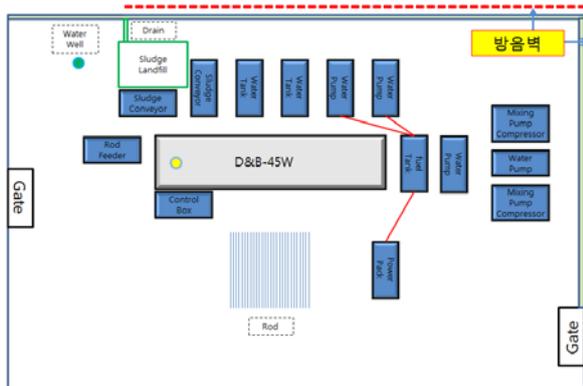


그림 3-72 방음벽 배치도 및 설치

- 전체 시추심도 2,002 m에 대한 시추결과 분석 항목으로 굴진율 대비 시추시간을 분석 하였으며 그 결과는 다음과 같음

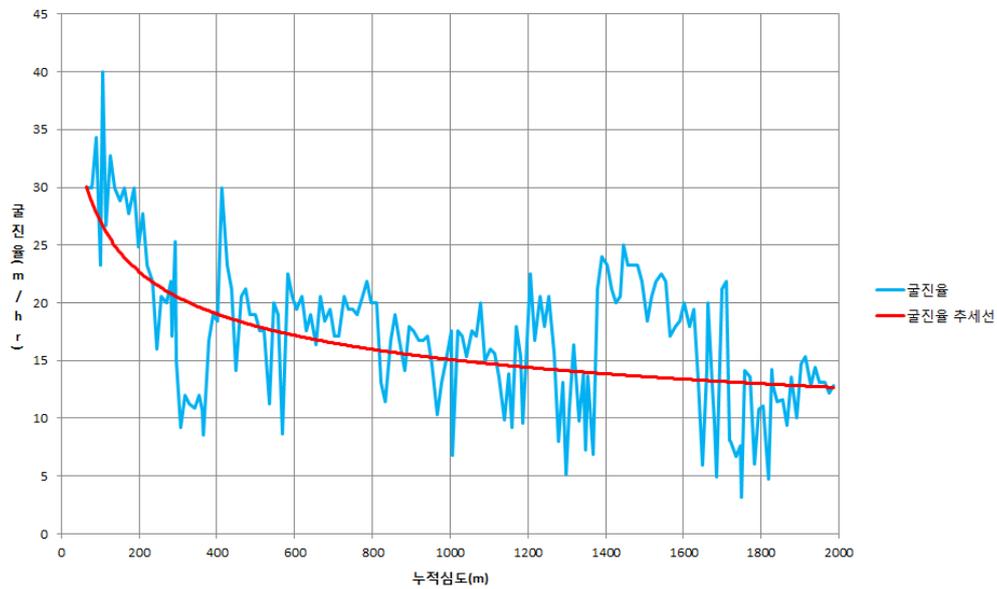


그림 3-73 누적 심도에 따른 굴진율 분석

- 토사층과 연암층 및 경암층 상부를 구성하는 GL. 0.0~120.0 m 구간의 경우 전체심도 2,002 m 대비 32.7 m/hr과 같이 높은 굴진율을 나타냄
- 총 시추 심도 2,002 m 중 66 m 지점부터 1,986 m까지 1,920 m 시추하는데 소요된 총 시간은 128시간 42분이며, 평균 시추 속도는 14.9 m/hr로 측정됨

3. 시추공 물리검층(온도, 전기전도도, 감마선, 공경검층)

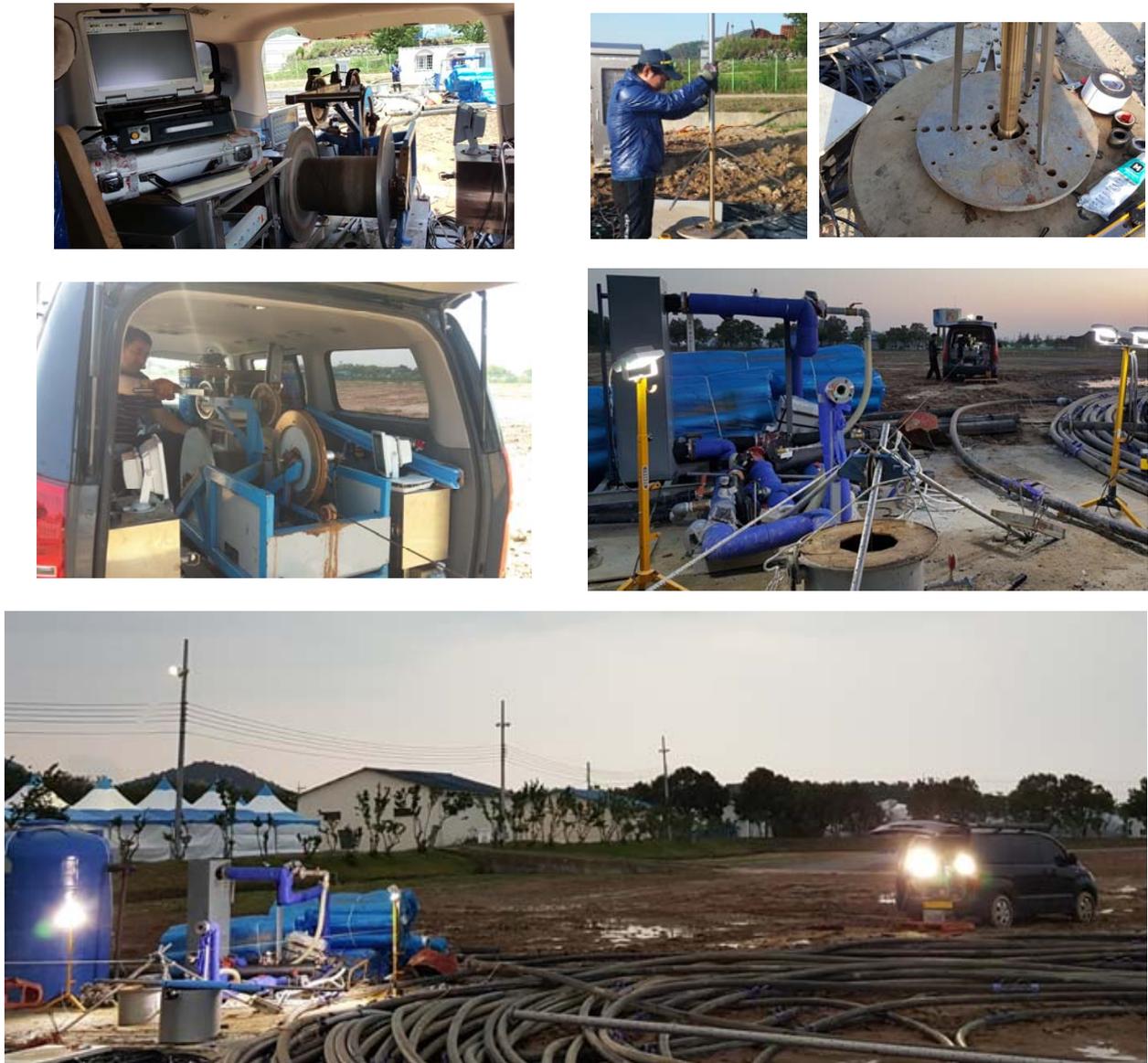


그림 3-74 시추공 물리 검층

- 물리검층은 시추공 주변 지층의 물성이나 이수의 특성을 측정하는 센서를 삽입하여 측정하는 시추공 물리탐사법 중의 하나임
- 물리검층 장비 구성은 다음과 같이 시추공 내에 삽입하여 다양한 지층물성을 측정하는 존데와 존데를 이동시키는 윈치, 전원과 자료통신을 담당하는 윈치케이블, 심도변화를 측정하는 encoder, 그리고 자료측정 전체를 담당하는 측정본체로 구성됨
- 물리검층 자료취득에 이용한 장비는 영국 Robertson Geologging社에 제작한 물리검층 시스템으로 측정본체와 윈치, 존데로 구성됨. 측정본체는 자료측정 컴퓨터와 USB로 연결되는 Micro-logger II이며 winch는 4 conductor로 cable의 길이는 2,000 m, 측정 존데는 3 arm 공경검층, 온도/ 공내수전기전도도/자연감마선을 동시에 측정하는 존데로 검층자료는 1 cm 간격으로 측정함

- 물리검층 자료처리는 측정된 자료를 LAS (Log ASCII Standard) 파일로 변환하여 물리검층 전용 자료처리 프로그램 WellCADTM 4.4 (www.alt.lu)을 이용함. 기본적으로 측정 간격이 1 cm로 윈도우 11의 중간 값 필터링(Median filtering) 적용하였으며 공내수의 전기전도도는 온도 25°C에서의 전기전도도로 환산함. 공경검층은 측정 전, 후에 교정 장치를 이용하여 8, 10, 12인치의 공경에 대해 현장 교정을 수행함

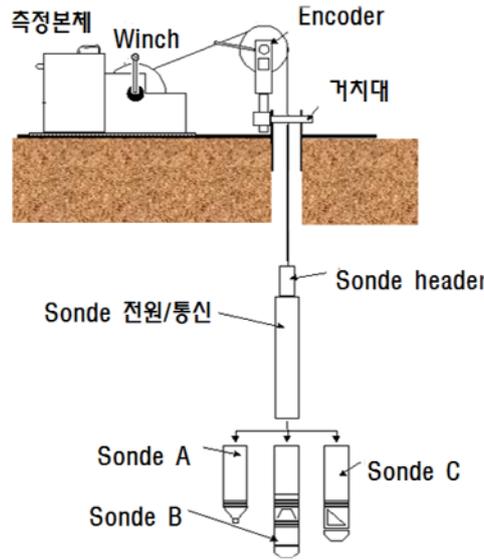


그림 3-75 물리검층 장비 구성 개념도

표 3-32 물리검층 자료 취득에 이용한 장비 내역

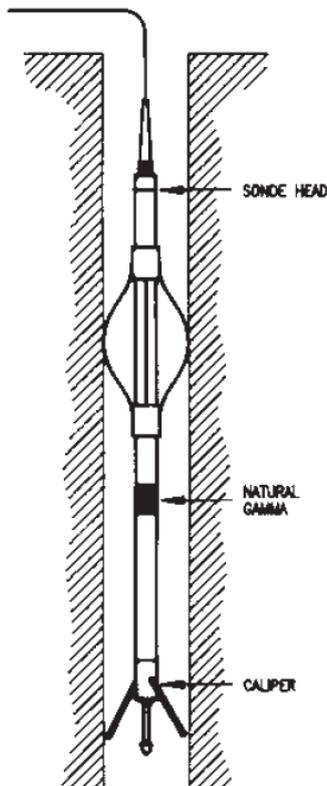
종류	모 델	비고
물리검층 본체	Micro-logger II	- RG-Winlogger S/W - 284 × 240 × 56 mm - 2.8kg, 12VDC 사용
윈치	2,000 m	- 4 conductor 3/16" cable - 1.5 kW 220VAC - 142 kg
존데 (sonde)	High temperature/pressure Sonde	- 압력: 30 MPa 범위까지 - Temperature: 120°C까지 측정 · High resolution semi-conductor transducer · Accuracy: ±5°C - Fluid Conductivity: 50~ 50,00 μS/cm · Accuracy: ±2.5% at 500 μS/cm
	3 arm caliper	- 온도 70°C, 압력 20 MPa까지 - 측정 범위: 65-1000 mm



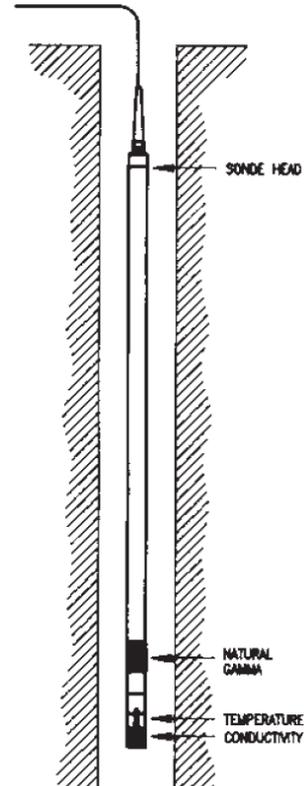
(a) Micro-logger II



(b) 2,000 m 윈치



(c) 3 arm 공경검층 зонде



(d) 온도/전기전도도/감마 зонде

그림 3-76 장비 사진 및 모식도

- 2,002 m 굴진 종료 후, 1,924.75 m까지 자료를 취득하여 시추로 인한 공경변화, 시추 공과 교차하는 암상변화, 공내수 온도와 전기전도도를 확인함
- 물리검층 자료는 그림 3-77의 왼쪽부터 온도검층, 공내수(또는 이수)의 전기전도도검층, 자연감마선검층, 공경검층임

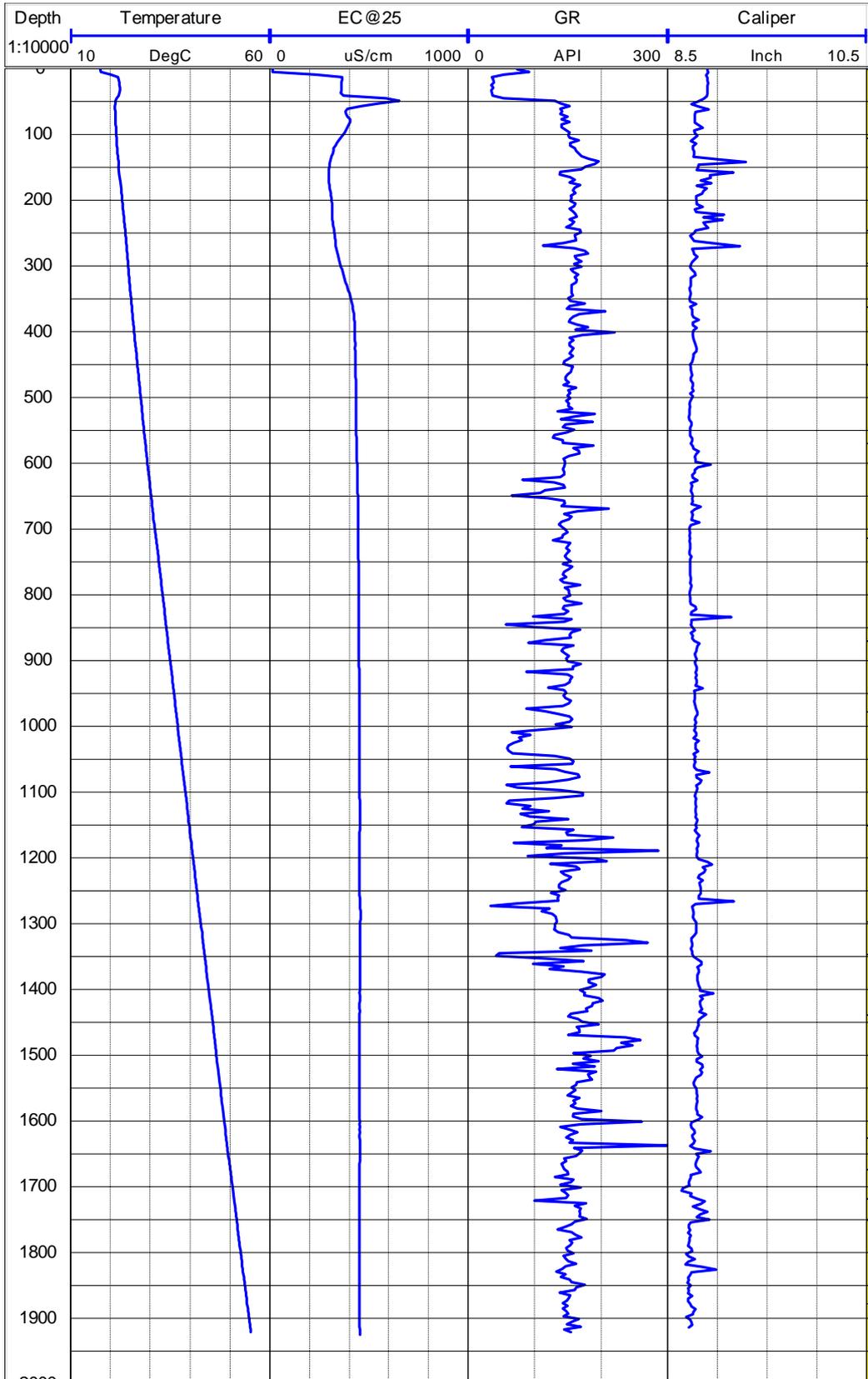
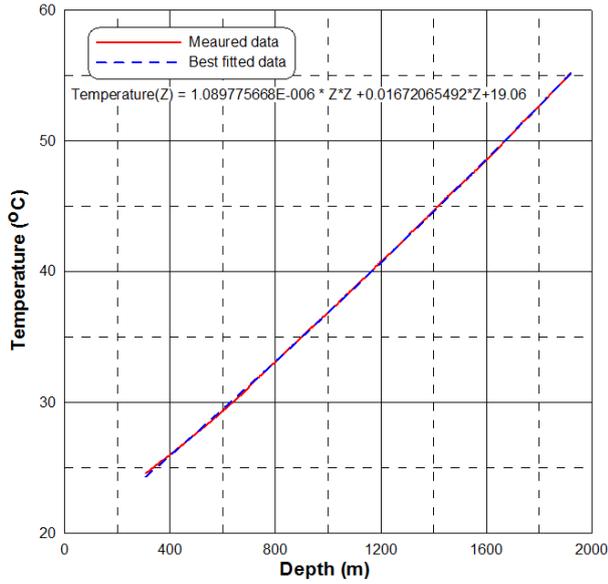
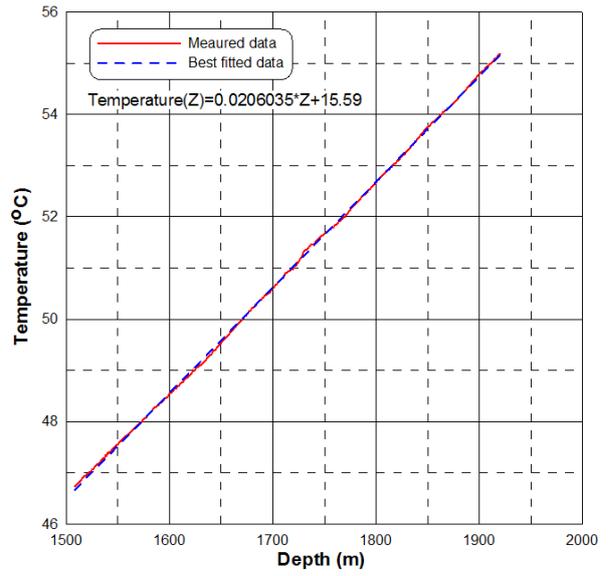


그림 3-77 워터 해머로 굴착한 시추 심도 2,002m 시추공에 대한 물리검층 결과



(a) 2차식으로 근사



(b) 1차식으로 근사

그림 3-78 온도검층 결과

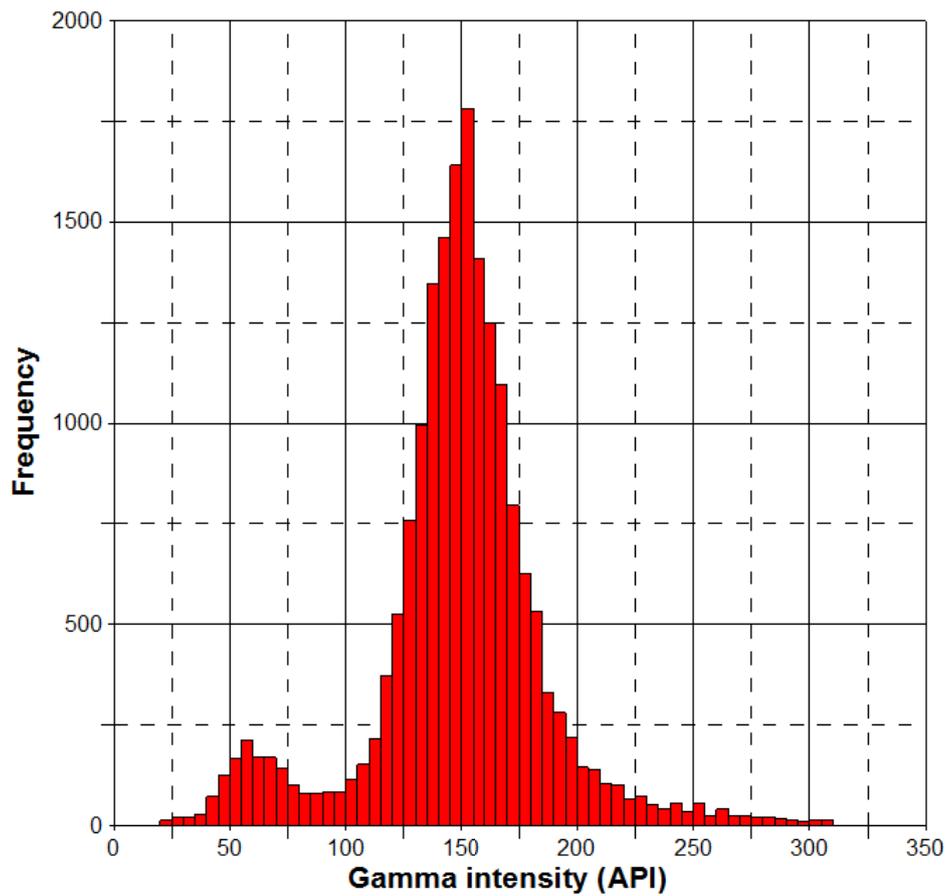


그림 3-79 자연감마선검층 자료의 감마선 세기에 따른 분포도

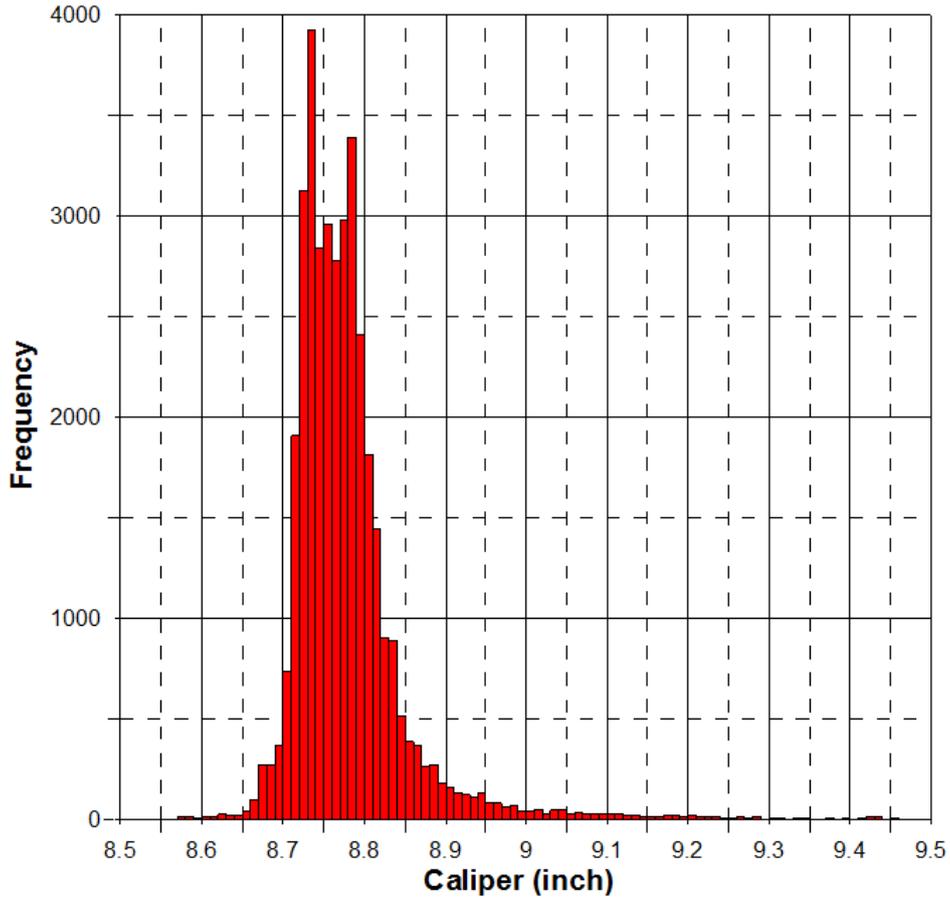


그림 3-80 3-arm 공경검층으로 측정된 시추공 지름의 분포

- 자연감마선검층은 암상을 지시하는 자료로 이용되는데 이 지역의 자연감마선 중앙값은 약 150 API로 전형적인 중생대 화강암의 범위를 보이고 있음. 이들 평균값보다 높은 감마선을 보이는 구간은 산성의 관입암을 낮은 구간은 염기성 관입암을 의미하며 자연감마선이 작은 염기성의 관입암이 1,000~1,350 m 구간에 다수 분포하고 있음
- 지층의 온도는 깊이에 따라서 일반적으로 선형으로 증가하는 경우가 많으며 이와 같은 경우, 지온변화율을 쉽게 결정할 수 있음. 온도검층으로 측정된 전체 자료의 경향은 깊이에 따라 2차식으로 가장 적합성이 좋아 그림 3-78의 (a)는 2차식으로 (b)는 하부 구간만을 2차식으로 근사시킨 결과로 근사식은 다음과 같음

$$T(z) = 1.089775668 \times 10^{-6} \times z^2 + 0.01672065492 \times z + 19.06$$

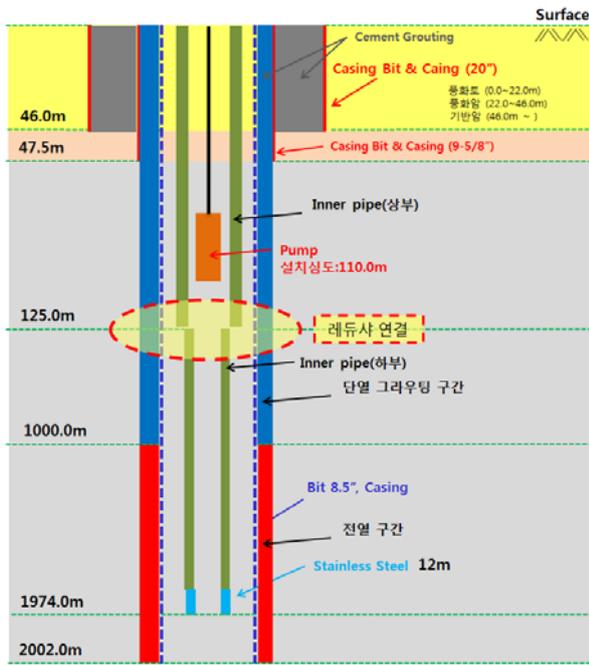
$$T(z) = 0.0206035 \times z + 15.59$$

- 온도검층 자료를 검층 최종 깊이 1924.75 m에서 55.30℃으로 측정하였으며, 2,000 m에서의 온도를 추정하면 각각 56.86℃, 56.80℃로 추정됨

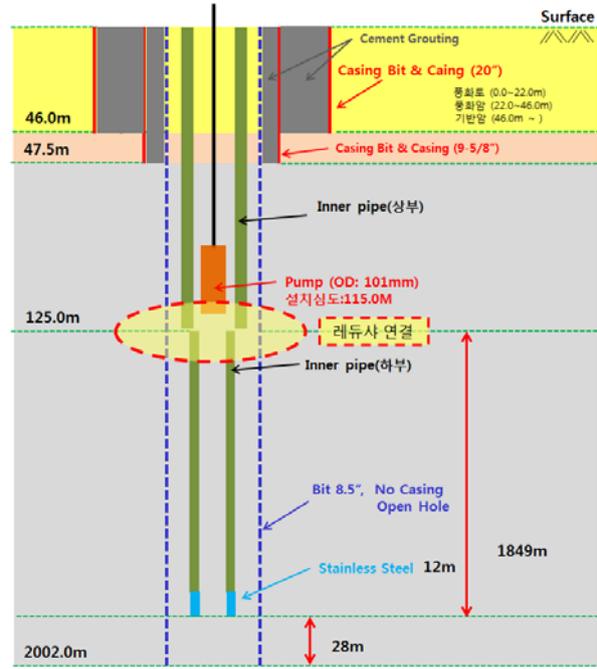
- 전기전도도검층은 이수의 수질을 간접적으로 나타내는 것으로 온도에 따라서 전기전도도 값이 증가하기 때문에 25℃에서의 전기전도도 값으로 환산함. 전기전도도 값은 약 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 일반 지하수보 약간 높은 값을 보임. 시추 종료 후, 양수 등의 수행되었는지 확인을 해야 정확하게 판단할 수 있지만 공내수 전기전도도 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 는 수질적인 측면에서 수질오염의 가능성이 낮은 것으로 판단됨
- 공경검층으로 측정한 시추공 지름의 평균적인 범위는 8.7~8.85인치로 나타나며, 시추에 이용한 비트의 크기가 8.5인치이므로 전체적으로 시추로 인한 지름이 전반적으로 일정하게 발생했음을 알 수 있음

4. 지중열교환기 설계 및 시공

- 장심도 시추에서의 지중열교환기(BHE)라 함은 최종소비자(End user)가 원하는 지중 온도 대역에서부터 시추 목표심도인 최종 심도에 해당하는 「열 교환 구간」을 의미하는 것으로서, 해당영역 내에서 열 교환 유체가 주변 암반의 열을 흡수하여 열 교환을 구성하는 구간을 의미함
- 금회 2차년도 사업을 통한 지중열교환기(BHE)의 시공은 심도 2,002 m를 시공하여 지중열교환기를 통해 가온된 지열수를 생산하기 위하여 폴리에틸렌 소재의 Inner pipe를 시공하고, 그 하부 구간에 지열수가 Inner pipe 내부로 유입될 수 있도록 스테인레스 소재의 유공관을 설치하여 생산설비를 시공함
- 시추공 공저부 유공관 하부 구간에 지열수의 원활한 수취를 위하여 28 m 공간을 두고 시공을 수행함



(a) 지중열교환기 및 생산시설 설계(안)



(b) 지중열교환기 및 생산시설 시공

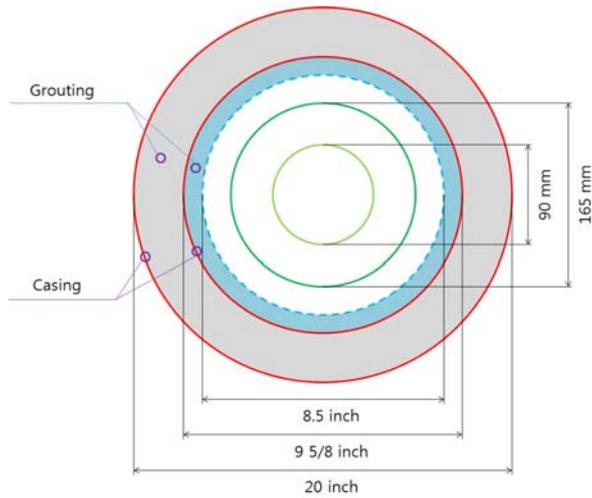


그림 3-81 지중열교환기 및 생산시설 구성도

- 지중열교환기(BHE), 생산시설 구성 및 세부 내용

표 3-33 지중열교환기(BHE) 및 생산시설 시공 제원

항 목		세부 내용 및 특징	
지중열교환기		직경 : 8.5 inch	
생산 시설	Inner Pipe	상 부 (upper)	외경(OD) : 165 mm, 내경(ID) : 134.4 mm, 두께(T) : 15.3 mm
		하 부 (lower)	외경(OD) : 90 mm, 내경(ID) : 60 mm, 두께(T) : 15 mm
	수중펌프		용량 : 7.5 kW
	· 지상설비		온도, 유량, VVVF 등 데이터 취득을 위한 장비 설치 * VVVF (Variable Voltage Variable Frequency, 가변 전압 가변 주파수 제어)

가. 지중열교환기 시공 절차

(1) 시추공 굴착



그림 3-82 시추장비(45W) 및 시추공 모식도

(2) Inner Pipe 삽입

- 폴리에틸렌(polyethylene, PE) 소재 Inner Pipe 선정 이유
 - 폴리에틸렌 소재의 경우 국내 파이프 생산 업체에서 주로 배관용으로 주로 많이 사용되는 관계로 주문 제작이 용이할 뿐만 아니라 시추공 설계 심도로 설정한 2,002 m, 암반 온도 약 60℃에서 내구성이 있으므로 PE 소재의 Inner pipe를 선정함

- Inner Pipe 연결 작업
 - 상부 및 하부를 구성하는 각각의 Inner pipe 연결을 위한 방법으로 맞대기 용착(butt fusion) 방법을 적용함
 - 또한 「맞대기 용착(Butt fusion)」 지점에 「센트럴라이저(Centralizer)」를 설치하여 시추공 내에서의 중심 지지 역할 및 지열수의 원활한 순환을 도모함
 - 직경을 달리하는 상부 Inner pipe와 하부 Inner pipe에 대하여 「레듀서(Reducer)」를 적용하여 직경의 차이에서 나타나는 인장력의 감소를 최소화함

표 3-34 Inner Pipe 시공제원

구간	Inner pipe 제원		
상 부	<ul style="list-style-type: none"> · 외경(ID) : 165 mm, · 내경(OD) : 134.4 mm, · 두께(T) : 15.3 mm 		
하 부	<ul style="list-style-type: none"> · 외경(ID) : 90 mm, · 내경(OD) : 60 mm, · 두께(T) : 15 mm 		

(3) 수중펌프 설치

- 본 과제에 사용된 수중펌프는 토출량 8 m³/hr, 전양정 120 m인 인버터에 의한 변속운전이 가능한 7.5 kW(10 HP)의 Submersible type 수중펌프를 사용함
- Submersible type의 수중펌프 선정 및 특성
 - 장심도 시추 2,002 m 구간에 대한 전양정을 고려하였을 때 상부 Inner pipe의 내경 134.4 mm에 투입이 가능한 펌프 직경(101 mm)과 지열수 순환을 위한 토출량 확보를 위하여 8 m³/hr, 10 HP(7.5 kW)의 Submersible type의 수중펌프를 사용함
 - 장심도 시추의 특성을 고려하여 전양정에 의한 펌프의 과부하를 방지하고 부대 장비인 진공펌프 없이 사용이 가능하기 때문에 Submersible type의 수중펌프를 시공함
 - 시공 시 수중펌프에 전극봉 센서를 부착하여 수위가 펌프 아래로 내려갈 경우 자동 off 되어 모터의 과부하 및 공회전을 방지함

표 3-35 수중펌프 시공제원

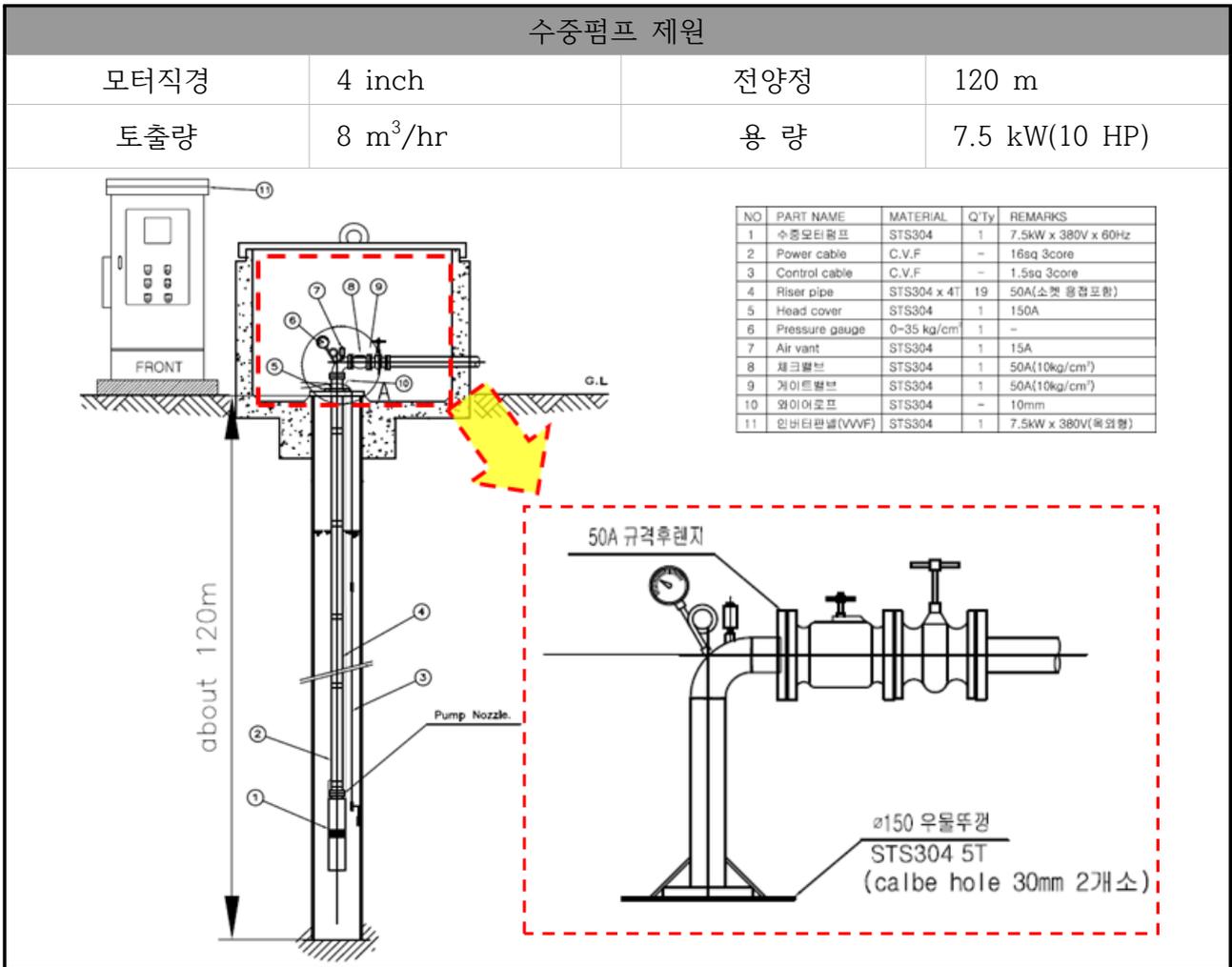


그림 3-83 수중펌프 시공 전경

(4) Well head 및 지상설비

- 웰헤드 및 지상설비는 유량계, 압력계, 에어밸브, VVVF 등으로 구성됨
【 VVVF (Variable Voltage Variable Frequency, 가변 전압 가변 주파수 제어)】
- 생산정의 지열수 온도, 유량 및 유속 데이터 취득을 위한 Data logger를 설치함



그림 3-84 Well head 및 Data logger 설치

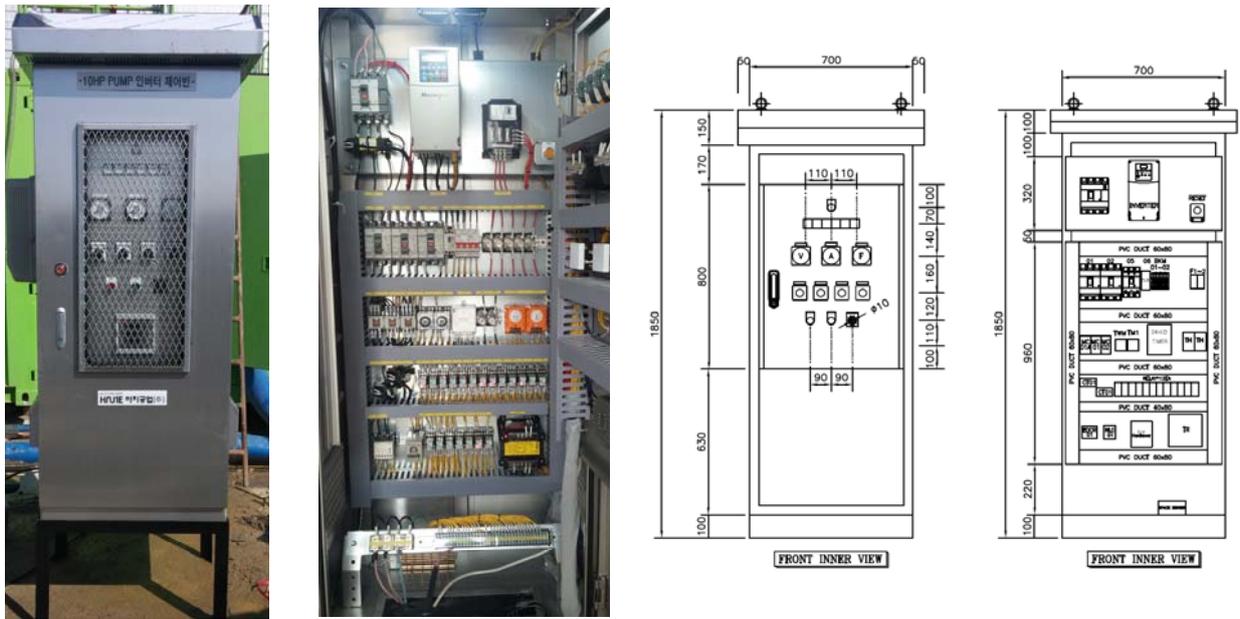


그림 3-85 인버터 제어판 설치



그림 3-86 이물질 제거 장치 설치

- 지열수 순환 시 축적된 이물질을 제거하기 위해 생산정 유출부에 스크린을 설치함
- 스크린에 이물질이 축적되어 지열수 흐름이 저하될 경우 밸브 ①과 ③을 잠근 후 밸브 ②를 열어 노란색 화살표 방향으로 지열수를 유동시켜 스크린에 축적된 이물질을 제거함
- 다음 작업을 통해 이물질이 없는 지열수를 순환시켜 수중펌프 및 지중열교환기 내부 손상을 방지할 수 있음

나. Inner Pipe 적용

- 생산시설 중 Inner pipe는 열전도도 0.37 W/m·k의 폴리에틸렌 소재 Inner pipe(PE 100)를 적용함

(1) PE Inner Pipe의 물성

표 3-36 물성(좌) 및 시험성적서(우)

물 성	단 위	물성값
밀도	g/cm ²	0.953
용융지수	g/10min	0.1
항복인장강도	kg/cm ²	200
신율	%	600
충격강도	kgfcm/cm ²	13
비열	kcal/kg°C	0.55
열전도도	W/m·k	0.37
연화도	°C	121
융점	°C	128
저온취하온도	°C	≤ -40
포아송비	-	0.4
흡수율	%	0.008
내전압	KV/mm	48
선팽창계수	cm/cm°C	11×10 ⁻⁵

시험 성적서					
제품검사성적서					
제 품 명 : 수도용 폴리에틸렌관(SDR11)(PE100)					
종류 및 호칭 : SP1-110mm					
검사항목	판정기준		검사결과	판정	시험방법
겉모양	최대허차 않은 상태로 관찰했을 때 관의 내면과 외면이 매끈하고 깨끗하여야 하며, 관의 장동에 영향을 주는 표면상의 결함이 없어야 한다.		이상 없음	합격	KS M 3408-2
색상	관의 색상은 흑색, 침색 및 청색들이 있는 흑색이어야 한다.		흑색	합격	KS M 3408-2
치수 (mm)	바깥지름	110.0 - 110.7	110.3	합격	KS M ISO 3126
	두께	10.0 - 11.1	10.6	합격	
내압시험	20°C, 100h	PE80 10MPa, PE100 12.4MPa	이상 없음	합격	KS M ISO 1167
	80°C, 165h	PE80 4.5MPa, PE100 5.4MPa			
	80°C, 1,000h	PE80 4.0MPa, PE100 5.0MPa			
파단점신장률	350% 이상		624.7	합격	KS M ISO 6259-1, 6259-3
충격취구성	3% 이하		0.8	합격	KS M ISO 2505-1, 2505-2
용융 흐름 질량률 (190°C, 3kg, 10min)	가공 후 변화량 ±20%		이상 없음	합격	KS M ISO 1133
산화 유도 시간 (200°C)	20분 이상		20분 이상	합격	KS M ISO 11357-6
물 속 성	탁 도	0.5도 이하	0.1	합격	KS M 3408-2
	색 도	1도 이하	0.2	합격	
	과망간산칼륨 소비량	2.0mg/l 이하	0.8	합격	
	전류 용소의 저항	0.7mg/l 이하	0.31	합격	
	냄새 및 맛	이상없음	이상 없음	합격	
표시	KS M 3408-2		이상없음	합격	KS M 3408-2
상기 제품검사 결과는 사실과 다르지 않음을 확인함.					
2015 년 12 월 1 일					
한국 피 이 엠 연구 소 QA					
KOREA PIPE		PEM KOREA CO., LTD.			

(2) 열전도도 특성

표 3-37 열전도도 시험 결과

시험 결과	
시료명	HDPE PE 100 (고밀도 폴리에틸렌 PE 100)
시험 항목	열전도도
시험 방법	ASTM E1461-13
결과값	0.37 W/m·k
시험 일자	2015년 11월 04일
시험 장비	NETZCH社 LFA447 nanoflash



(3) PE 소재 Inner Pipe 운영조건 검토(제조사 제공)

Temperature (°C)	Years of service	SDR	Maximum operating pressure (bar)														
			51	41	33	26	22	21	17.6	17	13.6	11	9	7.4	6	5	
		ISO-5	25	20	16	12.5	10.5	10	8.3	8	6.3	5	4	3.2	2.5	2	
10	5		4.0	5.0	6.3	7.9	9.4	10.1	12.1	12.6	15.7	20.2	25.2	31.5	40.4	50.5	
	10		3.9	4.9	6.2	7.8	9.3	9.9	11.9	12.4	15.5	19.8	24.8	31.0	39.7	49.6	
	25		3.8	4.8	6.0	7.6	9.0	9.6	11.6	12.1	15.1	19.3	24.2	30.2	38.7	48.4	
	50		3.8	4.7	5.9	7.5	8.9	9.5	11.4	11.9	14.8	19.0	23.8	29.7	38.0	47.6	
20	100		3.7	4.6	5.8	7.3	8.7	9.3	11.2	11.6	14.6	18.7	23.3	29.2	37.4	46.7	
	5		3.3	4.2	5.3	6.6	7.9	8.4	10.2	10.6	13.2	16.9	21.2	26.5	33.9	42.4	
	10		3.3	4.1	5.2	6.5	7.8	8.3	10.0	10.4	13.0	16.6	20.8	26.0	33.3	41.6	
	25		3.2	4.0	5.0	6.4	7.6	8.1	9.8	10.1	12.7	16.2	20.3	25.4	32.5	40.7	
30	50		3.2	4.0	5.0	6.3	7.5	8.0	9.6	10.0	12.5	16.0	20.0	25.0	32.0	40.0	
	100		3.1	3.9	4.9	6.1	7.3	7.8	9.4	9.8	12.2	15.7	19.6	24.5	31.4	39.2	
	5		2.8	3.6	4.5	5.6	6.7	7.2	8.6	9.0	11.2	14.4	18.0	22.5	28.8	36.0	
	10		2.8	3.5	4.4	5.5	6.6	7.0	8.5	8.8	11.0	14.1	17.7	22.1	28.3	35.4	
40	25		2.7	3.4	4.3	5.4	6.4	6.9	8.3	8.6	10.8	13.8	17.2	21.6	27.6	34.5	
	50		2.7	3.3	4.2	5.3	6.3	6.7	8.1	8.4	10.6	13.5	16.9	21.2	27.1	33.9	
	5		2.4	3.0	3.8	4.8	5.8	6.1	7.4	7.7	9.6	12.3	15.4	19.3	24.7	30.9	
	10		2.4	3.0	3.8	4.7	5.7	6.0	7.3	7.6	9.5	12.1	15.2	19.0	24.3	30.4	
50	25		2.3	2.9	3.7	4.6	5.5	5.9	7.1	7.4	9.2	11.8	14.8	18.5	23.7	29.7	
	50		2.3	2.9	3.6	4.5	5.4	5.8	7.0	7.2	9.1	11.6	14.5	18.2	23.3	29.1	
	5		2.1	2.6	3.3	4.2	5.0	5.3	6.4	6.7	8.3	10.7	13.4	16.7	21.4	26.8	
	10		2.0	2.6	3.2	4.0	4.8	5.2	6.2	6.5	8.1	10.4	13.0	16.2	20.3	26.0	
60	15		1.9	2.3	2.9	3.7	4.4	4.7	5.7	5.9	7.4	9.5	11.8	14.8	19.0	23.7	
	5		1.5	1.9	2.4	3.0	3.6	3.8	4.6	4.8	6.0	7.7	9.7	12.1	15.5	19.4	
70	2		1.2	1.5	1.9	2.4	2.9	3.1	3.7	3.9	4.9	6.2	7.8	9.8	12.5	15.7	

그림 3-87 Inner Pipe 운영조건

- 공저부 및 지상으로 산출되는 지열수의 범위를 40~60℃로 산정하여 PE 소재 Inner pipe에 대한 운영연한(사용 연한을 검토한 결과는 다음과 같음)
 - 지열수의 온도 40℃ 기준 시 11.6~12.3 bar 범위 내에서 5~50년의 운영기간을 보임
 - 지열수의 온도 50℃ 기준 시 9.5~10.7 bar 범위 내에서 5~15년의 운영기간을 보임
 - 지열수의 온도 60℃ 기준 시 7.7 bar 범위 내에서 5년의 운영기간을 보임

제 5절 지상부 설비 시공

1. 유리온실 난방 부하

- 난방 설비용량을 구하기 위해서는 난방기간 중 가장 추울 때 난방에 필요한 열량을 산출하여야 함
- 난방을 하는 온실에서 열 손실은 주로 ①피복자재를 통과하는 관류열량, ②틈새를 통해서 손실되는 환기전열량, ③토양의 열교환에 의한 지표전열량으로 구분되며, 주로 피복자재를 통한 열손실이 60% 이상을 차지함

가. 유리온실 시험구(256 m²)의 최대 난방부하 산정

- 난방부하 공식은 다음과 같음

$$Q = A_w \cdot U(T_i - T_o)(1 - f_r) [kcal/h]$$

(A_w : 하우스의 표면적(m²), U : 난방부하 계수, T_i : 하우스내의 설정온도(°C),

T_o : 외부기온(°C), f_r : 보온피복방법에 따른 열절감률)

표 3-38 피복재료의 종류에 따른 난방부하 계수(U)

구 분	난방부하계수 (kcal/m ² /hr/°C)	비 고
유리온실	5.3	
비닐하우스	5.7	

표 3-39 보온 피복 방법에 따른 열절감률

보온방법	피복재료	열 절감률	
		유리온실	플라스틱 하우스
2중 피복	염화비닐필름	0.40	0.45
	폴리에틸렌필름	0.35	0.40
1층 커튼	폴리에틸렌필름	0.30	0.35
	염화비닐필름	0.35	0.40
	부직포	0.25	0.30
	알루미늄분말혼입필름	0.40	0.45
	알루미늄증착필름	0.50	0.55
2중 커튼	폴리에틸렌필름 2중	0.45	0.45
	폴리에틸렌필름+알루미늄필름	0.65	0.65
외면피복	짚거직(섬피)	0.60	0.65

- 외부기온 T_o 는 온실난방부하에 있어 영향이 크고 직접적인 것으로 지역과 기간에 따라 다르기 때문에 일반적으로 난방설비의 용량 산정에는 그 지역에서 10년간 1회 나타날 확률의 최저기온을 많이 적용함
- 유리온실의 경우, 보다 높은 안전도를 적용하여 20년에 1회 나타날 확률의 최저 극기온 값을 적용함
- 월예난방에 적용된 온실의 규모는 256 m²의 면적으로 난방부하 계산은 전라남도 나주지역에 인접한 광주지역의 기상 조건을 감안하였으며, 온실 내 희망온도는 정원장미(2년생 아접묘)를 기준으로 17℃, 유리온실은 천장 1중 커튼, 측면 1중 커튼을 적용하여 온실 난방부하를 계산함
- 대표외기온도는 광주지역의 1986년부터 2015년 총 30년간 최저기온 중 가장 낮은 기온인 1990, 2001년도의 -12.5℃를 적용함

표 3-40 광주지역 연도별 온도 분포

연도	평균기온(℃)	평균기온최저(℃)	최저기온(℃)	최고기온(℃)
1986	12.7	-8.3	-11.5	34.6
1987	13.4	-6.3	- 8.4	32.6
1988	13.4	-5.3	- 8.9	35.5
1989	13.9	-3.9	- 8.6	34.5
1990	14.5	-8.2	-12.5	36.0
1991	13.7	-7.3	-11.7	35.8
1992	13.7	-1.3	- 6.2	33.8
1993	13.1	-4.1	- 8.3	32.2
1994	14.6	-4.5	-10.2	38.5
1995	13.4	-3.9	- 8.4	35.9
1996	13.2	-5.7	- 9.8	35.6
1997	14.1	-5.0	-11.4	35.7
1998	15.0	-6.7	- 9.3	33.9
1999	14.3	-4.9	- 8.8	34.3
2000	13.5	-4.6	- 8.8	34.3
2001	13.8	-9.0	-12.5	35.0
2002	13.9	-4.3	- 7.5	35.3
2003	13.6	-7.7	-10.3	31.9
2004	14.3	-8.5	-11.7	35.2
2005	13.6	-6.0	-11.1	35.8
2006	14.2	-5.8	-11.0	35.0
2007	14.6	-2.1	- 4.9	34.3
2008	14.6	-4.2	- 8.9	35.1
2009	14.6	-5.2	-10.0	34.5
2010	14.2	-6.0	- 9.5	35.5
2011	13.7	-7.7	-11.7	35.3
2012	13.7	-7.9	-10.2	37.7
2013	14.2	-6.8	-10.3	36.2
2014	14.3	-4.5	- 7.3	36.5
2015	14.6	-4.0	- 8.7	36.2

표 3-41 유리온실 제원

항 목	단 위	비 고
온실 종류		유리온실(벤로형)
온실 폭	m	16
온실 길이	m	16
용마루 높이	m	6.5
처마 높이	m	5.5
온실 둘레 길이	m	64
온실 보온피복		1층커튼 (알루미늄 증착필름)
재배 작물		정원장미(그랜드마치)
온실 희망온도	℃	17

- 유리온실 면적 256 m²의 최대난방부하 값은 51,143 kcal/hr로 산정되었으며, 이를 바탕으로 열교환기 용량 및 난방 공급을 위한 배관 설계를 수행함

표 3-42 유리온실 최대난방부하

피 복	면 적	표면적	대표외기기온	최대난방부하
유리온실	256 m ²	654 m ²	- 12.5℃	51,143 kcal/hr(60 kWth)

2. 지상배관 및 열교환기부 설비 시공

- 심부지열공에서 유리온실 까지 거리는 약 175 m로 지상배관의 동결 방지 및 지상의 충격으로 인한 관의 파손을 방지하기 위하여 두께 40 mm 보온재를 이중으로 시공 총 80 mm 두께로 단열하여 지면으로부터 1.2 m에 매설함
- 지상배관의 직경은 공급관 및 환수관 모두 50 mm의 수도관용 PE파이프를 이용하여 시공함

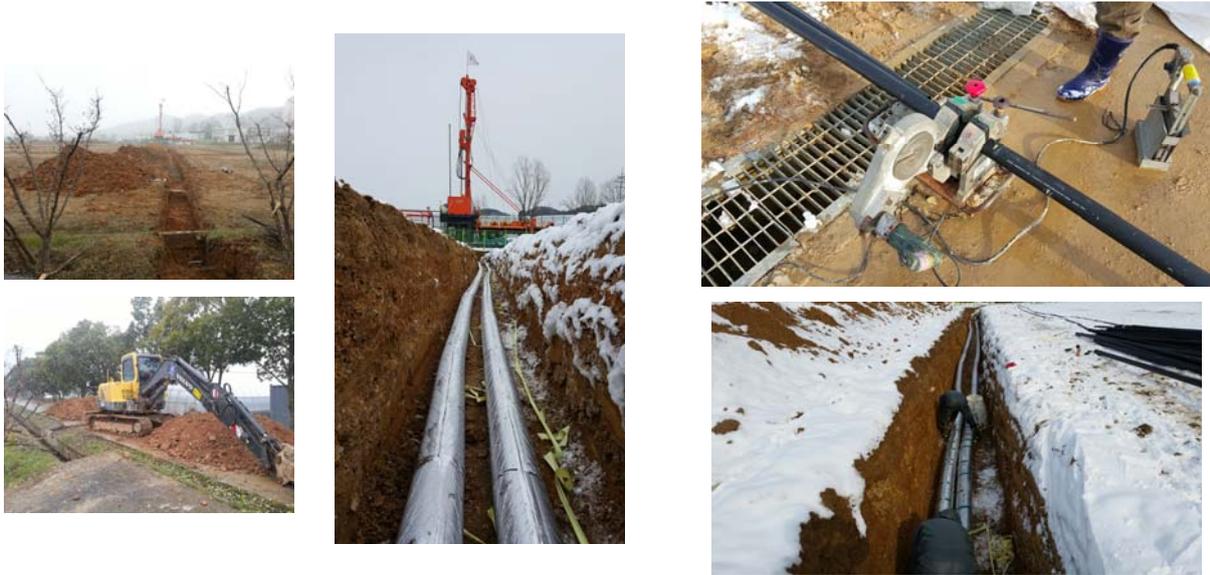


그림 3-88 지상배관 설치

○ 보온재 종류 및 제원

- 가교 발포 폴리에틸렌 보온재 2종 내열 난연 은박(카이론)

표 3-43 보온재 제원

항 목	단 위	결 과 치	시험방법
인장강도	N/cm ²	46.7	KS M 3862 : 2001
열전도도(평균온도:20℃ ± 5℃)	W/(m·k)	0.034	KS M 3862 : 2001(평판열류계법)
흡수량	g/100cm ²	0.006	KS M 3862 : 2001
두께수축율[(120±5)℃,168 h]	%	3.3	KS M 3862 : 2001

○ 보온재 설치 방법

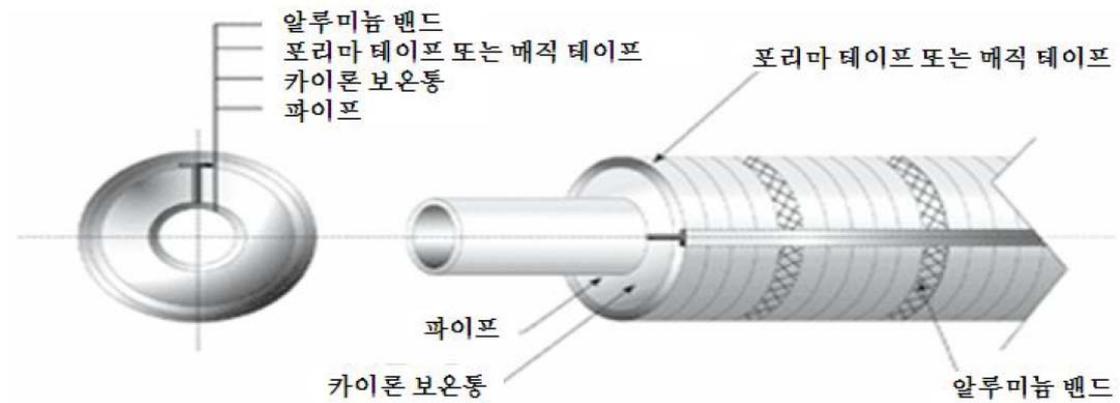


그림 3-89 보온재 설치 방법

- 배관에 40 mm 카이론 보온통의 갈라진 부위를 벌려 끼움
 - 은박 엠보처리 표면에 매직테이프 또는 포리마 테이프를 감아 시공을 한 후 길이 50 cm 마다 알루미늄 밴드로 견고히 밴딩 마감함
 - 배관부속 부위에는 현장 특성에 맞게 절단하여 카이론 보온재를 씌우고 매직테이프 또는 포리마 테이프를 견고하게 감아줌
 - 배관에 40 mm 카이론 보온통의 갈라진 부위를 벌려 끼운 후 동일한 방식으로 보온재를 설치함
- 열교환기 설치
- 심부열교환기를 거쳐 생산된 순환수를 유리온실에 공급하기 위하여 Fixed cover, Movable cover, Support column, Carrying bar, Guide bar, 그리고 다수의 Tie Bolt로 구성된 판형열교환기를 설치함

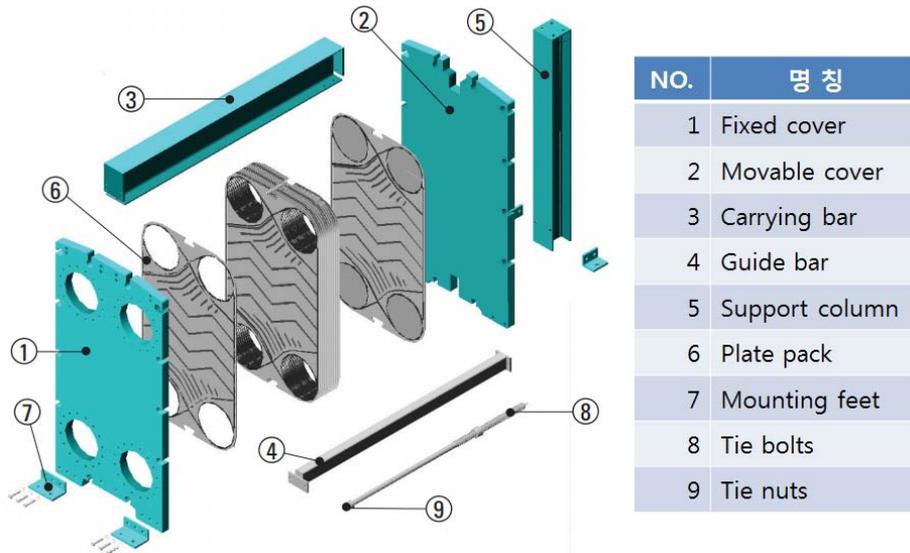


그림 3-90 판형열교환기 조립도

○ 열교환기 설계도

- 열교환기는 75,000 kcal/hr 용량으로 폭 346 mm, 높이 1,515 mm, 폭 346 mm로 설계함

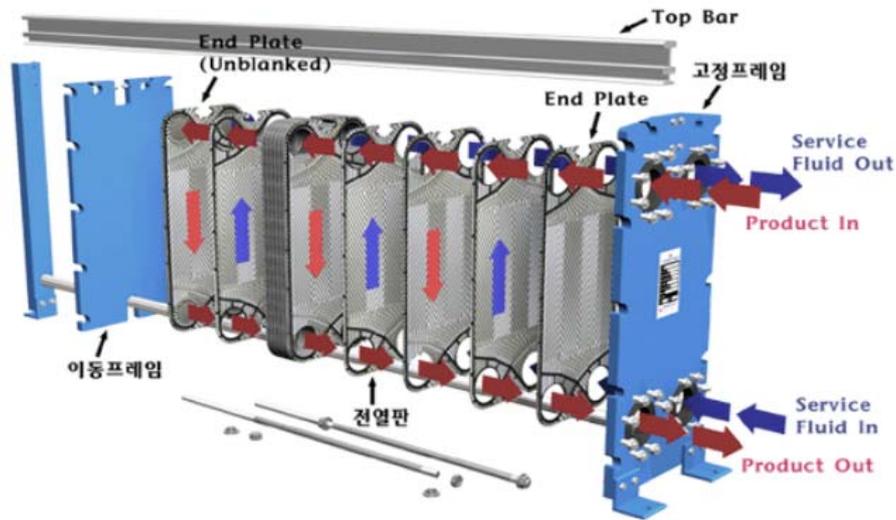
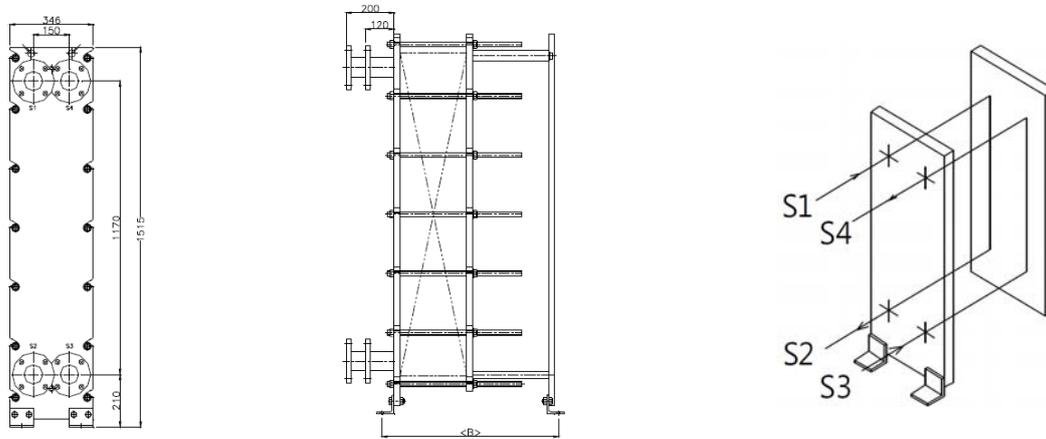


그림 3-91 열교환기 설계도

표 3-44 열교환기 제원

location	Service	Size	Type	Rating	Wet Part Material
S1	Water Inlet	65A	Flange, soff	KS 10K	SUS304
S2	Water Outlet	65A	Flange, soff	KS 10K	SUS304
S3	Water Inlet	65A	Flange, soff	KS 10K	SUS304
S4	Water Outlet	65A	Flange, soff	KS 10K	SUS304
Width	346 mm	Height	1515 mm	Length(B)	282 kg
Net Weight	251 kg	Flooded Weight	282 kg	-	-

3. 온실 설비 시공

- 유리온실 난방 공급을 위해 15~50 mm의 배관용 탄소강관, 알루미늄 방열관 및 방열기를 이용하여 온실배관을 수행함
- 주관에서 먼저 공급된 온수가 나중에 회수되는 방식을 이용하여 유리온실배관을 시공함
- 주관의 직경은 50 mm x 5 m, 40 mm x 5m, 32 mm x 5 m로 제작하여 유리온실에 공급되는 온수가 고르게 분포할 수 있도록 시공함

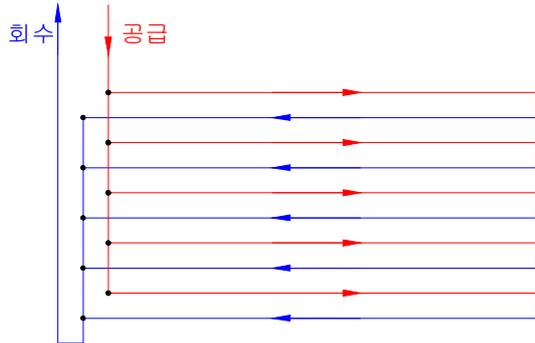


그림 3-92 열수 순환방식



그림 3-93 유리온실 배관

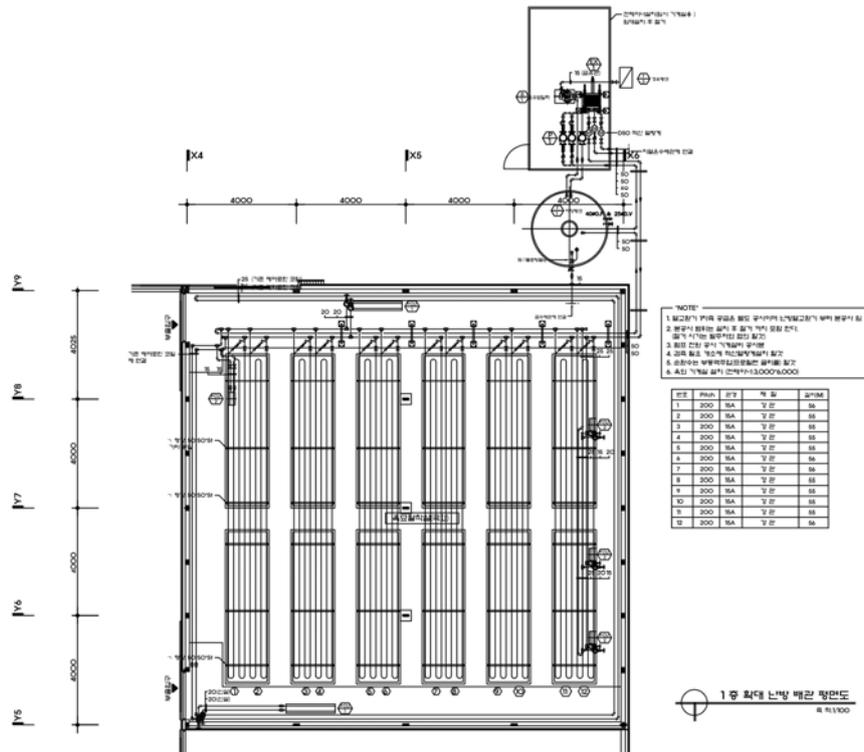


그림 3-94 유리온실 및 기계실 배치도

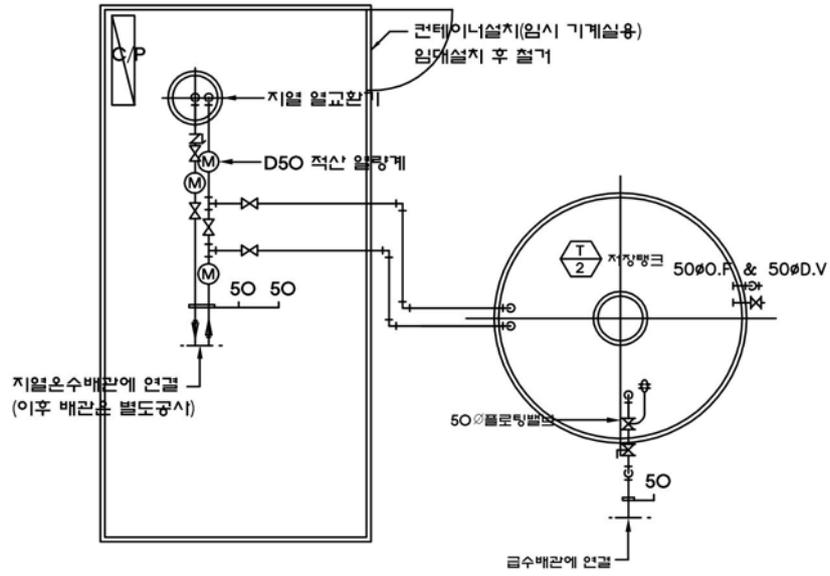


그림 3-95 기계실 평면도

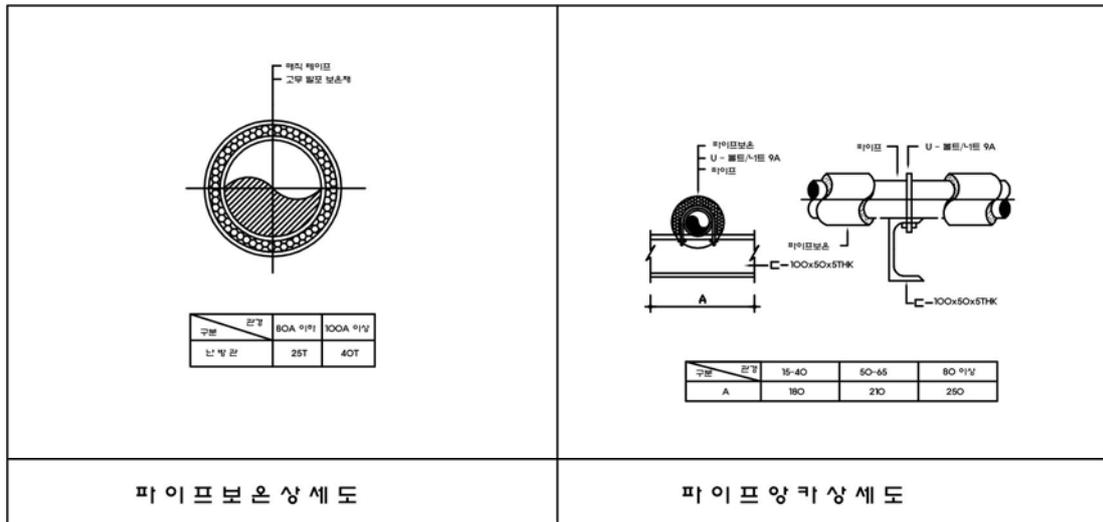


그림 3-96 기계실 배관 상세도

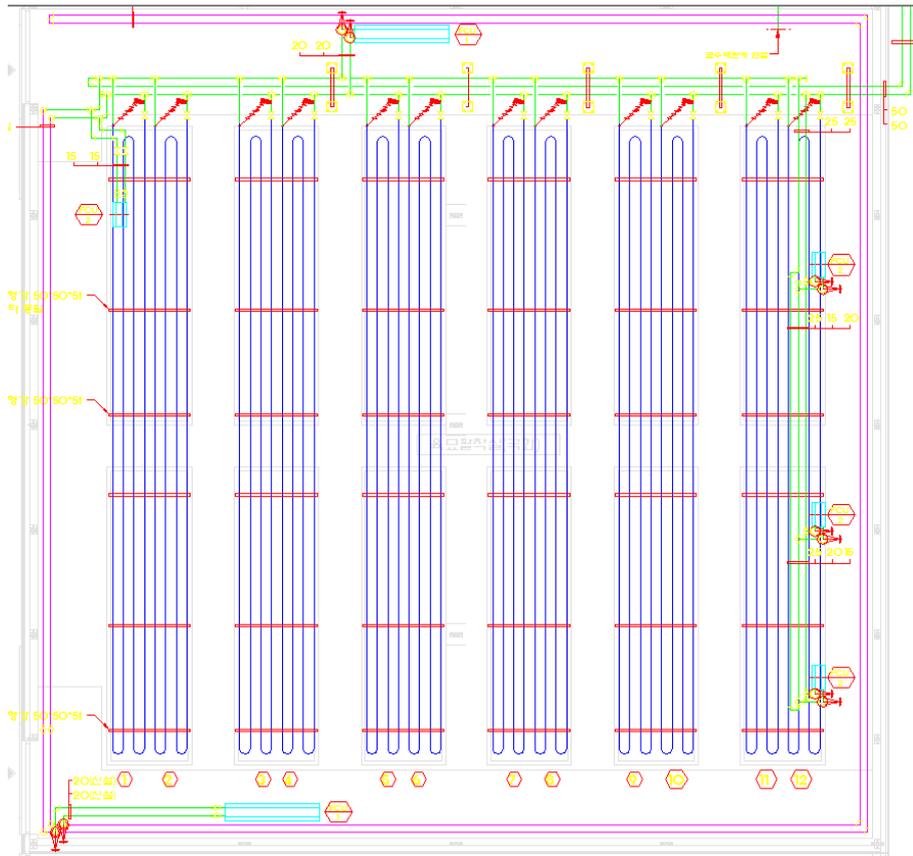


그림 3-97 유리온실 난방 배관 설계도

4. 자동제어 및 모니터링 시스템 구축과 시스템 통합

- 심부지열을 이용한 원예시설 난방활용 기술을 위해 심부지열을 이용한 유리온실과 경유 난방을 이용한 유리온실에 각각 6set(18개) 총 36개의 온도 센서를 설치하였으며, 외부에 2개의 온도 센서를 설치함
- 온도 센서는 천정부 커튼에서 0.5 m 지점, 베드에서 상부 1 m 지점(생장점), 베드와 난방배관 사이 중간 지점에 각각 1개씩 총 3개 1set로 구성됨
- 정확한 온도 데이터 측정을 위해 시험구와 대조구의 온도 센서 위치는 바깥 베드를 중심으로 등간격으로 설치됨
- 온도측정을 위해 RTD(Resistance Temperature Detector)을 사용함. RTD는 금속이 온도에 따라 전기저항이 변하는 성질을 이용하여 온도를 측정하며, 가격이 비싸고 전류원이 필요하다는 단점이 있지만 가장 정확성이 높고 선형적이며 안정적인 장점이 있음
- RTD 센서는 백금, 동, 니켈 등이 있으며, 백금선이 온도변화에 예민하게 전기저항이 증감하고 사용온도범위도 $-200^{\circ}\text{C} \sim 500^{\circ}\text{C}$ 이기 때문에 백금측온저항체를 사용함
- 설치된 온도 센서 및 유량 센서 데이터를 저장하기 위해 Data logger를 설치하였으며, 실시간으로 온도 및 유량을 확인할 수 있도록 PLC 판넬을 설치함

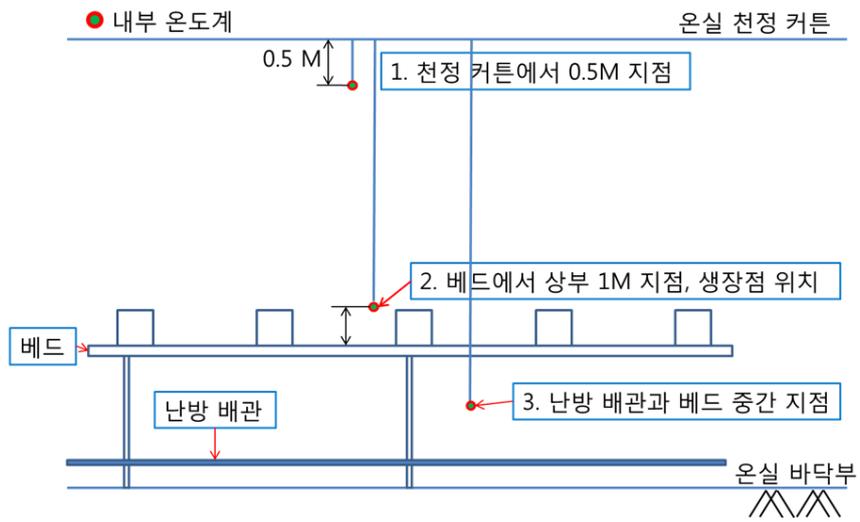
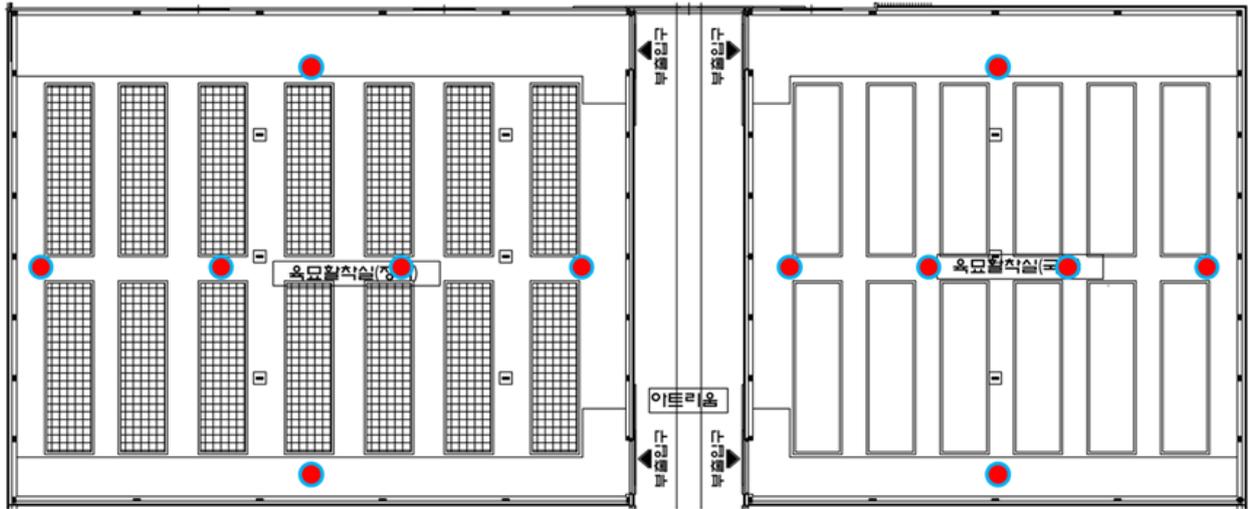


그림 3-98 유리온실 시험구 및 대조구 온도 센서 위치



그림 3-99 온도계 설치

그림 3-100 Data logger 설치

- 시스템의 구성은 메인, 열교환기 주변의 온도 및 유량, 유리온실 온도, 순환펌프 작동 제어, 시추공 누적 Data, 시추공 실시간 Data 및 비상 시 유리온실 내부에 지속적인 열 공급을 위한 비상시스템으로 구성함

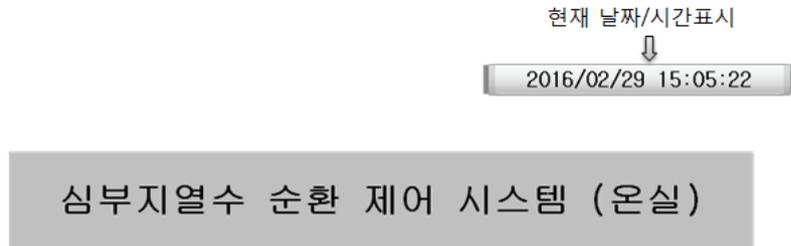


그림 3-101 PLC 화면 구성도

- 온도/유량 화면은 열교환기 주변의 온도 및 유량을 보여주는 것으로 각 부분의 내용은 다음과 같음

- ① CH-4 : 유리온실 환수관(유리온실→열교환기)의 온도 및 유량
- ② CH-5 : 지열수 환수관(열교환기→시추공)의 온도 및 유량
- ③ CH-6 : 유리온실 공급관(열교환기→유리온실)의 온도
- ④ CH-7 : 지열수 공급관(시추공→열교환기)의 온도

2016/02/29 15:24:59

온실측 데이터

	온도센서	유량계/누적	유량계/시간
① CH-4 유리온실 환수관(리턴수) 유리온실→열교환기	34.7	1076	9.4
② CH-5 지열수 환수관(리턴수) 열교환기→시추공	36.2	1467.5	12.5
③ CH-6 유리온실 공급관(주입수) 열교환기→유리온실	38.1		
④ CH-7 지열수 공급관(주입수) 시추공→열교환기	39		

MAIN
온도/유량
온실
순환펌프
시추공/누적
시추공/시간
비상가동

그림 3-102 온도/유량 표시 내용

- 온실 화면은 유리온실 대조구와 시험구 온도와 외기 온도를 보여주는 화면으로 시험구와 대조구에는 각 지점에 상·중·하로 3개 1set씩 각각 6개 지점 총 36개의 온도 센서가 존재하며, 외기 온도의 경우 시험구 좌측과 정면에 각각 1개씩 위치하고 있음
- 또한, 화면에 수증펌프 운전 상태를 표시함으로써 175 m 떨어진 시추공의 수증펌프 운전 상태를 간편하게 확인할 수 있도록 구성함

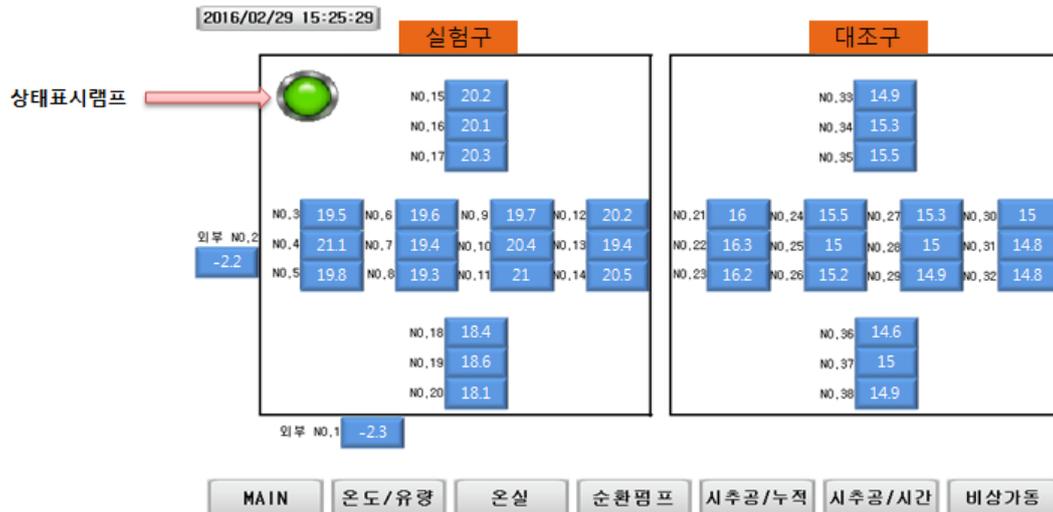


그림 3-103 시험구 및 대조구 온도 분포

- 순환펌프는 열교환기를 거쳐 가온된 액체를 유리온실 내부에 원활히 순환하도록 하는 역할을 하며, 구동방법에 따라 자동모드와 수동모드로 구성함
 - ① 온도에 따른 순환펌프 제어가능 창 (자동 Mode일 때 동작)
 - ② 순환펌프 ON 구동 조건 버튼 (자동 Mode일 때 동작)
 - ③ 순환펌프 OFF 구동 조건 버튼 (자동 Mode일 때 동작)
 - ④ 정지버튼(자동/수동 조건과 상관없이 강제적으로 순환펌프 정지가능)
 - ⑤ 수동/자동 변환버튼
 - ⑥ 순환펌프 동작램프(동작 시 녹색등)



그림 3-104 순환펌프 화면 구성

- 수동모드는 순환펌프의 작동 유무를 설정된 구동 조건의 온도가 아닌 작업자의 조작에 의해 작동유무를 결정함
- 수동/자동 변환은 ⑤ 버튼을 누름으로써 조작이 가능함
- 수동모드 시 ④ 정지버튼을 누르면 설정된 구동 조건 온도와 상관없이 순환펌프를 운영 하고 정지할 수 있음



(a) 순환펌프 운전 중

(b) 순환펌프 정지 중

그림 3-105 수동모드 순환펌프 운전 및 정지 상태

- 순환펌프 자동모드는 On/off 구동 조건에 따라 자동적으로 순환펌프가 작동되고, 정지 할 수 있도록 설정하여 24시간 순환이 아닌 유리온실의 온도에 따라 순환펌프를 작동함으로써 유리온실 온도를 일정하게 유지할 수 있으며, 운영비 절감을 실현할 수 있음

○ 순환펌프 자동모드 설정 및 작동

- ① 순환펌프 상태표시에 있는 자동/수동 버튼 클릭하여 모드 변환(자동 시 버튼 파란색)
- ② 순환펌프 ON 구동 조건 버튼 클릭 후 ON 구동 조건 온도 설정
(유리온실 센서 NO.7 온도가 ON 구동 조건 이하로 내려갈 시 순환펌프 작동)
- ③ 순환펌프 OFF 구동 조건 버튼 클릭 후 OFF 구동 조건 온도 설정
(유리온실 센서 NO.7 온도가 OFF 구동 조건 이상으로 올라갈 시 순환펌프 작동)



(a) 자동모드 변환

(b) 구동 온도 설정

(c) 정지 온도 설정



(d) 온도 설정 완료

(e) 순환펌프 작동

(f) 순환펌프 정지

그림 3-106 자동모드 설정 및 작동

- 시추공/누적은 유리온실에서 175 m 떨어진 시추공의 운영 상태를 보여주는 것으로 생산정 및 주입정의 온도와 유량을 보여주며, 그에 따른 생산정, 주입정, 지중열교환기의 유속 및 열량을 계산하여 화면에 실시간으로 나타남
- 화면의 구성은 다음과 같음
 - ① CH-1 : 생산정 온도 센서, 유량계(시간)
 - ② CH-2 : 주입정 온도 센서, 유량계(시간)
 - ③ CH-3 : 주입정 온도 센서, 유량계(시간)
 - ④ 온도차 : $T_1 - T_2 = \Delta T$
 - ⑤ 평균 유량 : $Q_1 + Q_2 / 2 = Q_a$

- ⑥ 토출 유속 : $Q_1 \times 0.14154 = V_1$
- ⑦ 열교환 유속 : $Q_1 / 108.84 = V_2$
- ⑧ 회수 유속 : $Q_1 \times 0.09829 = V_3$
- ⑨ 취수구 열량 : $\Delta T \times Q_1$
- ⑩ 취수구 평균 열량 : $\Delta T \times Q_a$

2016/02/29 15:27:13

심부지열수 순환 제어 시스템 (시추공/시간)

	온도센서	유량계		유속	열량
① CH-1 생산점	38.7	12.5	토출 ⑥	1.78340	52920 ⑨
② CH-2 주입점	34.5	12.6	열교환 ⑦	0.11577	52920 ⑩
③ CH-3 주입점	34.5	12.6	회수 ⑧	1.23845	
온도차/평균유량	4.2	12.6			

④ MAIN 온도/유량 온실 순환펌프 시추공/누적 시추공/시간 비상가동

그림 3-107 시추공/누적 화면

- 비상가동은 심부지열공 내부에 위치한 수증펌프의 고장으로 인해 유리온실에 난방을 공급할 수 없을 때 유리온실 난방을 위해 비상용 보일러 가동을 위한 시스템을 의미함
 - ① 온도에 따른 비상가동 제어가능 창 (자동 Mode일 때 동작)
 - ② 비상가동 ON 구동 조건 버튼 (자동 Mode일 때 동작)
 - ③ 비상가동 OFF 구동 조건 버튼 (자동 Mode일 때 동작)
 - ④ 정지버튼(자동/수동 조건과 상관없이 강제적으로 비상가동 정지가능)
 - ⑤ 수동/자동 변환버튼
 - ⑥ 비상가동 동작램프(동작 시 적색등)



그림 3-108 비상가동 화면

- 비상가동 시스템의 수동모드는 수동/자동 버튼이 노란색으로 표시되며, 수동 조작은 수동이 ON일 때 비상가동되며, 정지 버튼을 누르면 해제됨



(a) 순환펌프 운전 중

(b) 순환펌프 정지 중

그림 3-109 수동모드 비상가동 운전 및 정지 상태

- 비상가동 시스템의 자동모드는 순환펌프 자동모드 운영과 동일한 방법으로 구성되며, ON 구동 조건 온도 15℃, OFF 구동 조건 온도 23℃로 시스템을 설정함



(a) 자동모드 변환

(b) ON 구동 온도 설정

(c) OFF 구동 온도 설정



(d) 구동 온도 설정 완료

(e) 비상가동 작동

(f) 비상가동 정지

그림 3-110 비상가동 설정 및 작동

- 제어시스템의 전체 구성은 다음 그림 3-111과 같으며, 데이터 로거를 통해 전체 Data를 저장함

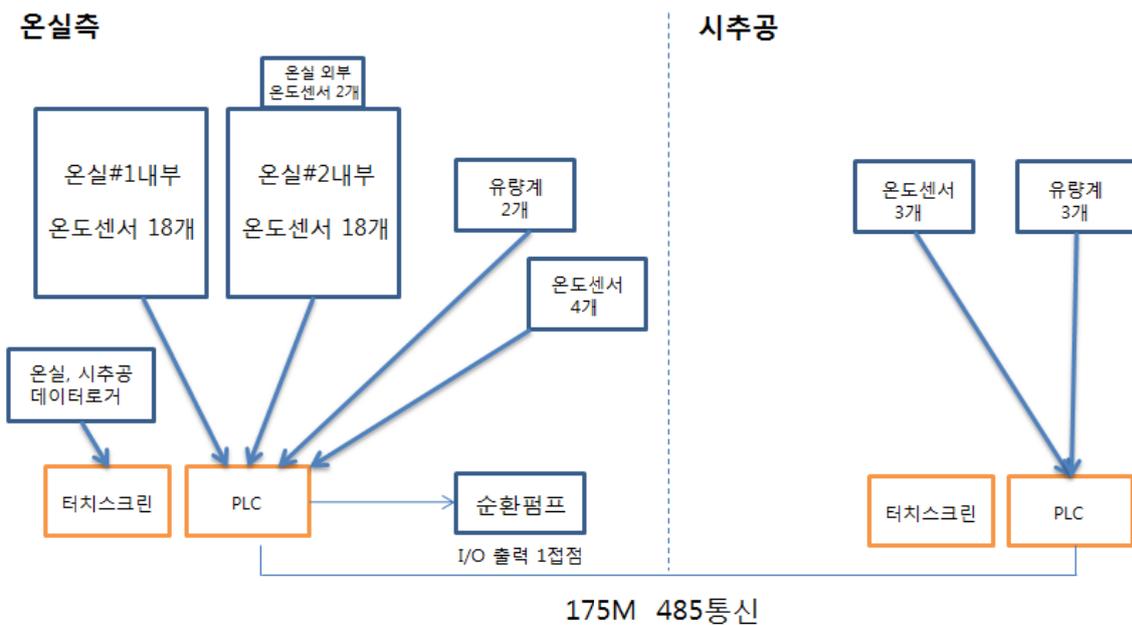
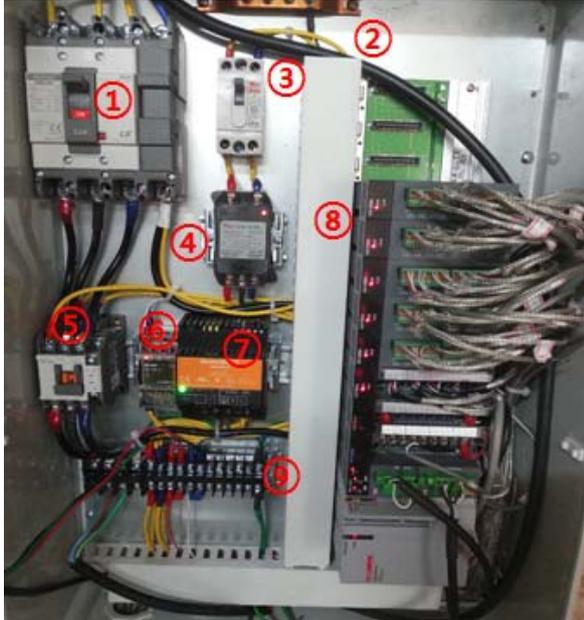


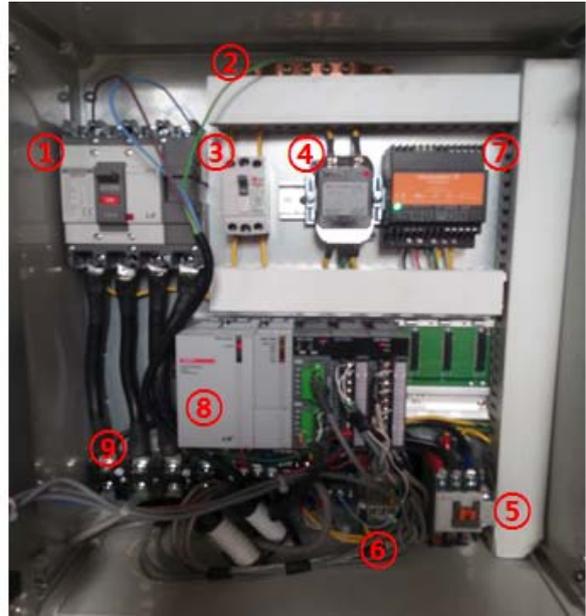
그림 3-111 제어시스템 구성도

○ 분전반 구성도

- ① 배선차단기 ABS33c/20A
- ② 접지바
- ③ 배선용차단기 BS32c-15A
- ④ 노이즈필터 WYF-S10TD
- ⑤ MC
- ⑥ RELAY R4T-16P-S
- ⑦ SNT 48W 24V2A
- ⑧ PLC-XGK모듈
- ⑨ 단자대



(a) 유리온실측 분전반



(b) 시추공측 분전반

그림 3-112 분전반 구성도

○ 데이터 로거 저장

- 데이터 로거는 PLC 뒷면 USB에 저장될 수 있도록 설계하였으며, 총 9개의 폴더에 저장됨



(a) PLC 데이터 저장

이름

- 1 CH-1~3온도, 온도차, CH-1~3유량(시간) 평균유량(시간)
- 2 CH-4~7온도, CH-4~5유량(누적)
- 3 NO.3~NO.10 (내부온도)
- 4 NO.11~NO.18 (내부온도)
- 5 NO.19~NO.26 (내부온도)
- 6 NO.27~NO.34 (내부온도)
- 7 NO.35~NO.38 (내부온도), 외부 NO.1,NO.2
- 8 토출 유속, 열교환 유속, 회수 유속, 취수구 열량, 취수구 평균열량
- 9 CH-4~5유량(시간), CH-1~3유량(누적)

(b) 저장 데이터 폴더

그림 3-113 데이터 저장 및 폴더

제 6절 실험과 데이터 분석

1. 시추공 현장실험 및 데이터 분석

가. 현장실험 계획

(1) 기본모형 설계

- 동절기 심부지열에서 취득한 열량으로 난방 운전할 수 있는 적절한 온실의 규모를 설정하기 위해서는 지열 취득열량을 이론적으로 접근하여 계획할 수도 있지만, 지역과 지형에 따라, 지중열교환방식이나 성능에 따라 차이가 클 수 있기 때문에 실제 시공에 의한 열량 테스트를 실시하여 추진하는 것이 바람직함
- 본 연구에서는 장기간 모니터링 실험을 통하여, 심부지열에서 얻을 수 있는 온도와 열량에 대하여 분석하고, 실용성 여부와 함께 효율을 향상시킬 수 있는 제어기법을 도출하는 것이 목적임
- 따라서 심부지열용 시추공의 시공과 열교환기 설치에 의해 물을 주입하고 심부지열로부터 가온되어 돌아오는 물의 온도차, 그때의 유량을 계측하여 적절한 온도의 확보와 함께 최대 열량을 얻는 방안 모색이 중요함
- 실험 준비를 위한 모형설계 계획은 지중열교환기 방식선정, 실험이 이용되는 온실의 부하특성 파악, 실험장치의 구성으로 나누어 진행하였음

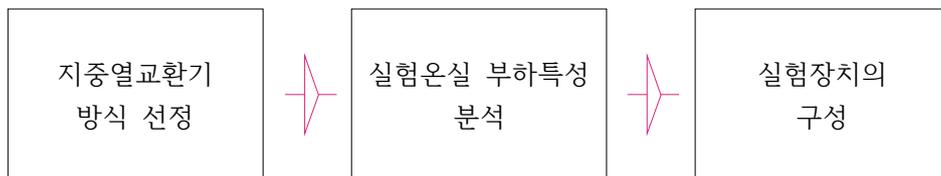
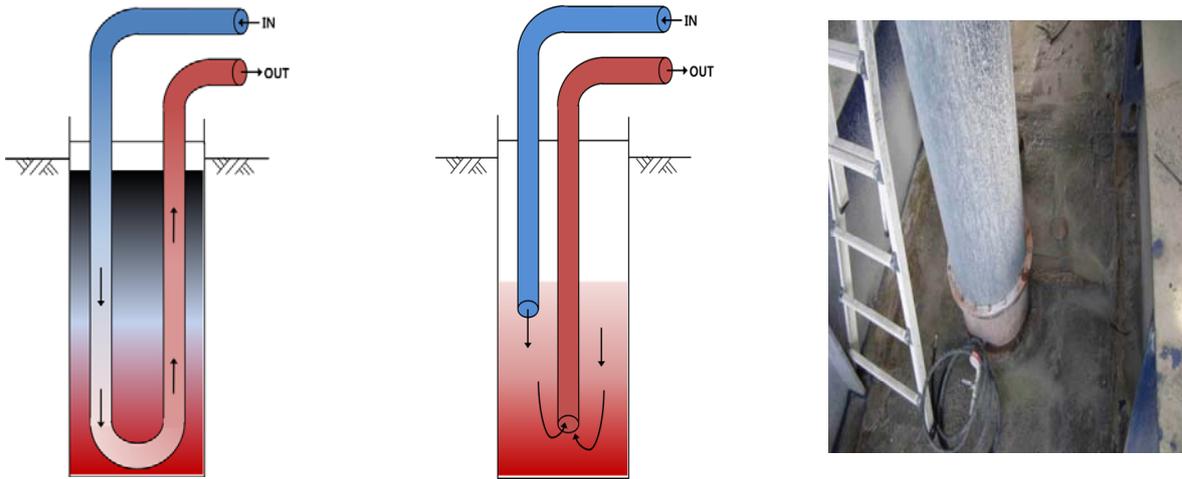


그림 3-114 실험모형 설계계획

(2) 지중열교환기 방식

- 시추공을 이용한 심부지열을 얻는 방법에는 크게 Double well과 Single well로 나누어 볼 수 있으며, Double well은 주입공과 생산정을 분리하여 시추공을 시공하고 주입된 물을 파쇄대(인공지열저류층)를 통과시키고 주입정으로 끌어올리는 방법으로써 시공비용이 많이 드는 것이 단점이지만 고온의 대규모 지열을 얻을 수 있는 장점으로 지열발전소에 응용 적용되는 공법임
- Single well은 단일공 내부에서 주입과 생산을 함으로써 시추공 공사비용이 절감되지만 Double well에 비하여 취득열량이 낮은 것이 단점으로, 시추공 내부에 주입공과 생산정을 설치하는 방법에 따라 Closed U-tube방식, Closed Co-axial방식, Open standing column well(SCW)방식이 있음
- 본 연구에서는 심부지열을 이용한 동절기 가온을 하는 방법으로서 시공비용과 공사난이도를 고려하여 Single well의 단일공에 Closed Co-axial방식으로 설치하여 현장실험을 추진함



(a) Closed U-tube방식 (b) Closed Co-axial방식 (c) 시추공

그림 3-115 Single Well의 열교환기법 및 현장 시추공

(가) 시추공

- 주관연구기관인 (주)한진디엔비에서 심부지열 시추공사와 열교환기 설치하였으며, 2015년 6월 시추현장 및 실험온실 조사, 2015년 7월 현장(전남 나주시 산포면 등수리 81-1 전남농업기술원)확정 및 시추장비 설치, 2015년 9월 1일 시추공 시추작업을 진행하였음
- 시추공의 시추작업은 2016년 2월 6일에 완료되었으며, 이후 시추공 내에 지중열교환기인 Inner pipe를 설치하는 작업과 순환펌프, 온도 및 열량 측정장비, 온실측 배관 작업 등을 진행하였음
- 시추작업 진행 중에는 기상, 연휴, 행사 등의 작업진행에 지장을 주는 요인들이 발생하여 작업 중지 기간이 발생하였기 때문에 사전에 이를 고려한 계획을 수립하여 진행한다면, 차후의 실제 시추작업기간은 이보다 단축할 수 있을 것으로 판단됨
- 시추공은 직경 8.5 inch(215.9 mm)의 화강암지반에 2,002 m깊이의 심부지열 시추공 1공을 시공하였음



그림 3-116 심부지열 시추위치 및 설치장비

(나) 지중 열교환기

- 지중 열교환을 위한 시추공은 중앙에 설치되는 Inner pipe를 이용하는 Closed Co-axial방식을 사용함
- Inner pipe는 독일 Aquatherm사의 단열 PE파이프(외경 110 mm, 내경 73.4 mm 두께 18.3 mm) 또는 국내산 PE파이프를 사용에 대하여 검토하였으며, 실험현장 설치는 국내산 PE파이프(외경 90 mm, 내경 60 mm, 두께 15 mm)를 이용함

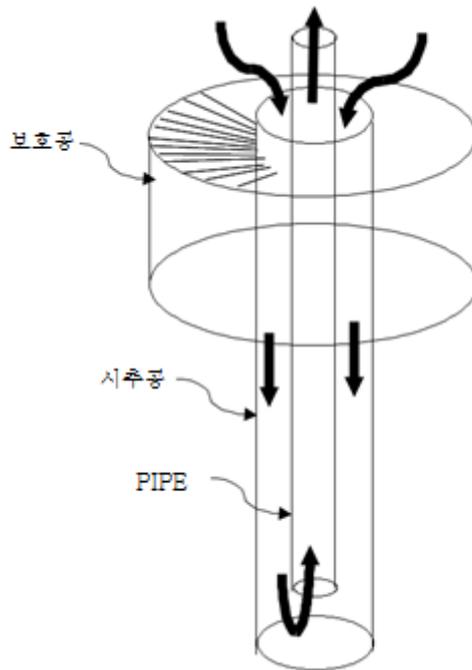


그림 3-117 열교환기 파이프 설치도

1500 PARTNER FOR THE BEST QUALITY

TEST REPORT

우 04332 대전광역시 대학구 신탄전로 637 (평촌동) TEL (042)931-6611~3 FAX (042)931-6614

성적서번호: TAD-006419 접수 일자: 2015년 10월 27일
 대 표 자: 김원열 시험완료일자: 2015년 11월 04일
 업 처 명: (주)한국피이엠
 주 소: 세종특별자치시 연기면 공단로 130

시 료 명: HDPE PE 100 시편

시험결과

시험항목	단위	시험구분	결과치	시험방법
열전도율	W/m K	-	0.31	ASTM E1461-13

• 용 도: 품질관리용

비 고: 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로만 관제 제품에 대한 품질을 보증하지 않으며, 성적서의 신뢰성은 홈페이지(www.kpi.or.kr) 또는 QR CODE로 확인 가능합니다.
 2. 이 성적서는 열부, 잔해, 광고 및 소송용 등으로 사용할 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
 3. 이 성적서는 무변동본 보유했던 유효하며, 시본 및 전자 인쇄본/재인쇄본은 효력이 없습니다.

Meßwerte:

Versuch Nr	Wärmestrom W	Temperatur der warmen kalten Probenoberfläche °C		Mitteltemperatur der Probe °C	Temperatur-differenz an der Probe K	Wärm
		°C	°C			
1	70.7	25.5	9.8	17.6	19.9	0
2	71.2	51.6	35.7	43.7	15.0	0
3	71.8	61.8	46.4	54.1	15.4	0
4	---	---	---	---	---	-
5	---	---	---	---	---	-

Meßunsicherheit: < 3% Wärmeleitfähigkeit bei gegebener Temperaturdifferenz an

Angaben über das Material nach der Messung bis 61.8 °C Wärmeselle:

Rohdichte: *) 893 kg/m³ Masse: 4.55 kg
 *) im aufgetriebenen Zustand Masseänderung: 0.8 %
 Bemerkung: -----

Ergebnisse:

Mitteltemperatur °C	10	20	30	40	50	60	----
Wärmeleitfähigkeit W/(m K)	0.145	0.147	0.148	0.150	0.152	0.153	----

Die Werte der Wärmeleitfähigkeit gelten für den trockenen Zustand des Materials unter den gegebenen Bedingungen und sind auf die Mitteltemperatur der Probe bezogen!

Beurteilung: -----

그림 3-118 Inner Pipe 열전도도 시험서 (좌 : 국산, 우 : 독일산)

(3) 실험온실

(가) 심부지열과 온실규모의 검토

- 심부지열로부터 뜨거워진 물을 보관하는 버퍼탱크의 구비와 함께 취득된 열량소비를 위한 온실이 필요하고, 원활한 실험 진행을 위해 온실과 축열조의 규모를 다음과 같이 설정함
 - 첫째, 2,002m의 심부에서 취득되는 열량에 대한 산정은 Closed Co-axial방식 시뮬레이션 결과에 의해 지중 열교환기 순환수의 유속과 온도를 고려하여 열량은 100,000 ~ 200,000 kcal/hr로 추정해 볼 수 있고, 다만 현장에서의 시추 깊이와 지온, 열교환 후 회수관로의 단열성능에 따라 오차와 손실 등을 감안하여 150,000kcal/hr 열량을 얻는다고 가정함
 - 둘째, 실험에 이용될 온실의 형식과 규모는 농가에 보급되는 한국농어촌공사의 유리온실과 농진청의 비닐하우스 표준도면의 규격 중에서 심부지열에서 얻을 열량으로 운영이 가능한 정도를 선정함
 - 온실 크기에 따른 동절기 필요열량을 알기위한 난방부하계산은 여러 가지 환경적인 여건을 감안하여 다양한 방법이 있으며, 일반적인 방법으로 외기온도와 내부 유지온도 그리고 온실의 피복재, 보온재 등에 의한 온실의 난방부하(Q)는 식(15)와 같음

$$Q = A_w \cdot U (T_i - T_o) (1-fr) [\text{kcal/hr}]^{30} \dots\dots\dots (15)$$

여기서, A_w : 하우스 표면적(m^2), U : 난방부하계수,
 T_i : 하우스 내 설정온도 ($^{\circ}C$), T_o : 외부기온 ($^{\circ}C$), fr : 보온피복에 따른 열절감률

- 난방부하계산은 주관연구기관이 위치한 전남 광주지역의 기상조건인 외기온과 온실 내 희망온도는 토마토 재배를 기준하여 $16^{\circ}C$, 유리온실은 천장 2중 커튼, 측면 1중 커튼을 적용하였고, 비닐온실은 천장 1중 커튼, 측면 1중 커튼을 적용하여 온실 난방부하계산 프로그램을 이용하여 표 3-45와 같이 산출함

표 3-45 온실 규격별 최대난방부하

피복	면적 (m^2)	대표외기 기온($^{\circ}C$)	최대난방부하 (kcal/hr)
유리온실	9,384	-6.4	864,719 (1005 kW)
유리온실	4,140	-6.4	415,958 (484 kW)
비닐온실	2,376	-6.4	345,197 (401 kW)
비닐온실	1,050	-6.4	119,509 (139 kW)

30) 이병일 외, '시설원예학', 향문사, pp. 106-110, 2002.

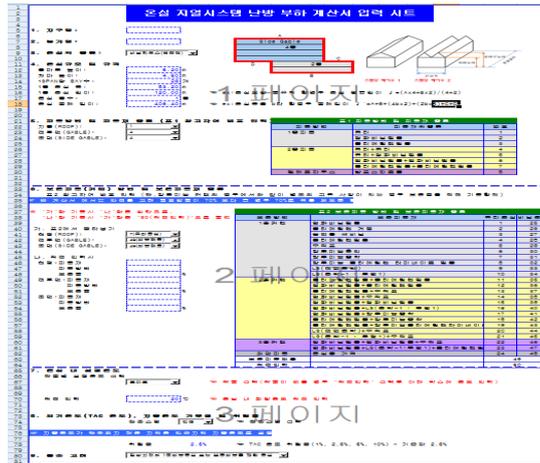


그림 3-119 온실난방부하계산 프로그램

- 셋째, 축열조 또는 버퍼탱크의 용량은 열펌프 3.5 kW당 500 ℓ³¹⁾ 이상으로 하는 기준에 의하여 심부지열 취득열량을 기준으로 산정하면 25 ton이므로 여유를 감안하면 30 ton으로 할 수 있음, 축열조 설치의 현장여건과 제작조건을 고려하여 1조 또는 2조 이상으로 구성할 수 있으며, 본 실험현장은 규모를 고려 30 ton 1조로 계획하고, 만일 대용량의 경우 축열조의 외형적 크기(체적 : $V = \pi * r^2 * hr$)를 줄이기 위해 2조로 분할 적용이 바람직함
- 이와 같이 예측되는 심부지열 취득열용량 150,000 kcal/hr에 의하여 1,300 m² 면적의 유리온실과 30 ton 축열조를 설치하고 실험과 운영을 계획함

(나) 현장 실험온실의 선정

- 심부지열용 시추공 설치위치에 따라 신규온실 설치와 기존온실의 이용 등을 획득 가능한 열량과 함께 고려하여 계획, 추진하였으며, 전남 농업기술원에서 운영 중인 화훼온실(장미)이 실험온실로 확정되어 관련 설비조사와 난방부하 등을 산정하고 현장 실험시설의 구성을 계획하였음
- 화훼연구 유리온실은 총 1,487 m²(450평)로 70평 2개소, 85평 1개소의 재배온실과 보일러실, 작업실, 복도 등으로 구성된 벤노형(천장 2중 커튼, 측면 1중 커튼)임
- 온실난방을 위해 설치된 기존 보일러용량이 300,000 kcal/hr로 난방프로그램 산출결과 최대부하 167,809 kcal/hr에 충분히 부합되므로, 온실로서의 온도환경 등 여유를 감안한다면 온실 전체에 대한 난방을 계획한다면 300,000 kcal/hr이상, 축열조 50 ton이상 확보하는 것이 바람직하고, 심부지열을 이용하는 실험온실은 이중 256 m²로 구획된 공간을 이용하며, 대조군으로 옆 칸의 320 m² 구역과 비교하였음

31) 한국농어촌공사, '시설원예에너지이용효율화사업 지열(냉)난방보급사업 기술검토자료, 지열분야 설계 및 시공기준', 2010.6.

표 3-46 기존 보일러 제원 및 온실난방부하계산(P/G)

구분	주 보일러	예비 보일러
사용연료	등유, 경유	등유, 경유
난방출력	348.8 kW	232.5 kW
난방용량	300,000 kcal/hr	200,000 kcal/hr
연료소비량	40 L/hr	27.15 L/hr
난방면적	1980 m ²	1320 m ²
사용전원	220V 1ø	220V 1ø



(4) 실험장치의 구성

- 심부지열용 시추공에 주입되는 물과 시추공을 통하여 심부를 거쳐 열 교환 후 나오는 물의 온도를 측정하고, 수중모터펌프의 회전수를 가변시켜 변화되는 유속과 유량, 온수 온도를 측정하기 위한 현장 실험 장치는 그림 3-120과 같으며, 각 요소에 설치되는 실험장비의 규격과 용도는 표 3-47과 같음

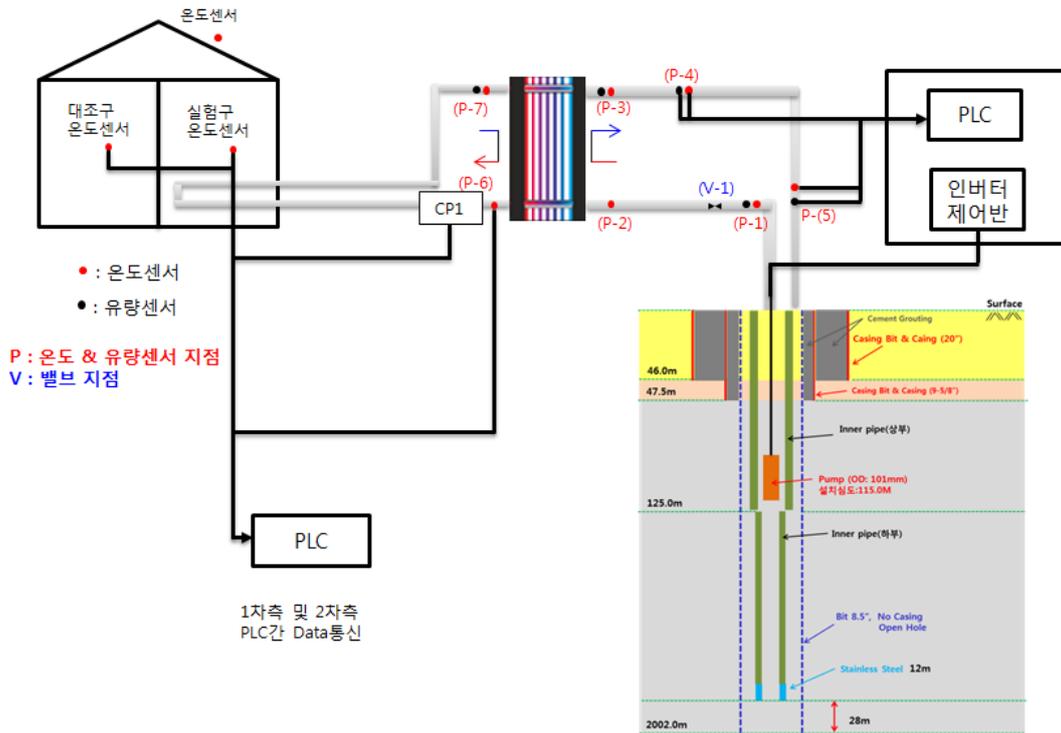


그림 3-120 현장 실험장치 구성도

표 3-47 실험장비 규격과 용도

실험장비	규격	용도
온실	256 m ²	열량 소비
축열조	5 m ³ ×2조	온수 저장
수중모터펌프	3상 380 V 7.5 kW	VVVF로 속도가변
유량계	50 mm 내외, 50°C이하	관내 유량측정 및 전송
온도 센서	배관용, 정밀급	관내 온도측정 및 전송
PLC	AI, DI, AO, DO	측정처리 및 저장
휴대용컴퓨터	테블릿PC	현장 측정, 수집, 분석
계기류	전압, 전류, 전력	펌프소요동력 측정
전선류	전력, 약전	기기 및 센서 연결

나. 온도 및 열량실험

(1) 실험 순서 및 기간

- 현장실험은 2,002 m 시추한 시추공의 심부지열에서 취득할 수 있는 물의 온도와 열량을 추정해 보고, 효과적인 운전방법을 도출하기 위해 진행하였음
- 실험은 크게 장기간 난방공급실험으로 동절기 실험온실에 지속적으로 심부지열에서 생산된 온수를 공급하며, 온도변화를 모니터링 하는 것과, 심부지열로부터 최대 몇°C 온수까지 높게 취득할 수 있는가?, 그리고 최대로 얻을 수 있는 열량은 몇 kcal/hr 인가? 등 3가지로 구분하여 진행하였음
 - 따뜻해진 심부지열 온수를 동절기간인 2월 20일부터 3월 22일까지 실험온실(256 m²)에 공급하며, 온실의 난방상태와 함께 관로상의 물의 온도와 유량에 대한 측정값을 수집하였다. 이를 통하여 장기적인 운전이 심부지열의 열교환 효율의 능력을 얼마나 저하시키는지 판단해 볼 수 있음
 - 취득할 수 있는 물의 최대온도를 알아내기 위해 시추공 출구에 U-turn 배관을 설치, 생산된 온수가 바로 시추공으로 주입되도록 하였으며, 수중모터펌프의 회전속도를 조작하여 유속을 변화시키고 최대온도가 나타나는 온도를 모니터링하였음
 - 시추공에서 최대로 얻을 수 있는 열량을 알아보기 위해 시추공에 주입되는 물의 온도를 낮추고, Δt 를 크게 유지하고 운전하였고, 이를 위해 시추공에서 생산된 온수를 지상에 설치된 열교환기와 지하수를 이용하여 냉각시킨 후 시추공에 주입하는 방법을 취하였음

(가) 모니터링 방법 및 순서

① 수중펌프모터의 정격 장기간 운전

- 심부지열의 장기간 이용에 따른 수온의 변화를 알아보기 위한 실험으로 시추공 투입 물 온도와 양, 회수되는 물 온도와 양을 측정, 기록하였음
- 수중펌프모터에 공급되는 전압과 전류 그리고 소비전력을 측정하여 기록하였음

② U-turn 배관에 의한 무손실 운전

- 취득한 심부지열을 소비하지 않고 다시 시추공에 온수를 주입하여 지열을 취득하여 되돌아오게 함으로서 최대 높일 수 있는 온도를 파악하고, 이때 시추공에 흐르는 유속과 온도 관계를 분석하기 위해 VVVF 설비에 의한 펌프 회전속도를 변화시켜가며 각각의 속도에 대하여 시추공 투입 물 온도와 양, 회수되는 물 온도와 양을 계측하여 기록함
- 수중펌프모터에 공급되는 전압과 전류, 주파수 그리고 소비전력을 측정하여 기록함

③ 측정주기 및 횟수

- 열 교환하는 물이 깊이 2,002 m 시추공을 왕복하여 총 4,004 m을 이동하게 되는데, 현장에 설치되는 수중모터펌프의 정격유량 8 m³/hr으로 운전하게 되는 경우에는 지열을 취득하며 내려가는 시추공 구간에서는 유속이 0.0745 %로 되고, 회수되어 돌아오는 Inner pipe 구간에서는 0.7863 %로 되어, 지상에서 물이 들어갔다 나옴에 걸리는 총소요시간은 약 8시간 20분이 됨
- 실험은 9시간 이상 연속 운전하면서, 실험의 방법에 따라 데이터의 변화 등을 고려한 적정 간격으로 온도, 유량, 전력 등을 측정 및 기록함

(나) 모니터링 기간 및 데이터의 저장

- ① 모니터링 기간 : 2016년 2월 23일~6월 3일
- ② 모니터링 방법 : 컨트롤러의 Data Logger에 의한 측정데이터 자동저장과 정기적인 현장 노트북 업로드함
- ③ 현장 측정 및 기록 : 운전 중 28일간 진행, 측정기록표에 작성함

표 3-48 현장 실험 데이터 기록표(예시)

측정일자 :

시 간	열교환기온도(℃)		유속 (m/s)	유량 (m ³ /분)	열량 (kcal/hr)	펌프모터 (380v7.5kW19.3A)				
	입구	출구				f(Hz)	I(A)	E(V)	P(kW)	pf
	현장 실험 데이터 기록표(예시)									

(2) 현장실험 실시

(가) 장기간 난방공급 및 모니터링

- 실험온실(256 m²)에 난방에너지를 장기간 공급하는 운전을 통하여 심부지열이 갖는 지속적인 유효능력을 수온의 변화를 통하여 알아보는 실험임

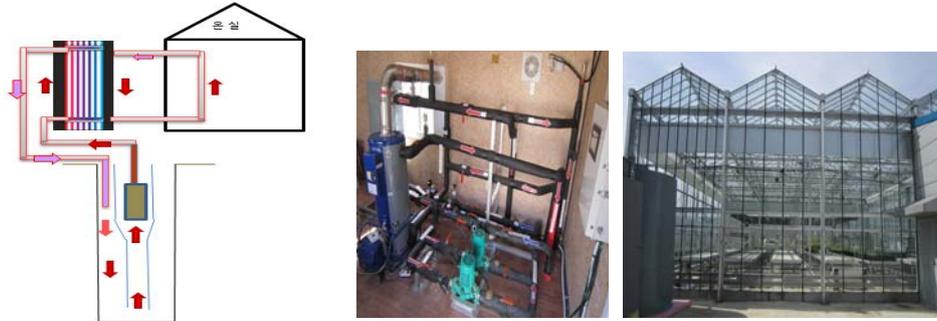


그림 3-121 장기운전 실험 개념도 및 장치 사진

- 측정데이터는 2016년 2월 22일부터 컨트롤러의 데이터 로거에 자동 저장되었으며, 측정 요소는 생산정온도, 주입정온도, 유량, 온실내부온도, 온실외기온도 등으로 1분 간격으로 그림 3-122와 같이 기록함

No.	Status	Date	CH-1 생산정 온도	CH-2 주입정 온도	CH-3 온도	CH-CH-2 주입정 유량	CH- 유량
1	Logging C	2016-02-22 11:48	39.7	35	35.8	0	0
2	Logging C	2016-02-22 11:49	39.7	35	35.8	0	7.2
3	Logging C	2016-02-22 11:50	39.7	35	35.8	0	7.4
4	Logging C	2016-02-22 11:51	39.7	35	35.9	0	7.6
5	Logging C	2016-02-22 11:52	39.7	35.1	35.9	0	7.8
6	Logging C	2016-02-22 11:53	39.7	35	35.9	0	8
7	Logging C	2016-02-22 11:54	39.7	35.1	35.9	0	8.2
8	Logging C	2016-02-22 11:55	39.7	35	35.9	0	8.4
9	Logging C	2016-02-22 11:56	39.7	35.1	35.9	0	8.7
10	Logging C	2016-02-22 11:57	39.7	35	35.9	0	8.8
11	Logging C	2016-02-22 11:58	39.7	35	35.9	0	9.1
12	Logging C	2016-02-22 11:59	39.7	35	35.9	0	9.3
13	Logging C	2016-02-22 12:00	39.7	35	35.9	0	9.5
14	Logging C	2016-02-22 12:01	39.6	35.1	35.9	0	9.7
15	Logging C	2016-02-22 12:02	39.7	35.1	35.9	0	9.9
16	Logging C	2016-02-22 12:03	39.7	35.1	35.9	0	10.1

그림 3-122 저장데이터

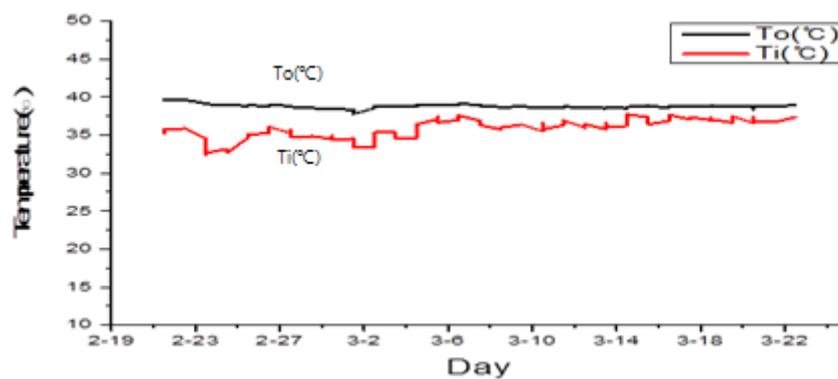


그림 3-123 시추공 생산 및 주입 수온 변화

- 32일간의 온실난방 공급 지속운전에서 심부지열 시추공의 생산정 수온은 39.8~38.3°C을 유지하였으며, 온실 난방공급 후 냉각된 물은 생산정 온도보다 3.5~7°C 낮은 온도로 시추공으로 들어갔음을 그림 3-123으로 알 수 있고, 이 기간 중 최대 취득열량은 124,000 kcal/hr로 나타남
- 운전 중 2016년 2월 25일 오전6시 40분에 외기 최저기온 -5.4°C를 기록했으며 순수한 심부지열난방공급으로 실험온실의 내부 온도는 19.5°C을 유지함

(나) 지열취득 최고온도 실험

- 2,002 m 심부지열로부터 취득할 수 있는 최고 수온을 측정해 보기위해 그림 3-124와 같이 취득한 심부지열을 손실 없이 시추공에 U-turn 배관을 통해 재주입 할 수 있도록 하여 운전하고 생산정 수온을 측정함
- 시추공에 흐르는 유속과 온도 관계를 분석하기 위해 VVVF 설비에 의한 펌프 회전속도를 변화시켜가며 각각의 속도에 대하여 시추공 투입 물 온도와 양, 회수되는 물 온도와 양을 계측하여 기록함



그림 3-124 최고온도 실험 개념도 및 장치 사진

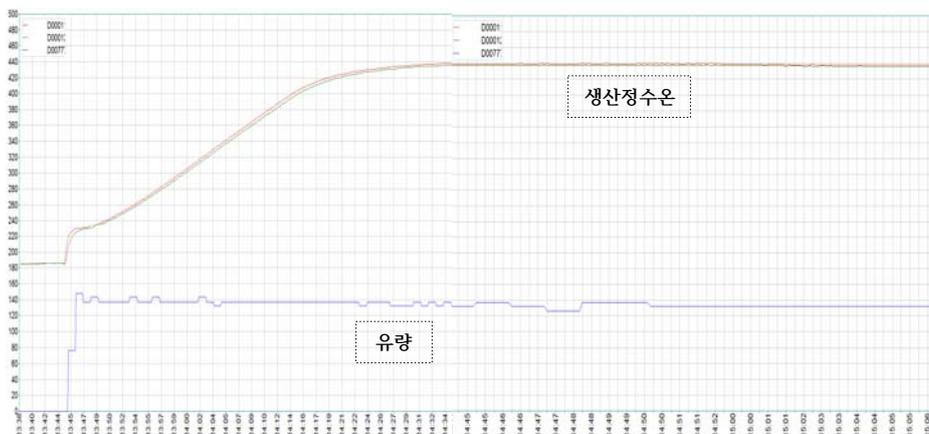


그림 3-125 온도 트렌드 모니터

- 이 실험은 2016년 4월 20일과 21일에 실시하였으며, 운전 중 최고온도 43.9°C가 약 20분간 유지되다가 이후 10분 간격으로 1.5°C씩 낮아졌음
- 수중모터펌프의 공급전원 주파수를 60 Hz에서 70 Hz로 높여 관로상의 유속을 증가시켰더니 생산정 수온이 43.5°C에서 약 30분간 43.7°C로 증가되다가 이후 점차 낮아지는 경향이 있는데, 이것은 유속의 증가가 일시적으로 회수관로상의 열손실을 줄여주는 것으로 추정됨
- 수중모터펌프의 공급전원 주파수를 60 Hz에서 50 Hz로 낮추어 관로상의 유속을 감소시켜 실험한 경우에는 생산정 수온이 43.1°C에서 지속적으로 점차 낮아져 40.9°C에서 유지되는 경향으로 나타나 유속의 감소가 회수관로상의 열손실을 증가시키는 것으로 판단됨

(다) 지열취득 최대열량 실험

- 실험을 위해 시추한 심부지열용 시추공으로부터 취득할 수 있는 최대 열량을 측정해 보기위해 그림 3-126과 같이 실험 장비를 설치함
- 지상에 설치된 열교환기를 외부 지하수를 이용하여 냉각시킴으로서 심부지열에서 생산된 온수에서 열을 최대한 흡수하고 냉각된 물을 시추공에 주입하여 Δt 을 증가시키는 방법으로 실험함
- 수중모터펌프를 가변속하여 유량을 증감시키고 온도와 함께 관찰함으로써 심부지열 최대 취득열량을 추정함



그림 3-126 최대열량 실험 개념도 및 장치 사진



그림 3-127 인버터에 의한 전원주파수의 가변

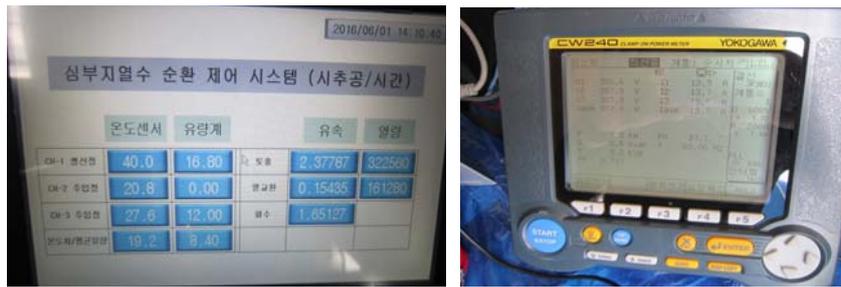


그림 3-128 온도 및 유량, 전력량 측정

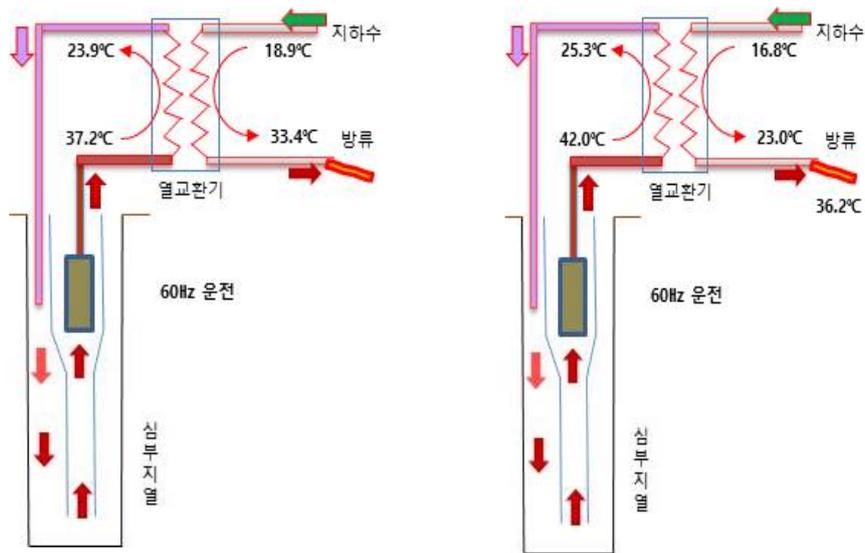


그림 3-129 Δt 증가방법 및 온도측정

- 이 실험은 2016년 6월 1일~3일에 실시하였으며, 그림 3-130과 같이 정격운전(60 Hz) 중에는 유량이 16.8 m³/hr이었으며, 이때 생산정의 수온은 40.0°C, 주입정의 수온은 20.5°C로 Δt 가 19.5°C로 심부지열의 취득된 열량은 325,920 kcal/hr 나타났음

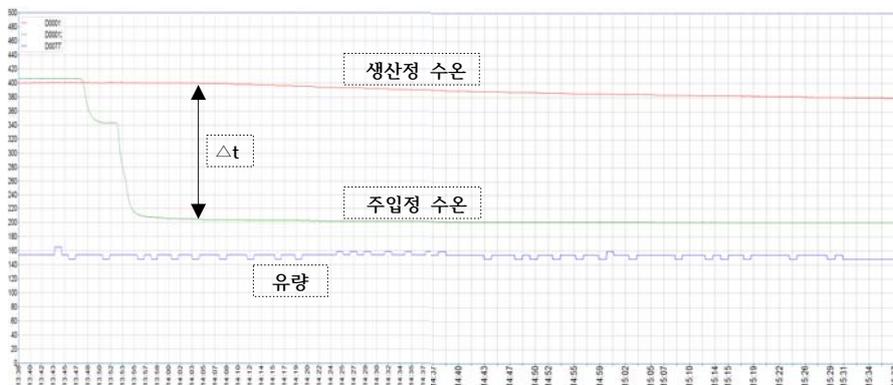


그림 3-130 정격운전(60 Hz) 토출 및 주입 수온 트렌드

- 수중모터펌프의 공급전원 주파수를 60 Hz에서 70 Hz로 높여 유속을 증가시켜 유량을 24.6 m³/hr로 하였으며, 그림 3-131과 같이 생산정의 수온은 38.3°C, 주입정의 수온은 21.5°C로 Δt 가 16.8°C로 이때 심부지열의 취득된 열량은 413,260 kcal/hr 나타났음
- 유속의 증가는 Δt 를 감소시키지만 유량을 증가시키기 때문에 이로 인한 영향으로 취득 열량은 증가하는 것으로 나타났음

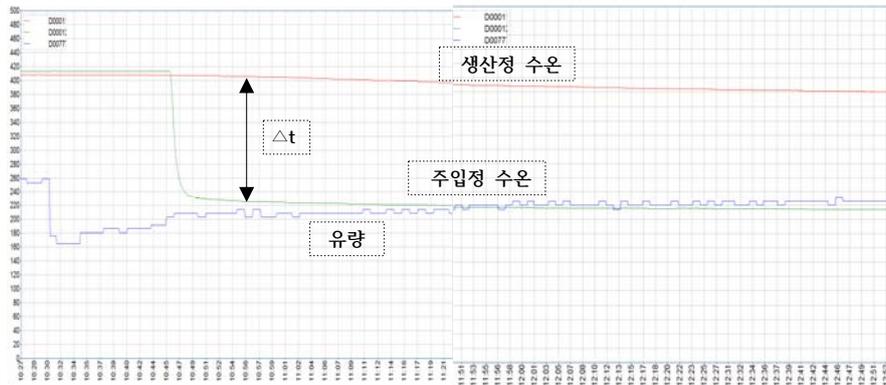


그림 3-131 증속운전(70 Hz) 토출 및 주입 수온 트렌드

다. 실험결과 분석

(1) 장기운전 모니터링 분석

- 동절기 실험온실을 가온하면서 심부지열에서 생산된 수온과 주입되는 물의 온도를 모니터링한 결과 그림 3-132와 같이 지열을 취득하여 생산되는 수온의 온도가 점차 낮아지는 추세로 나타났음
- 주입정으로 들어가는 수온이 급격히 낮아지거나 상승하는 경우 생산정에서의 수온도 영향을 받아 경미하나마 감소 또는 상승하는 패턴을 보였음
- 2016년 2월 23일부터 3일간의 시추공에 주입되는 물의 온도가 하강하는 패턴(a)에서 토출온도가 경미하게 감소하는 것(a')을 볼 수 있으며, 2월 26일부터 시추공에 주입되는 물의 온도가 상승했던 기간(b)에서 토출되는 물의 온도는 경미하나마 감소하는 패턴(b')이 나타났음
- 이후, 주입되는 물의 온도가 내려가는 기간(c)에서 토출되는 물의 온도는 하강하는 패턴(c')으로 나타났음
- 3월 6일부터 시추공에 주입되는 수온이 상승(d)하였으며 이 기간 동안 토출 수온의 온도는 거의 변화가 없는 일정한 값으로 계속(d')되었음
- 3월 10일 이후 주입수온이 변화폭은 작지만 상승과 하강을 반복(e)하였고, 이때 토출수온은 거의 일정한 온도를 유지하는 것(e')으로 나타났음

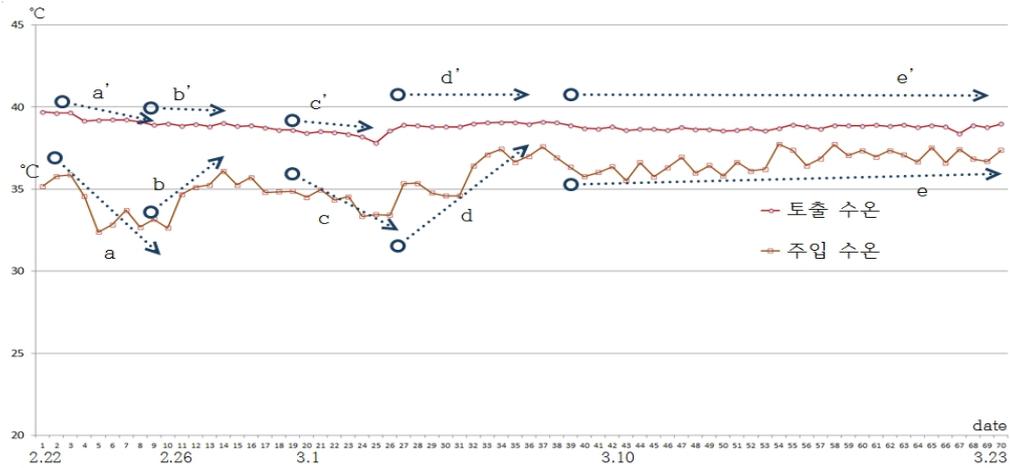


그림 3-132 장기간 운전 토출 및 주입 수온 트렌드

- 2,002 m 시추한 실험의 시추공에 주입되는 물의 온도가 35°C이하에서 하강하는 경우 토출수온이 내려가고, 주입수온 35°C 이상에서의 상승 또는 하강되는 변화에 대하여는 토출수온이 일정한 패턴으로 나타나, 심부지열에서 열을 취득한 온수가 회수관로를 통하여 지상으로 돌아오면서 관로주변의 공급수온의 영향을 받는 것으로 추정됨
- 장기간의 운전에서 토출수온의 패턴이 다소 하강하였으며, 주입수온이 높아진 3월 8일 이후에도 38.8°C 내외로 유지하는 것으로 나타나, 본 실험규격에서의 취득온도로 판단되며, 회수관로의 단열성능 개선과 열 교환 유속의 변화를 통하여 취득온도의 효과를 높일 수 있을 것으로 판단됨

(2) 변속운전 모니터링 분석

- 수중모터펌프의 변속을 통하여 지중 열교환부분의 유속을 가변하였으며, 이때의 시추공 토출조에서 생산되는 온도변화를 분석하였음

표 3-49 변속운전 실험표

주파수 (Hz)	측정일자	유량 (m ³ /hr)	지중 열교환부 유속 (m/s)	물 온도 (°C)		취득열량 (kcal/hr)	소비전력 (kW)
				토출	주입		
70	4.7 10:06 ~ 4.7 10:20	14.4	0.13230	38.8	37.4	20,180	11.3
65	4.6 14:10 ~ 4.7 10:00	13.8	0.12679	39.7	37.7	17,940	9.3
60	3.17 01:05 ~ 3.17 22:00	12.6	0.11777	38.7	37.7	12,600	7.6
55	3.15 16:05 ~ 3.16 16:00	11.5	0.10888	38.6	37.4	16,500	6.0
50	3.09 11:05 ~ 3.10 11:00	10.3	0.09458	38.5	36.5	17,280	4.8
45	3.22 11:05 ~ 3.23 11:00	9.1	0.08548	38.2	36.7	11,520	3.7

* 측정시간 동안의 일정범위에서의 평균값

- 수중모터펌프의 공급전원 주파수를 낮추어 지중 열교환 부분의 유속을 0.11777 %에서 각각 0.10888 %, 0.09458 %, 0.08548 %로 감소시켜 운전하였을 때, 표 3-49에서와 같이 주입수온의 높고 낮음에 관계없이 심부지열 생산정에서 나오는 수온은 낮아지는 경향이었으며, 공급전원 주파수를 높여 열교환 부분의 유속을 높였을 때는 취득온도가 올라가는 것으로 나타났음
- 수중모터펌프의 전원공급 주파수를 낮추어 펌프의 회전속도를 줄였을 때 지중관로의 유속이 느려져 심부지열 지중 열 교환 부분의 지열 취득을 높일 수 있지만 회수관로 구간에서는 열손실이 커져 토출수온은 낮아지는 것으로 추정됨
- 수중모터펌프를 정격전압, 정격주파수로 운전하였을 때 규격의 정격유량(8 m³/hr)에 비하여 실제 운전유량은 12.6 m³/hr으로 157% 증가되었으며, 관로상의 물의 채움의 상태에 따라 종종 증가나 감소 등 변화되어 계측되었음
- 수중모터펌프의 정격주파수(60 Hz) 운전 중 소비전력은 7.6 kW로 측정되었고, 주파수를 70 Hz로 증가시켜 운전했을 때는 11.3 kW로 측정되어 3.7 kW 증가했음을 표 3-49에서 볼 수 있고 이때의 취득열량은 12,600 kcal/hr에서 7,580 kcal/hr 증가한 20,180 kcal/hr로 나타났음
- 수중모터펌프 소비전력 증가를 열량으로 환산하여(3.7 kW × 860 kcal = 3,182 kcal/hr) 취득열량의 증가와 비교하면 속도제어로 인한 전력손실에 비하여 지열로부터 얻은 열량이 큼을 알 수 있었음
- 표 3-49의 측정에서는 Δt가 1°C 내외이나 일반적인 경우 Δt가 5°C 이상이므로 소비전력에 비하여 상대적으로 더 큰 열량을 속도제어를 통하여 얻을 수 있음을 알 수 있음
- 지중으로부터 많은 열량을 얻을 필요가 있을 경우에 수중펌프모터의 증속운전이 유용하고, 난방에 필요한 열량이 매우 적은 경우에는 취득열량과 소비전력을 상호 비교하여 운전제어를 할 필요가 있음

(3) 취득온도 및 열량 분석

- 장기운전 모니터링과 변속운전 등을 통하여 2,002 m 실험 시추공에서 일상적으로 취득할 수 있는 온도와 열량은 다음과 같음
- 동절기 실험온실에 열량을 공급하며 일정기간 유지되었던 2016년 3월 1일과 2일에서의 시추공 생산정의 수온은 38.8°C 내외였음을 볼 때, 일반적으로 연속해서 취득 가능한 온도는 38.8°C로 볼 수 있고, 회수관로 사용되었던 Inner pipe의 재질이 단열성능이 낮은 일반 수도관으로 설치하였음을 감안하면 온도 손실이 컸을 것으로 추정됨으로, 이를 단열이 우수한 Inner pipe로 시공하면 토출부분에서 얻을 수 있는 취득온도를 높일 수 있을 것으로 판단됨
- 심부지열 실험 시추공에서의 취득열량은 유량과 입출구의 수온의 온도차에 영향이 크므로, 장기운전 모니터링에서 측정된 42,840~124,260 kcal/hr와 변속운전실험의 최대값 410,400 kcal/hr를 감안하여, Δt 13.5°C에 유량 12.6 m³/hr에서 약 170,000 kcal/hr로 추정됨

라. 소 결

- 나주 전남농업기술원 내에 2,002 m 시추한 심부지열용 시추공과 시추공 내부에 물을 순환시킬 수 있는 수중모터펌프와 전력공급과 주파수를 가변할 수 있는 인버터설비, 수온 및 유량, 전력량을 계측할 수 있는 실험설비를 설치하고, 지상열교환기와 실험온실을 이용하여 취득온도와 열량실험을 실시하였음
- 시추한 시추공에서 얻은 심부지열을 실험온실에 2016년 2월 23일부터 동절기 난방을 공급하면서 모니터링 한 결과 심부지열 취득 수온은 39.8~38.3℃을 유지하였으며, 기간 중에 최대 취득열량은 124,000 kcal/hr로 나타났음
- 실험용 시추공에서 얻을 수 있는 최대 수온을 측정하기 위해 시추공 입, 출구 배관을 U-turn 으로 하고, 수중모터펌프를 가변속운전하여 유속을 가변시키며 온도를 측정할 결과 전원주파수를 70 hz로 높여 운전할 때가 낮았을 때에 비하여 수온이 높게 나타났으며, 실험 중 최대 수온은 43.9℃로 계측되었음
- 심부지열에서 취득 가능한 최대열량을 측정하기 위해 지상에 열교환기를 설치하고 지하수를 이용하여 순환수를 냉각시킨 후 시추공에 주입, Δt 를 인위적으로 크게 만들어 운전하면서 입, 출구 온도와 유량 실험한 결과, 정격주파수 60 Hz 운전에서 325,920 kcal/hr내외였으며, 70 Hz 운전에서는 최대 413,260 kcal/hr로 추정되었음
- 장기운전, 변속운전 실험 등을 통하여 실험현장 심부지열 시추공에서 얻을 수 있는 취득열량은 170,000 kcal/hr, 39℃ 내외로 1,700 m³의 온실을 난방 할 수 있을 것으로 추정해 볼 수 있었음
- 심부지열에서 취득온도를 높이고 열량을 증가시키기 위해서는 시추 깊이는 물론 회수관의 단열성능과 시추공 내부를 흐르는 순환수 유속 설정이 중요함을 알 수 있음

2. 유리온실 데이터 분석

가. 시스템 성능 실험

○ 실험 방법 및 순서

① 수중펌프, 순환펌프 정격 가동 장기간 운전

- 심부지열의 장기간 이용에 따른 시스템의 성능과 열량을 알아보기 위한 실험으로 열교환기 측 온도 센서, 유량 센서의 데이터를 저장하여 온실에서 사용되는 열량과 시스템 성능을 산출함

② 수중펌프 변속 제어 운전

- 지중 내부에 들어가 있는 수중펌프를 VVVF 인버터로 주파수를 제어하여 변화되는 펌프의 소비 전력과 유량 데이터를 측정 및 저장하여 VVVF 제어기법에 따른 전체 시스템 성능을 산출함



그림 3-133 인버터에 의한 가변된 입력 주파수

③ 순환펌프 On-off 제어 운전

- 온실 내부에 설치되어 있는 대표 온도 센서 No.7 온도 센서의 데이터에 따라 순환펌프를 On-off 제어하고 순환펌프를 On-off 제어하게 되면 변하는 소비 전력에 따른 전체 시스템 성능의 변동을 조사함. 순환펌프의 On-off 범위는 28~38℃로 설정하였음

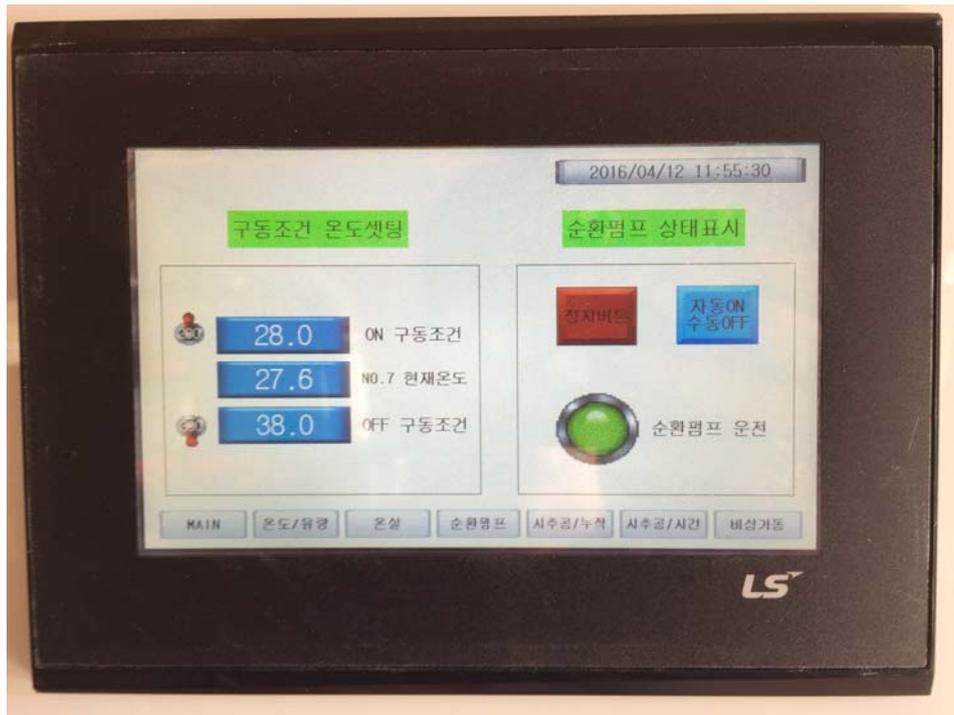


그림 3-134 순환펌프의 On-off 제어 구동 조건

- 실험 기간
 - ① 정격 가동 장기간 운전 : 2월 23일~3월 31일
 - ② 수중펌프 변속 제어 운전 : 55 Hz - 3월 15일, 50 Hz - 3월 9일, 45 Hz - 3월 22일
 - ③ 순환펌프 On-off 제어 운전 : 3월 31일~4월 6일
- 시스템 성능의 계수 산출 공식
 - 실험 현장의 시스템 성능 계수를 구하면 다음과 같이 계산됨

$$COP_1 = \frac{\dot{m}_1 C_{p,w} (T_2 - T_7)}{W_{s.p}}$$

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

- 온실에서 소비되는 취득 열량 값은 다음과 같이 계산됨

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

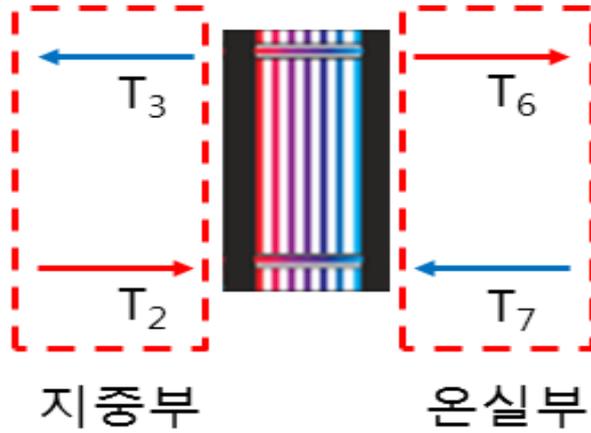


그림 3-135 열교환기 측 온도 센서의 위치

나. 실험 결과 분석

○ 장기 운전 일자별 시스템 난방 분석

- 2월 23일부터 3월 31일까지 수중펌프와 순환펌프를 제어하지 않고 정격 가동하였을 때 일자별로 시스템 난방 성능이 어떻게 나타나는지를 분석함

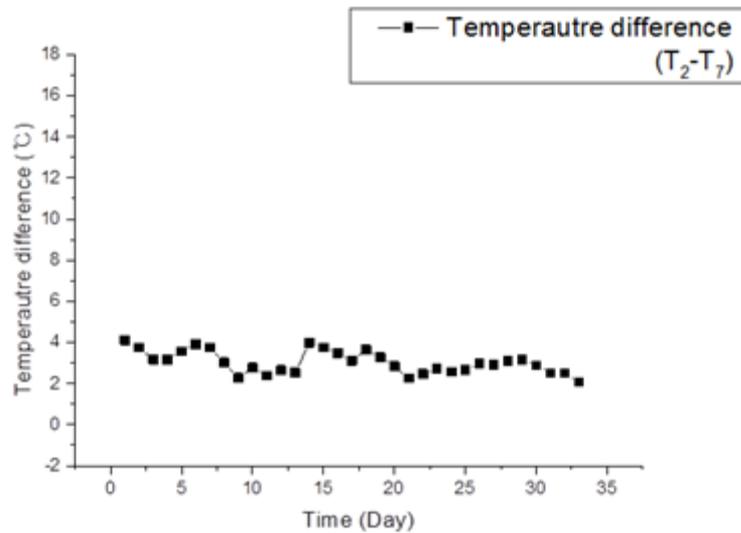


그림 3-136 일자별 전체 시스템의 온도차

- 온도차는 2°C에서 4°C까지로 나타났고 외기 온도는 최저 온도 -2°C에서 최고 온도 15°C 까지 나타났음
- 전체 시스템의 취득 열량은 44,000~90,000 kcal/hr를 기록하였고 전체 시스템 성능 계수의 값은 7~12.5 정도를 유지하였음

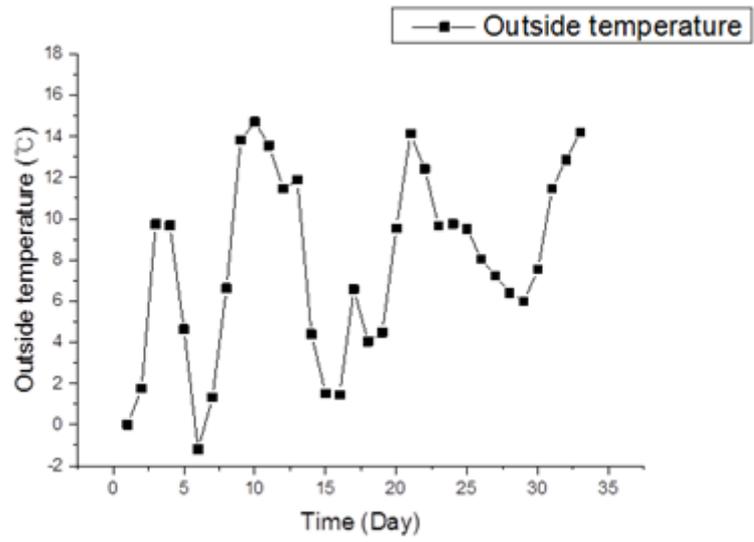


그림 3-137 일자별 온실의 외기 온도

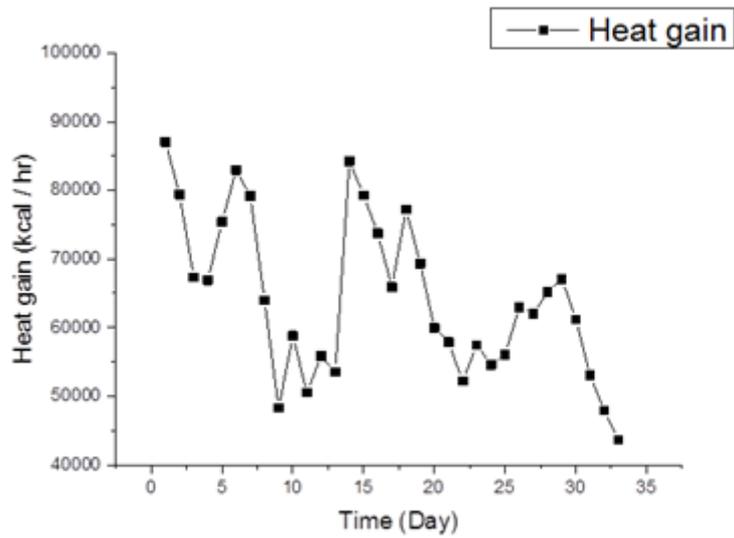


그림 3-138 일자별 전체 시스템의 취득 열량

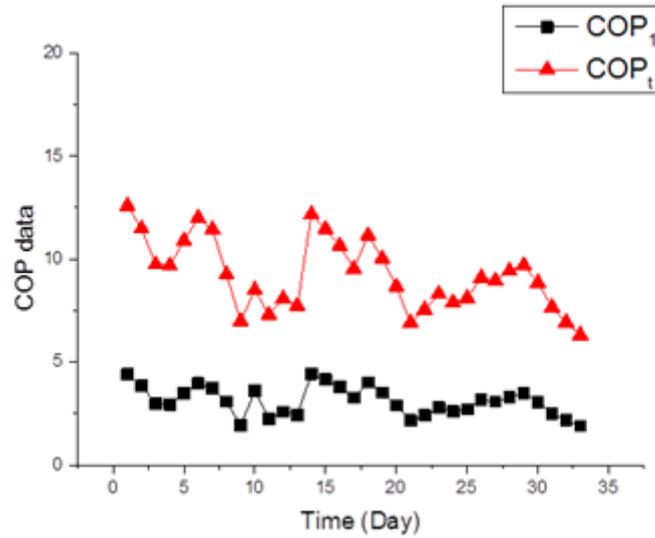


그림 3-139 일자별 COP 데이터

- 지열히트 펌프를 이용한 천부지열 시스템의 난방 성능보다 심부지열 시스템의 난방 성능 효율이 더 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며 시뮬레이터의 결과와 동일하게 천부 지열 시스템의 난방 성능이 천부지열 시스템보다 더 효과적임을 알 수 있었음
- 수중펌프의 변속 운전 시스템 난방 분석
 - 수중펌프의 변속 제어 운전 시스템의 난방 성능을 분석하기 위해서 주파수 60~45 Hz의 범위로 실험을 수행하였고 데이터 정리는 온실의 외기 온도 9.6°C를 기준으로 정리하였음

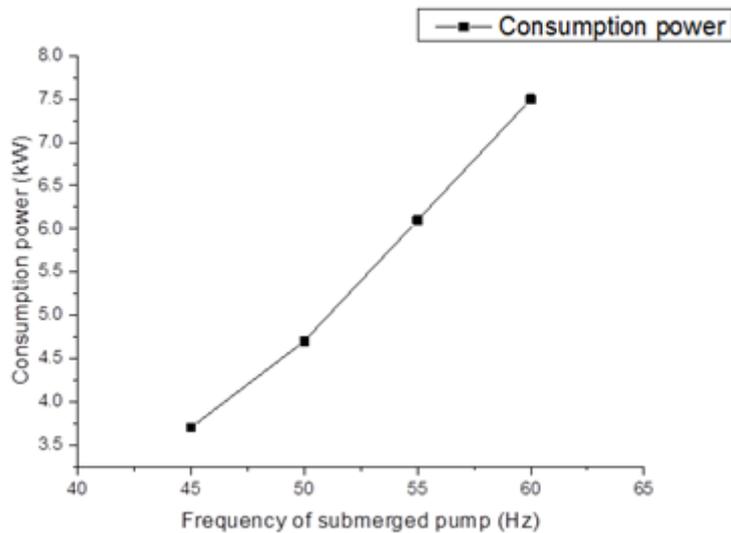


그림 3-140 수중펌프의 주파수 변화에 따른 소비 전력

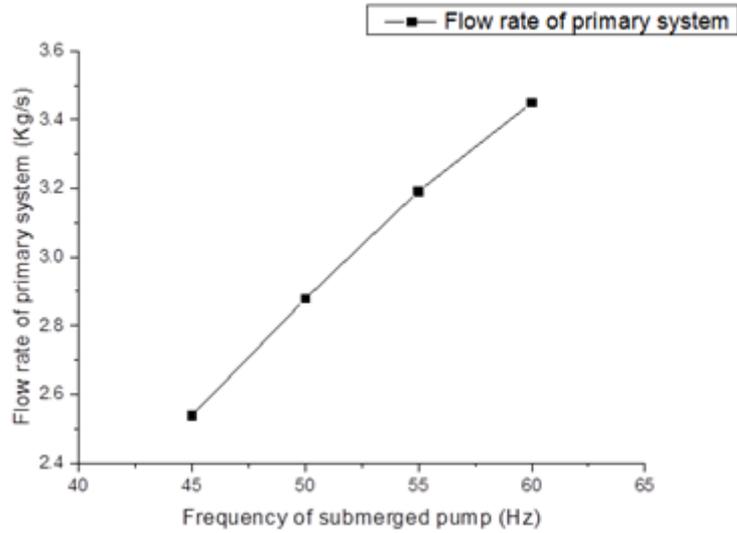


그림 3-141 수중펌프의 주파수 변화에 따른 1차측 질량 유량

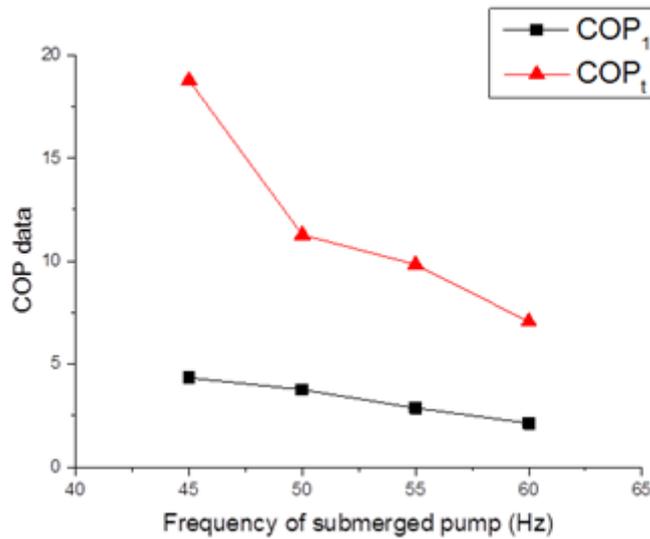


그림 3-142 수중펌프의 주파수 변화에 따른 COP 데이터

- 수중펌프의 주파수가 감소함에 따라 소비 전력과 1차측 질량 유량 값이 감소하였고 수중 펌프의 주파수를 45 Hz로 가동하여 실험하였을 때 COP_t 의 값은 18.78로 최대치를 기록하였음
- VVVF 제어를 통해 수중펌프의 주파수를 낮춰서 가동하면 난방 성능이 증가하는 것을 확인할 수 있었음
- 일자별 시스템 난방 분석 - 온실의 외기 온도 4.2°C 기준
 - 온실의 외기 온도를 4.2°C를 기준으로 데이터를 정리하였을 때 나타나는 평균 취득 열량 값과 시스템 난방 성능의 변동 곡선을 분석하였음

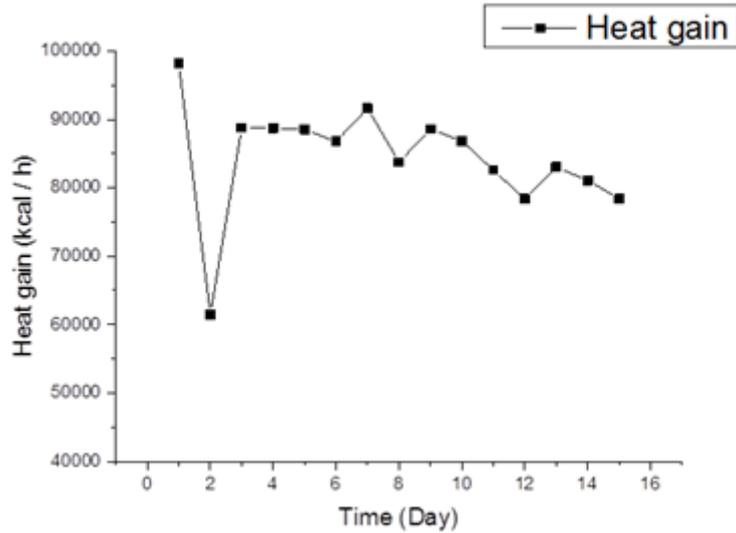


그림 3-143 일자별 전체 시스템의 취득 열량

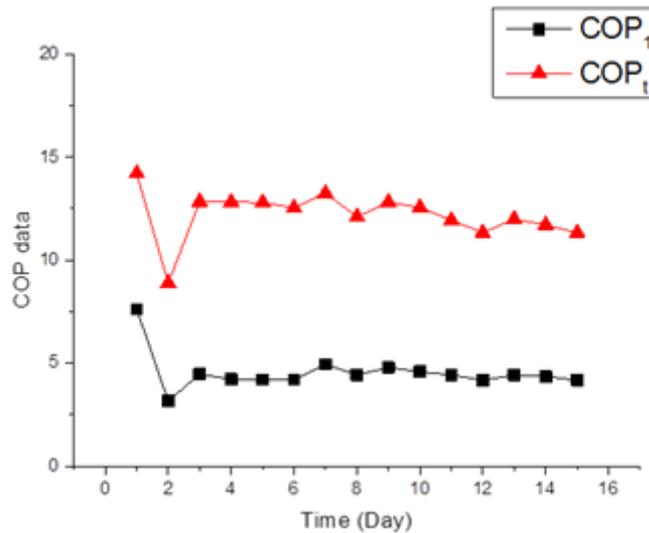


그림 3-144 일자별 COP 데이터

- 외기 온도가 4.2℃일 때 취득 열량은 90,000 kcal/hr였으며 전체 시스템 성능계수는 12.5를 유지하였음
- 순환펌프 On-off 운전 시스템 난방 성능 분석
 - 순환펌프를 On-off 제어하여 가동하였을 때 나타나는 시스템의 난방 성능을 분석하기 위하여 3월 31일부터 4월 6일까지 순환펌프를 On-off 제어하여 실험을 수행하였음
 - 외기 온도가 12℃ 이상일 때 온도차 2.2~2.8℃를 기록하였음

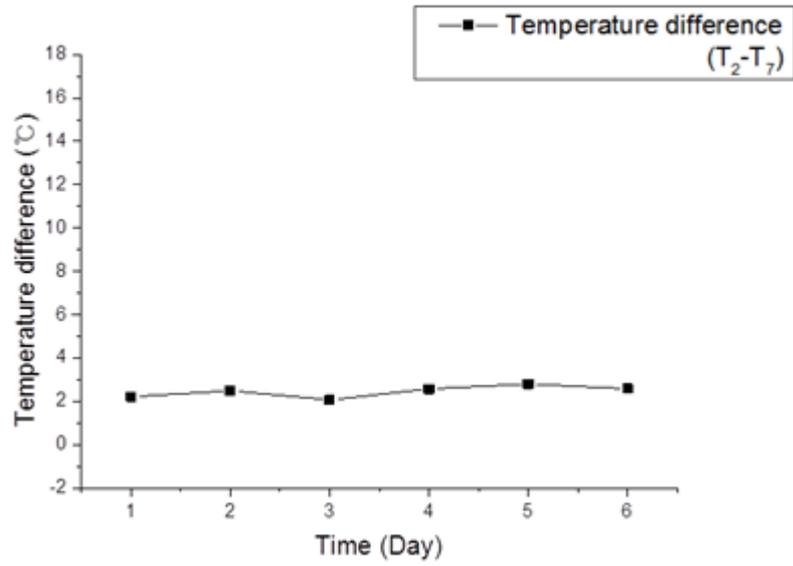


그림 3-145 일자별 전체 시스템의 온도차

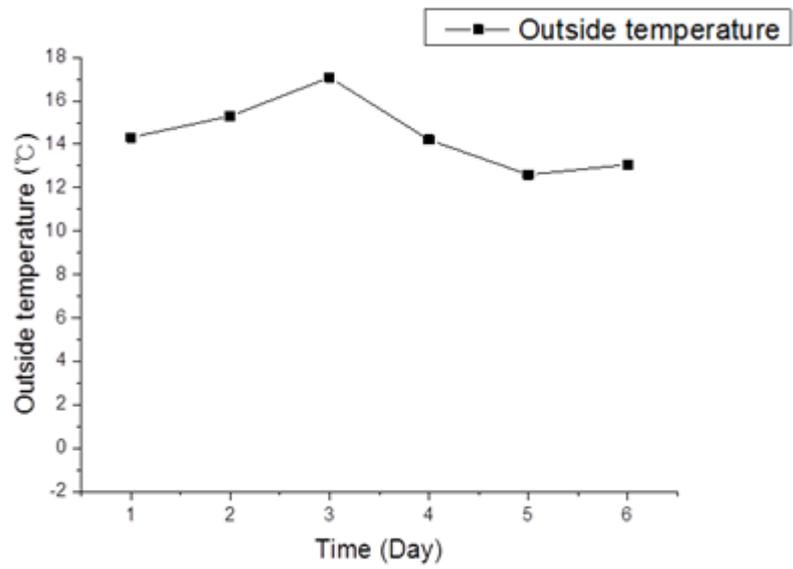


그림 3-146 일자별 온실 외기 온도

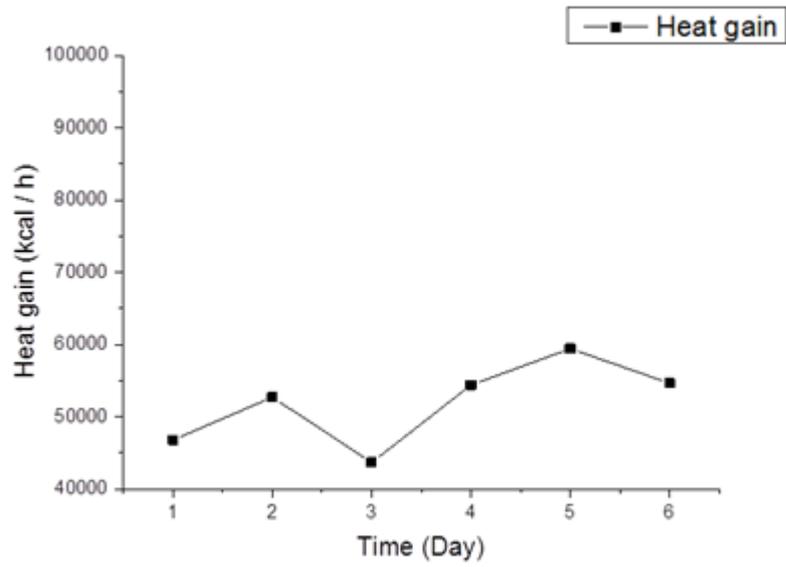


그림 3-147 일자별 전체 시스템의 취득 열량

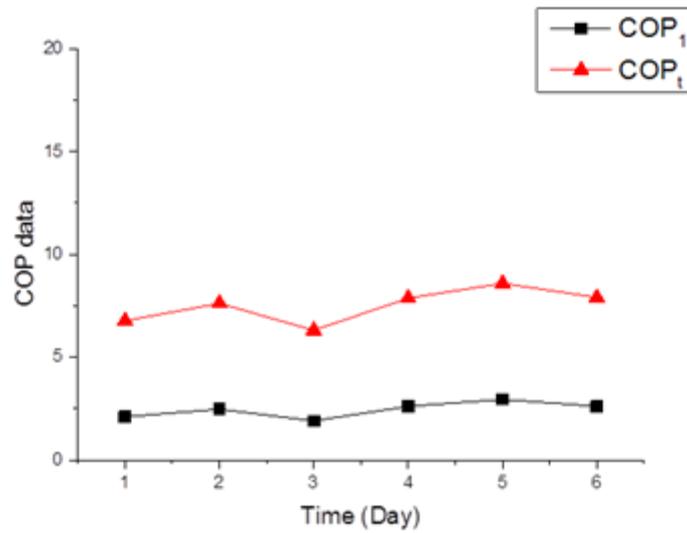


그림 3-148 일자별 COP 데이터

- 평균 취득 열량은 44,000~60,000 kcal/hr이며 전체 시스템 성능 계수는 7~8.5 정도를 기록하였음
- 외기 온도가 17°C, 온도차가 2.1°C일 경우에는 시스템 성능 계수인 COP_t의 값이 최소값 6.2를 기록하였음

3. 작물 생산성 평가 분석

- 사업규모 : 576 m²(심부지열 256 m², 경유난방 320 m²)
- 대상작물 : 정원장미(2년생 아접묘)
- 시험기간 : 2월 24일~4월 5일
- 시험장소 : 원예연구소 화훼종묘온실
- 조사항목 : 초장, 엽장, 경경, 신초수, 온도, 습도, 열량, 운영비분석 등

가. 심부지열난방시험 온·습도 조사

(1) 온실 온도 조사

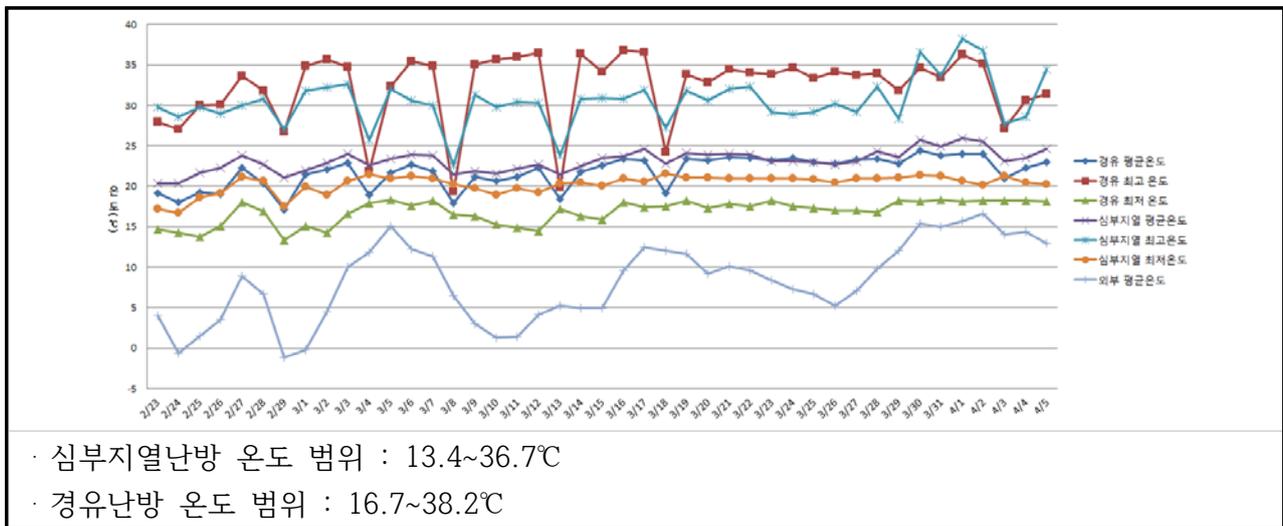


그림 3-149 심부지열, 경유난방 온실 온도 조사

(2) 온실 습도 조사

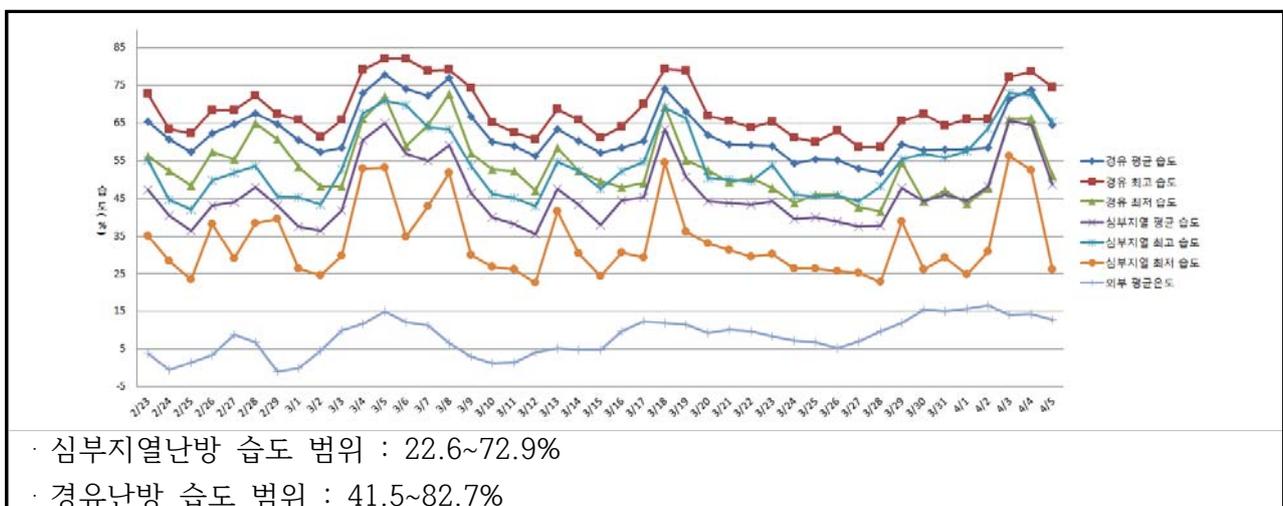


그림 3-150 심부지열, 경유난방 온실 습도 조사

(3) 1일 온실 온도조사

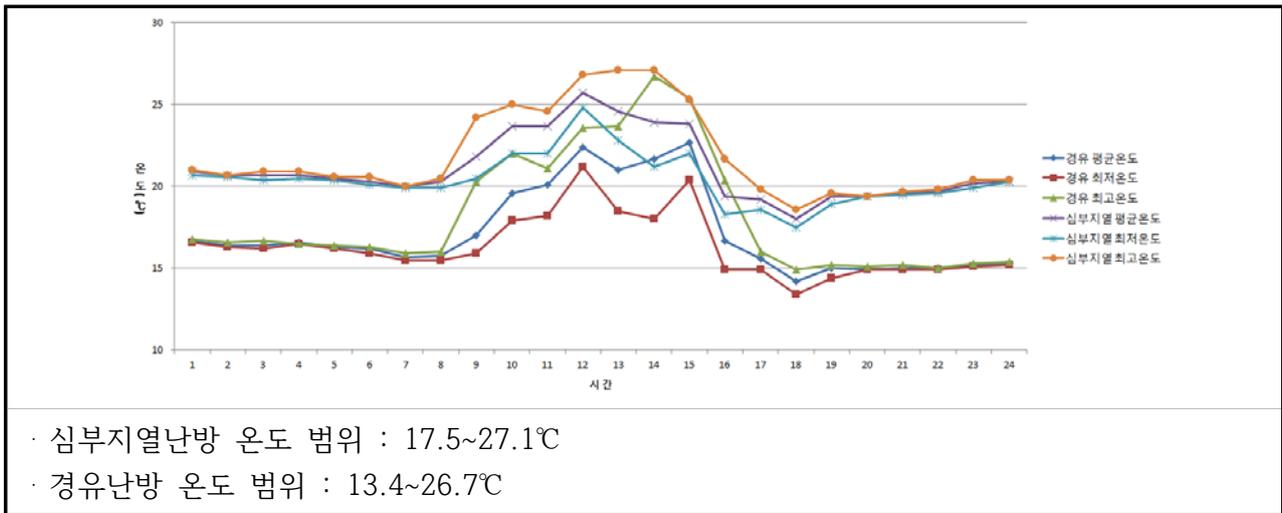


그림 3-151 심부지열, 경유난방 1일 온실 온도 조사(2/29)

(4) 1일 온실 습도조사

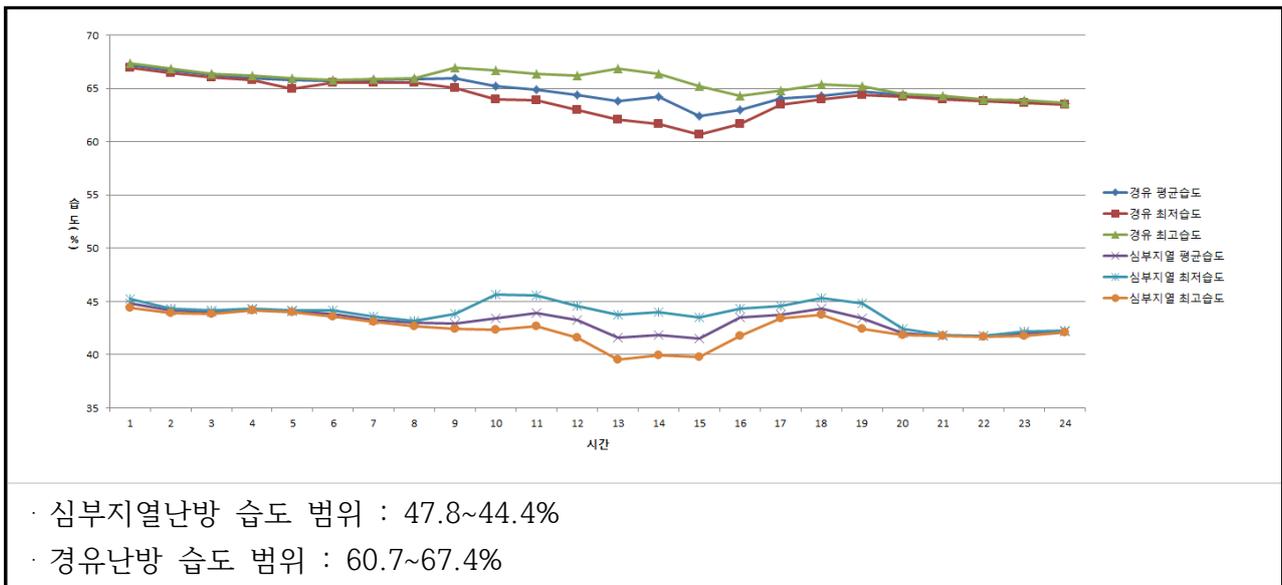


그림 3-152 심부지열, 경유난방 1일 온실 습도 조사(2/29)

나. 장미 묘 1차 원가지 생육특성

표 3-50 그랜드마치 품종의 생육

난방방법	조사일 (월.일)	초 장 (cm)	엽 장 (mm)	엽 폭 (mm)	경 경 (mm)	엽 수 (개)	신초수 (개)
경 유	2.25	26.9	11.0	7.7	3.2	7.4	1.5
	3.18	36.1	11.5	7.3	3.2	12.1	3.1
	4.05	36.2	11.9	8.1	3.1	11.9	3.5
심부지열	2.25	25.8	10.5	7.1	3.2	7.1	1.5
	3.18	32.9	11.1	7.2	3.1	9.7	3.1
	4.05	36.7	10.9	7.5	3.1	12.9	2.9

표 3-51 프린스가든 품종의 생육

난방방법	조사일 (월.일)	초 장 (cm)	엽 장 (mm)	엽 폭 (mm)	경 경 (mm)	엽 수 (개)	신초수 (개)
경 유	2.25	30.0	14.1	10.1	4.8	5.9	1.3
	3.18	42.6	12.8	8.5	4.6	16.9	1.6
	4.05	59.4	14.2	10.2	4.8	19.9	1.6
심부지열	2.25	30.0	14.7	9.6	4.8	5.9	1.8
	3.18	41.6	14.0	9.4	4.8	16.2	1.7
	4.05	50.7	11.6	8.5	4.8	18.9	1.7

다. 장미 묘 2차 신초 I 생육특성

표 3-52 그랜드마치 품종의 생육

난방방법	조사일 (월.일)	초 장 (cm)	엽 장 (mm)	엽 폭 (mm)	경 경 (mm)	엽 수 (개)	측지수 (개)
경 유	2.25	43.4	12.9	8.0	4.7	10.9	0.5
	3.18	67.4	14.4	9.2	4.5	15.3	2.3
	4.05	73.6	14.5	9.7	5.6	16.3	3.8
심부지열	2.25	38.3	11.4	7.6	4.7	10.8	1.1
	3.18	61.7	13.9	9.5	4.6	17.0	2.0
	4.05	68.7	13.9	10.2	5.7	18.3	4.4

표 3-53 프린스가든 품종의 생육

난방방법	조사일 (월.일)	초 장 (cm)	엽 장 (mm)	엽 폭 (mm)	경 경 (mm)	엽 수 (개)	측지수 (개)
경 유	2.25	19.8	10.7	6.6	5.8	8.2	0
	3.18	55.1	16.3	10.3	6.1	19.4	0
	4.05	90.5	18.6	12.3	6.2	26.2	0.9
심부지열	2.25	14.4	8.3	5.1	5.3	6.1	0
	3.18	64.2	16.0	10.4	5.4	22.5	0
	4.05	97.1	17.5	12.0	5.6	28.4	0.2

라. 장미 묘 2차 신초 II 생육특성

표 3-54 그랜드마치 품종의 생육

난방방법	조사일 (월.일)	초 장 (cm)	엽 장 (mm)	엽 폭 (mm)	경 경 (mm)	엽 수 (개)	측지수 (개)
경 유	2.25	32.1	11.3	6.5	3.9	10.0	1.0
	3.18	44.4	12.4	7.6	4.0	12.1	0.6
	4.05	58.7	13.3	8.4	4.8	14.5	2.4
심부지열	2.25	20.1	11.9	7.7	4.2	9.2	2.5
	3.18	42.4	12.0	7.4	4.0	12.7	2.3
	4.05	59.9	12.8	8.3	4.7	16.4	2.4

표 3-55 프린스가든 품종의 생육

난방방법	조사일 (월.일)	초 장 (cm)	엽 장 (mm)	엽 폭 (mm)	경 경 (mm)	엽 수 (개)	측지수 (개)
경 유	2.25	4.5	4.5	5.0	3.3	5.0	0
	3.18	24.5	12.6	7.6	3.8	11.9	0
	4.05	50.0	15.4	10.3	4.4	17.7	0
심부지열	2.25	8.7	7.6	4.6	4.5	5.6	0
	3.18	41.7	12.8	8.5	4.3	16.5	0
	4.05	64.0	14.6	11.1	4.4	21.8	0.2

마. 정원장미 생육상황 전경

표 3-56 정원장미 생육상황 전경

날 짜	심부지열난방	경유난방
2월 24일		
3월 18일		
4월 5일		

바. 결과 분석

- 시험 기간 중에 외부 평균 최저온도가 가장 낮은 기간은 2월 29일 -1.1°C 로 측정됨
- 경유, 심부지열 시험구간 최저온도는 심부지열 구간이 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 정도 경유난방에 비해 높은 경향이였으며 가장 온도가 낮았던 2월29일의 1일 시간대별 온도조사 결과 경유난방에 비해 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ 정도 높음
- 시험기간 중 온실 습도는 경유난방의 경우 최소 51.9%, 최대 77.1%의 습도를 보였고 심부 지열난방의 경우 최소 36.4%, 최대 65.7%로 나타났으며 일자별로 약 20%정도 경

유난방 구간이 습도가 높게 관리됨

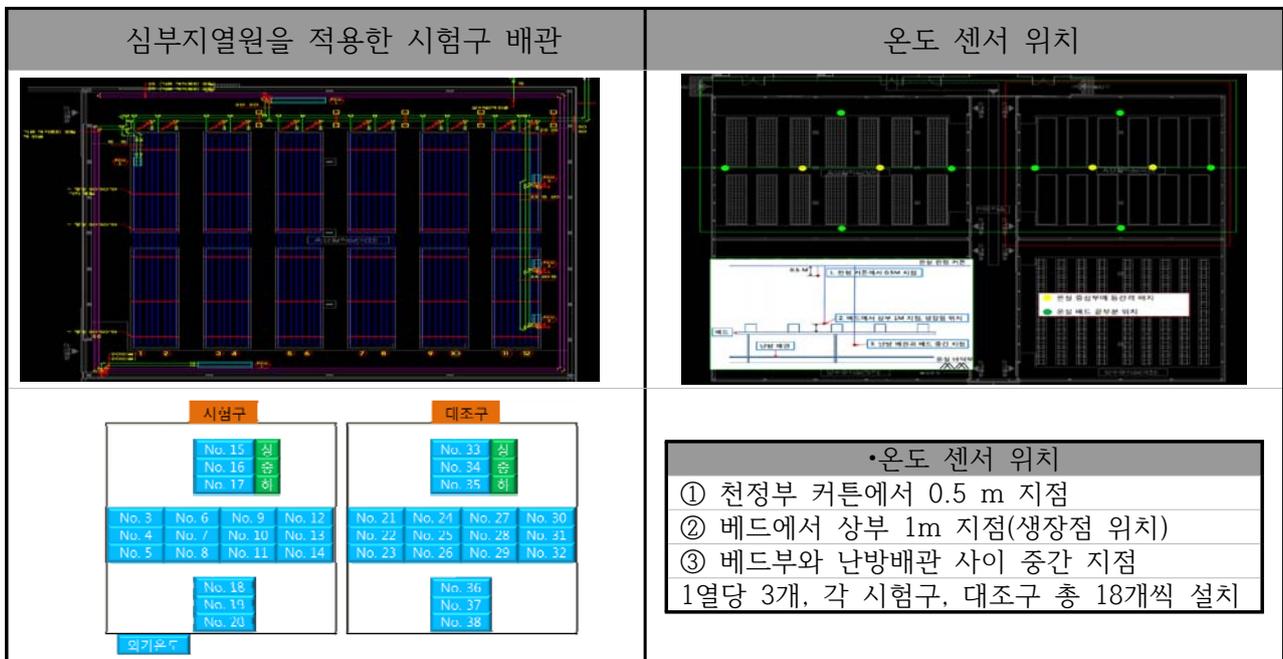
- 1차 접목부위에서 발생한 원가지 그랜드마치, 프린스가든의 초기 생육은 경유, 심부지열 난방구간 비슷하였고 최종 조사 시 그랜드마치 품종의 생육은 난방방법별로 생육에 큰 차이가 없었으나 신초 수는 경유난방이 3.5개로 심부지열 2.9개 보다 많았음
- 프린스가든 품종의 원가지 최종 생육은 경유난방이 초장, 엽장, 엽폭에서 낮은 경향이었으나 경경, 엽수, 신초 수는 비슷함
- 그랜드 마치 품종의 신초 1의 초기 생육은 경유난방구가 지열에 비해 약간 좋았으며 그 경향은 최종 조사에도 유사한 경향을 보임
- 프린스가든 품종의 신초 1의 초기 생육도 경유난방구가 지열에 비해 약간 좋은 경향이었고 최종 조사에서는 초장이 심부지열에 비해 좋았으며 다른 생육은 비슷함
- 신초 2의 초기 생육, 최종 생육도 신초 1의 생육상황과 유사함
- 난방구간과, 품종간에 생육조사한 결과 최저온도는 심부지열구간이 경유에 비해 2~3°C 정도 심부지열 구간이 높은 경향이었고 품종간 생육상황은 난방방법별로 큰 차이가 없어 정원장미 묘가 정상적으로 생육함

4. 심부지열 이용 온실 환경 및 난방비 절감효과 분석

가. 심부지열난방 온실 내 환경조사

(1) 심부지열 온실 난방 배관 및 온도 센서 설치

표 3-57 온실 난방 배관 및 온도 센서 설치



(2) 시험구(심부지열난방)와 대조구(경유난방) 온도 비교

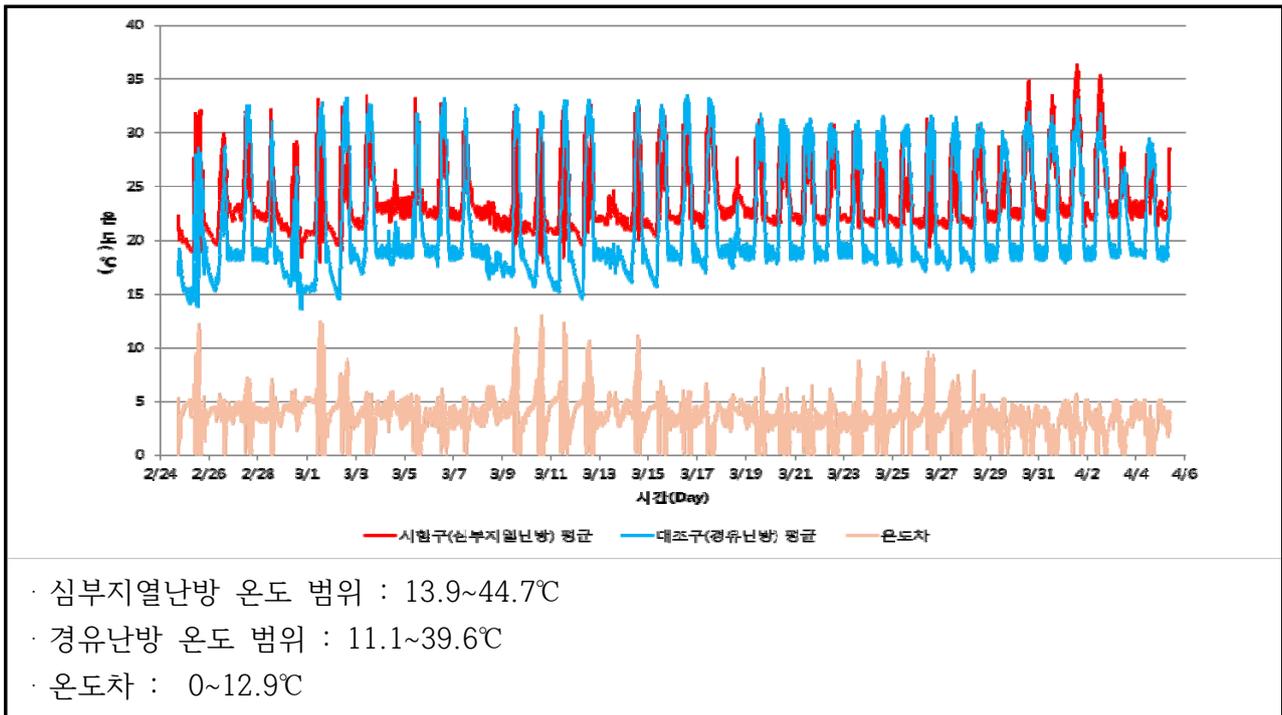


그림 3-153 유리온실 온도변화 비교(2016년 2월 24일~4월 5일)

(3) 야간 유리온실 온도 분포

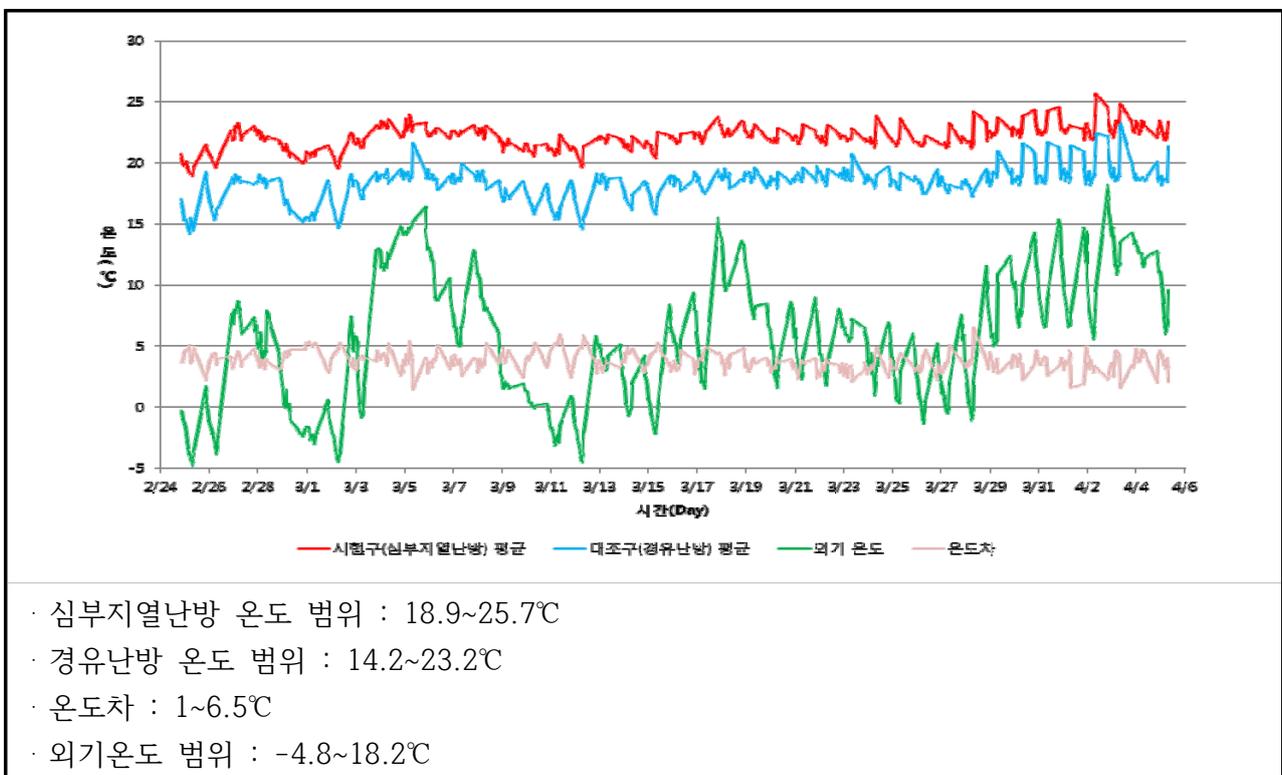


그림 3-154 야간(20~08시) 유리온실 온도 분포

(4) 야간 시험구(심부지열난방) 온실 평균 온도

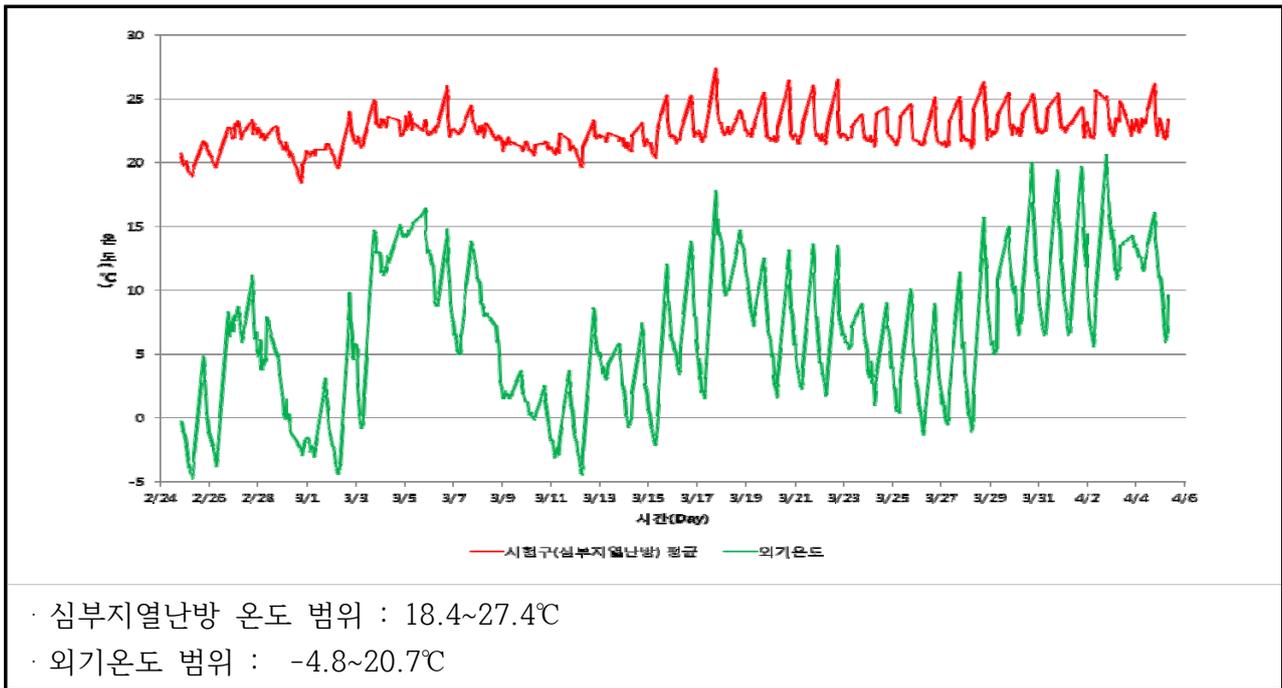


그림 3-155 야간(18시~08시) 시험구(심부지열난방) 온실 평균 온도 분포

(5) 야간 대조구(경유난방) 온실 평균 온도

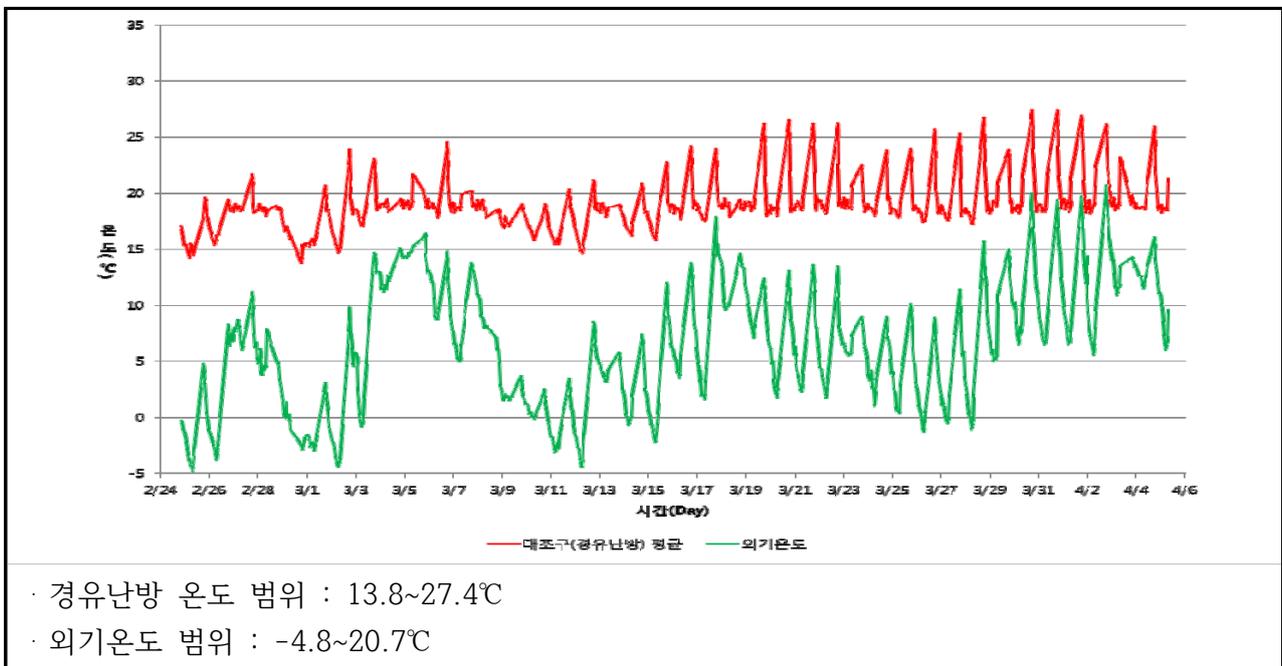


그림 3-156 야간(18시~08시) 대조구(경유난방) 평균 온도 분포

(6) 야간 시험구(심부지열난방) 온실 대표 센서 온도

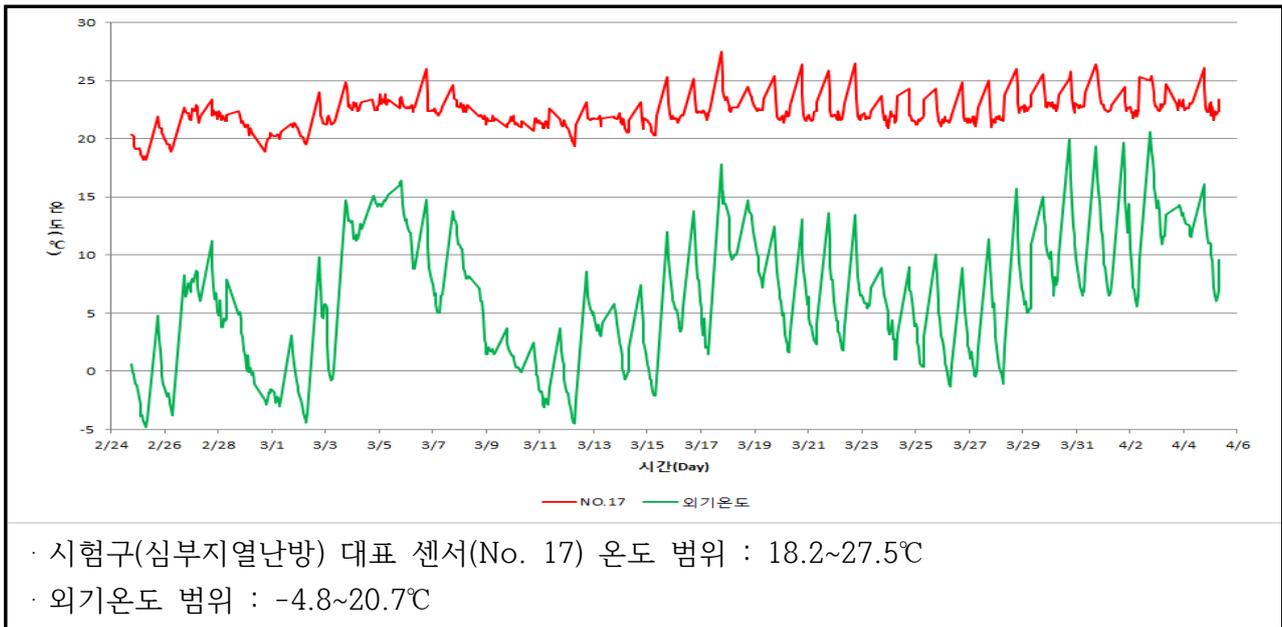


그림 3-157 야간(18시~08시) 시험구(심부지열난방) 온실 대표 센서(No. 17) 온도 분포

(7) 야간 대조구(경유난방) 온실 대표 센서 온도

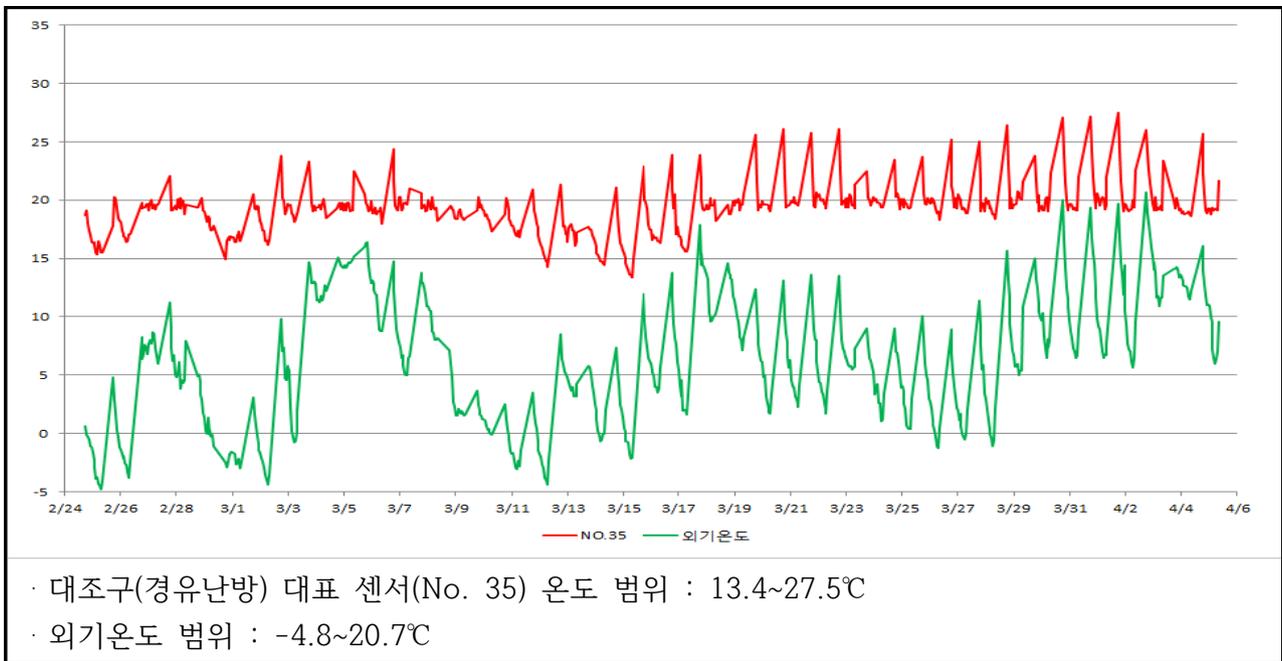


그림 3-158 야간(18시~08시) 대조구(경유난방) 온실 대표 센서(No. 35) 온도 분포

(8) 외기 최저온도 최저기온 시 온도 조사

표 3-58 외기 최저온도 최저기온 시 온도 조사

날 짜	최저외기온도(℃)	시험구(℃)	대조구(℃)	온도차(℃)
2/24	-4.2℃	17.7~18.7℃	14.4~15.7℃	3.2℃
2/25	-5.5℃	17.4~18.6℃	13.8~14.9℃	3.7℃
3/1	-3.8℃	19.~019.4℃	14.4~15.5℃	4.3℃

(9) 난방방법별 유리온실 온도 조사

표 3-59 난방방법별 유리온실 온도 조사

항 목	시험구(℃)	대조구(℃)	온도차
전체온도	13.9~44.7℃	11.1~39.6℃	2.8~5.1℃
평균온도	17.8~36.3℃	13.6~33.5℃	2.8~4.2℃
야간 전체온도	16.5~28.1℃	12.1~31.2℃	3.1~4.4℃
야간 평균온도	18.41~27.4℃	13.8~27.4℃	0~4.6℃
외기온도	-5~26.6℃		

나. 난방비 절감효과 분석

(1) 온실 일별 유류 소비량

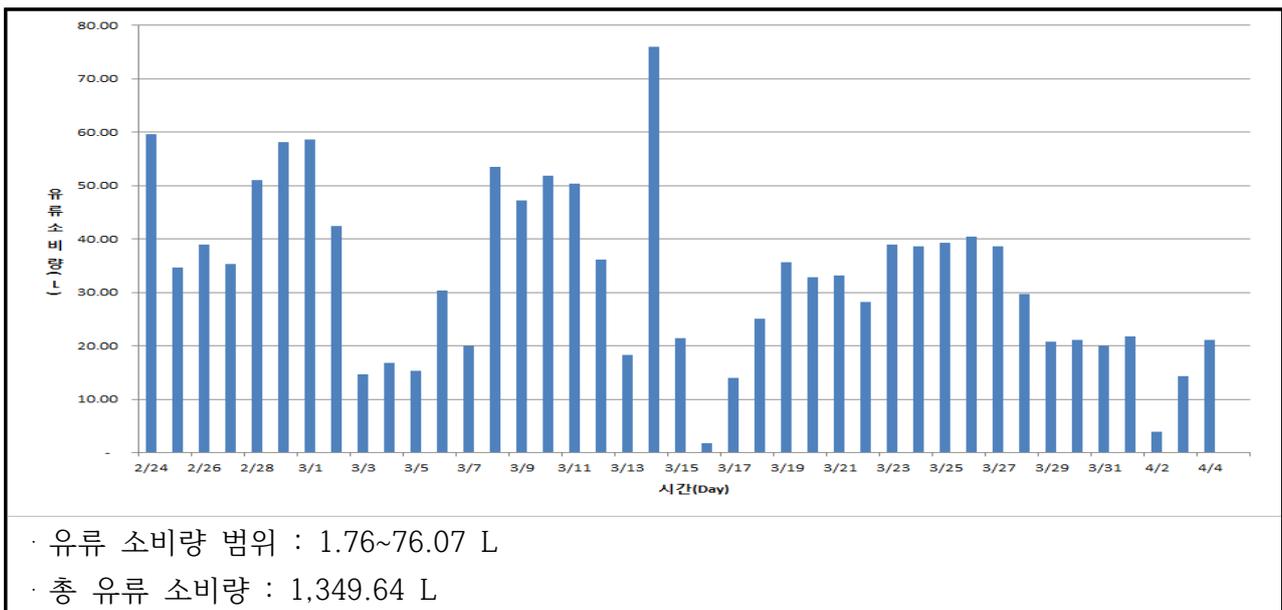


그림 3-159 유리온실 대조구 일별 유류 소비량

(2) 에너지 비용 산출 결과

표 3-60 에너지 비용 산출 결과

시험구(심부지열난방)			대조구(경유난방)	
항 목	순환펌프	수중펌프	항 목	보일러
소비전력(시간당)	0.75 kW	7.5 kW	총 유류 소비량(L)	1,349.64 L
1일 소비전력(kW)	18 kW	180 kW	L당 유류 가격(원)	1,300원
총 소비전력(kW)	756 kW	7,560 kW	총 비용(원)	1,754,532원
단위요금(kW/원)	40원	40원		
비용(원)	30,240원	302,400원		
총 비용(원)	332,640원			

(3) 시험기간 1일 열량

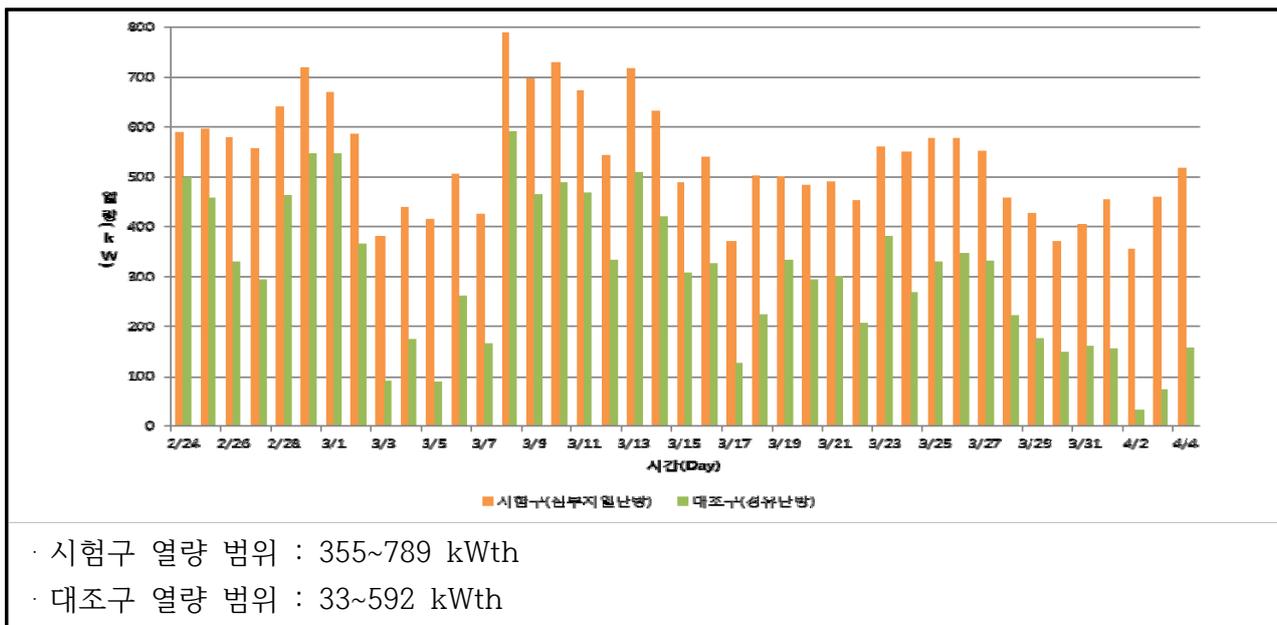


그림 3-160 유리온실 시험구와 대조구 1일 열량

(4) 취득열량

표 3-61 온도차에 의한 취득열량

온도차(°C)	취득열량(kW/hr)
1°C	14.6 kW/hr
5°C	73.3 kW/hr
10°C	146.51 kW/hr
15°C	219.77 kW/hr
20°C	293.02 kW/hr

다. 결과 분석

- 외기온도가 낮아지는 야간에서 아침(20시~08시) 사이의 유리온실 온도 변화를 분석결과 심부지열원을 적용한 시험구의 경우 18.9~25.7℃ 범위를 보이며, 난방을 적용한 대조구의 경우 14.2~23.2℃ 범위를 보임
- 시험구(심부지열난방)과 대조구(경유난방)의 온도차이는 최소 1.5℃에서 최대 6.5℃를 보이며, 평균적으로 3.8℃ 차이를 보이며 시험구의 온도분포 범위가 대조구의 온도분포 범위를 포함하므로 심부지열원을 이용한 난방을 유리온실에 적용 가능할 것으로 사료됨
- 시험시간(42일) 총 대조구(경유난방) 유류 소비량은 1,349 L였으며 난방비용은 시험구(심부지열난방)가 332,640원, 대조구(경유난방)가 1,754,532원으로 계산됨
- 심부지열원 적용 시 경유난방에 비해 5배 이상 운영비용이 절감됨을 확인함
- 열량 산출 결과 시험구(21,970 kW)의 열량이 대조구(12,456 kW)보다 9,514 kW 열량을 방출하였고 1차 시추공이기 때문에 단열 시공을 적용하지 않음
- 현재 데이터 취득 결과를 바탕으로 「단열시공」을 수행할 경우 2 km 시추 시 발생 가능한 최고 온도는 46℃로 추정되며, 평균 유량이 12.6 ton/hr일 경우 취득열 부분의 경우 온도차가 5℃ 일 경우 취득열량은 73.3 kW/hr, 20℃일 때 293 kW/hr 열량 일 것으로 판단됨

5. 과채류 시설원에 농가 적용성 고찰

- 본 연구에서는 시추공 위치 및 최적의 심부지열 이용 난방을 고려하여 전라남도 농업기술원 내 화훼종묘보급센터를 시험대상 온실로 선정하여 연구를 수행함

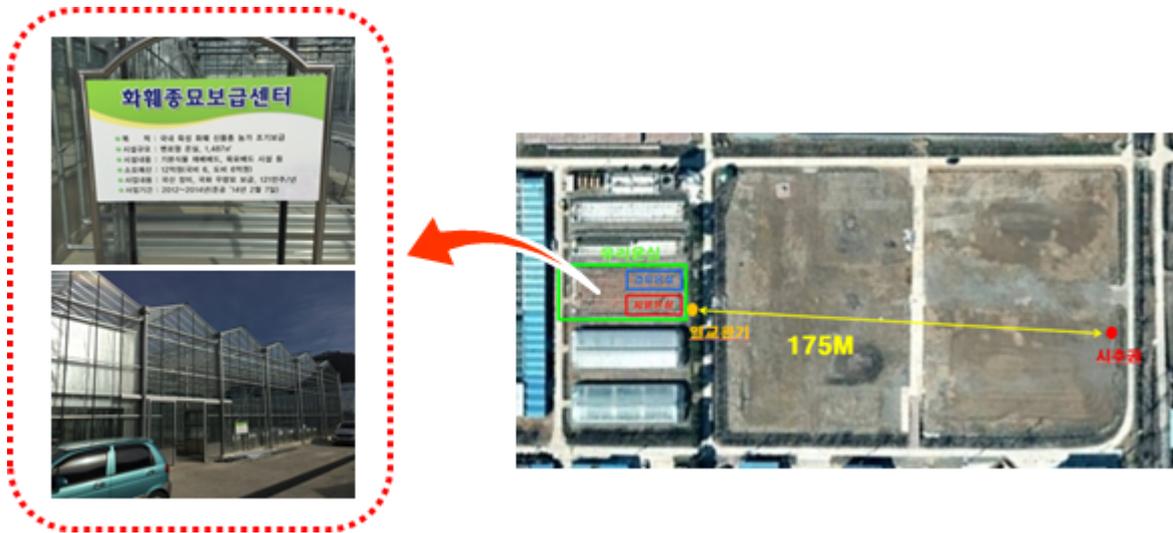


그림 3-161 시추공 및 시설원에 위치

- 금회 화훼 연구 과정 및 결과를 바탕으로 과채류(딸기, 토마토, 오이, 멜론)에 대한 필요 열량 및 시추비, 난방비를 산출하여 경제성 분석을 수행함

가. 작물별 필요 열량

- 재배작물(딸기, 토마토, 오이, 멜론)에 대하여 생육온도 조건 중 야간 시 난방에 필요한 「야간설정온도」를 적용하여 평형대별 열량(kW/hr)을 산출함
- 작물별 재배 온도 조건(딸기, 토마토, 오이, 멜론)은 다음과 같음

표 3-62 작물별 재배 온도 조건³²⁾

작 물	최저한계온도 (°C)	생육적온 (°C)	최고한계온도 (°C)	야간설정온도 (°C)
딸 기	-2	17~20	30	10
토 마 토	5	20~25	35	12
오 이	8	23~28	35	16
멜 론	18	25~30	40	20

32) 농촌진흥청, '시설원에 에너지절감 기술', 2012

- 이를 바탕으로 시설원에 타입을 고려하여 「유리온실」과 「비닐온실」의 2가지 타입으로 구분하고 각각의 적용되는 온실에 대하여 평형대 별로 「3,000평, 4,000평, 5,000평, 6,000평, 8,000평, 10,000평」의 6가지 평형대 별로 구분하여 열량(kW/hr)를 산출하였으며, 산출결과 유리온실의 경우 1,038~4,744 kW/hr, 비닐온실의 경우 956~4,371 kW/hr의 필요 열량을 산출함

표 3-63 유리온실 평형대에 따른 필요 열량 산출

온실조건	작 물	3,000평 (kW/hr)	4,000평 (kW/hr)	5,000평 (kW/hr)	6,000평 (kW/hr)	8,000평 (kW/hr)	10,000평 (kW/hr)
유리온실	딸 기	1,038	1,374	1,710	2,004	2,676	3,349
	토마토	1,125	1,489	1,853	2,171	2,899	3,628
	오 이	1,298	1,718	2,138	2,505	3,346	4,186
	멜 론	1,471	1,947	2,423	2,839	3,792	4,744
비닐온실	딸 기	956	1,246	1,569	1,859	2,472	3,085
	토마토	1,035	1,350	1,699	2,014	2,678	3,342
	오 이	1,195	1,558	1,961	2,324	3,090	3,857
	멜 론	1,354	1,765	2,222	2,634	3,502	4,371

나. 시공비 산출

- 2가지 타입(유리온실 & 비닐온실)과 평형대별(3000평~10000평) 6가지 타입에 대하여 시공비 비교를 위하여 천부지열과 심부지열의 시추비 및 지중열교환기 설치비를 포함하는 전반적인 시공비를 산정함
- 유리온실 천부지열의 경우 1,700,000(딸기, 3,000평)~7,770,000(멜론, 10,000평)천원으로 산출되었으며, 심부지열의 경우 2,035,000(딸기, 3,000평)~9,300,000(멜론, 10,000평)천원으로 산출됨
- 비닐온실 천부지열의 경우 1,565,000(딸기, 3,000평)~7,159,000(멜론, 10,000평)천원으로 산출되었으며, 심부지열의 경우 1,874,000(딸기, 3,000평)~8,568,000(멜론, 10,000평)천원으로 산출됨

표 3-64 난방 방법에 따른 평형대별 시공비

난방방법	작 물	3,000평 (천원)	4,000평 (천원)	5,000평 (천원)	6,000평 (천원)	8,000평 (천원)	10,000평 (천원)
천부지열	딸 기	1,565,000	2,041,000	2,570,00	3,045,000	4,049,000	5,054,000
	토마토	1,696,000	2,211,000	2,784,000	3,299,000	4,387,000	5,475,000
	오 이	1,957,000	2,551,000	3,212,000	3,807,000	5,062,000	6,317,000
	멜 론	2,218,000	2,892,000	3,640,000	4,314,000	5,737,000	7,159,000
심부지열	딸 기	1,874,000	2,443,00	3,075,000	3,645,000	4,846,000	6,048,000
	토마토	2,030,000	2,646,000	3,332,000	3,948,000	5,250,000	6,552,000
	오 이	2,342,000	3,054,000	3,844,000	4,556,000	6,058,000	7,560,000
	멜 론	2,654,000	3,461,000	4,357,000	5,163,000	6,866,000	8,568,000

다. 난방비산출

- 천부지열의 경우 히트펌프시스템에 대한 농가의 실질적 조사결과 평균 면적대비 전기요금(원/m²)인 6,000원/m²을 적용하였으며, 심부지열의 경우 연평균 가동시간 4,100(170일)시간과 50원/kW의 전기 요금을 적용하여 평형대별 난방비를 산출하였으며, 산출결과 유리온실 천부지열의 경우 53,600(딸기, 3,000평)~244,800(멜론, 10,000평)천원으로 산출되었으며, 심부지열의 경우 8,900(딸기, 3,000평)~37,600(멜론, 10,000평)천원으로 산출됨
- 비닐온실 천부지열의 경우 49,300(딸기, 3,000평)~225,500(멜론, 10,000평)천원으로 산출되었으며, 심부지열의 경우 8,200(딸기, 3,000평)~40,800(멜론, 10,000평)천원으로 산출됨

표 3-65 난방방법에 따른 평형대별 난방비

온실조건	난방방법	작 물	3,000평 (천원)	4,000평 (천원)	5,000평 (천원)	6,000평 (천원)	8,000평 (천원)	10,000평 (천원)
유리온실	천부지열	딸 기	53,600	70,900	88,200	103,400	138,100	172,800
		토마토	58,000	76,800	95,600	112,000	149,600	187,200
		오 이	67,000	88,600	110,300	129,300	172,600	216,000
		멜 론	75,900	100,500	125,000	146,500	195,600	244,800
	심부지열	딸 기	8,900	11,800	14,700	17,200	23,000	28,800
		토마토	9,700	12,800	15,900	18,700	24,900	31,200
		오 이	11,200	14,800	18,400	21,500	28,800	36,000
		멜 론	12,600	16,700	20,800	24,400	32,600	40,800
비닐온실	천부지열	딸 기	49,300	64,300	80,900	95,900	127,600	159,200
		토마토	53,400	69,700	87,700	103,900	138,200	172,500
		오 이	61,600	80,400	101,200	119,900	159,500	199,000
		멜 론	69,900	91,100	114,700	135,900	180,700	225,500
	심부지열	딸 기	8,200	10,700	13,500	16,000	21,300	26,500
		토마토	8,900	11,600	14,600	17,300	23,000	28,700
		오 이	10,300	13,400	16,900	20,000	26,600	33,200
		멜 론	11,600	15,200	19,100	22,700	30,100	37,600

라. 경제성 평가

- 상기 산출 과정 (1), (2), (3)을 기준으로 작물별 가장 높은 시공비와 연간난방비를 보이는 멜론에 대하여 사용년수에 따른 초기투자비 회수기간 산정을 통한 경제성 평가를 실시함
- 초기투자비 회수기간 산정 방법은 심부지열난방과 천부지열난방의 시공비 차이를 초기투자비 차액으로 산정하고 심부지열난방과 천부지열난방의 연간 운영비 차액을 누적하여

누적된 운영비 차액이 초기투자비 차액을 초과할 시점을 초기투자비 회수기간으로 선정함

- 경제성 분석 결과 천부지열 대비 심부지열 초기투자비 회수기간이 7.5년으로 산출됨

표 3-66 평형대별 경제성 분석

평형대	시공비(천원)		연간난방비(천원)		⑤시공비 차액(천원) (②-①)	⑥난방비 차액(천원) (③-④)	회수기간 (년) (⑤/⑥)
	①천부지열	②심부지열	③천부지열	④심부지열			
3,000평	2,409,000	2,883,000	75,900	12,600	474,000	63,300	7.5
4,000평	3,189,000	3,816,000	100,500	16,700	627,000	83,800	7.5
5,000평	3,969,000	4,750,000	125,000	20,800	781,000	104,200	7.5
6,000평	4,651,000	5,566,000	146,500	24,400	915,000	122,100	7.5
8,000평	6,211,000	7,433,000	195,600	32,600	1,222,000	163,000	7.5
10,000평	7,770,000	9,300,000	244,800	40,800	1,530,000	204,000	7.5

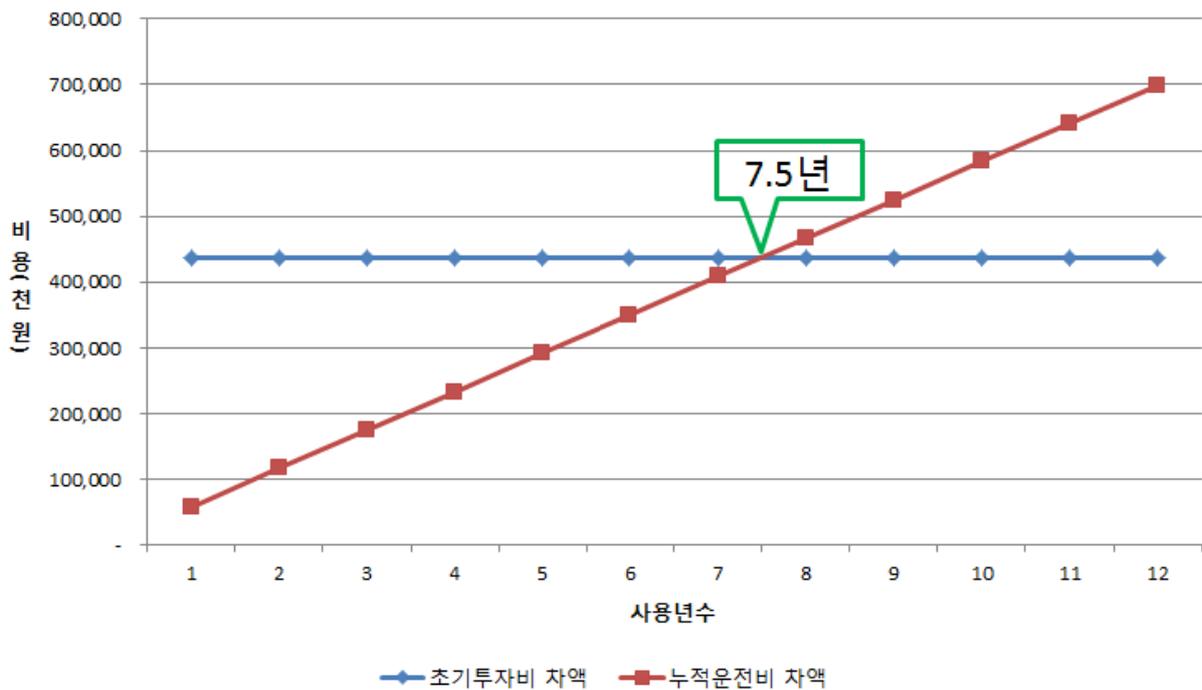


그림 3-162 3,000평 경제성 분석

6. 온실가스 감축효과 비교 분석

- 온실가스 감축효과 비교 분석을 위하여 작물 생산성 평가 시험기간인 2016년 2월 24일 ~ 4월 5일(총 42일) 동안 사용된 「심부지열 난방 적용 온실의 전력 사용량(kW)」과 「경유난방 적용 온실의 경유 사용량(L) 및 순환펌프 사용량(kW)」을 이용하여 이산화탄소 배출량을 분석하여 온실가스 배출량을 비교 분석함

가. 적용 공식

- 온실가스 중 하나인 이산화탄소(CO₂) 배출량을 분석하기 위하여 「심부지열난방」과 「경유난방」에 적용된 공식은 다음과 같음

(1) 심부지열 난방 적용 온실 이산화탄소 배출량

- 전기 이산화탄소 배출량(ton CO₂) = 전력 사용량 x 이산화탄소 배출 계수

(2) 경유 난방 적용 온실 이산화탄소 배출량³³⁾

- 전기 이산화탄소 배출량(ton CO₂) = 전력 사용량 x 이산화탄소 배출 계수
- 화석연료 이산화탄소 배출량(ton CO₂) = 해당연료의 TOE(총발열량/10⁷) x 탄소배출계수 x 44/12(CO₂ 환산계수)

나. 이산화탄소 배출량 산정

- 상기 공식을 적용한 이산화탄소 배출량 산정 계산 과정은 다음과 같음

(1) 총 전력 사용량(kW) 및 유류 소비량(L) 산정

- 심부지열 전력 사용량
 - 순환펌프와 수증펌프에 사용된 총 전력 사용량(8,316 kW)
: 순환펌프 756 kW, 수증펌프 7,560 kW
- 경유난방 온실 총 유류 소비량 및 전력 사용량
 - 유류 소비량 : 1349.64 L
 - 전력 사용량 : 756 kW

(2) 적용 계수

- 경유 총 발열량 산출
 - 환경부 「공공부문 온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침³⁴⁾」에 따라 9,050

33) 최선미, '지열원 열펌프 시스템의 에너지 절감 및 온실 가스 저감 효과에 관한 연구' 한양대학교, 석사학위, pp. 40-42, 2008.8.

34) 환경부, '공공부문 온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침', 2013.

kcal/ℓ 적용

연료별 발열량

연료명	단위	총발열량	순발열량	에너지원	총발열량			석유환산		
					제품	단위	표준단위(Kcal)	동 MJ 환산	단위	환산계수
원유	MJ/kg	45.0		석유	원유	kg	10,750	45.0	kg/kg	1.075
휘발유	MJ/ℓ	33.5		석유	휘발유	ℓ	8,000	33.5	kg/ℓ	0.800
실내등유	MJ/ℓ	36.8		석유	실내등유	ℓ	8,800	36.8	kg/ℓ	0.880
보일러등유	MJ/ℓ	37.5		석유	보일러등유	ℓ	8,550	37.5	kg/ℓ	0.855
경유	MJ/ℓ	37.9		석유	경유	ℓ	9,050	37.9	kg/ℓ	0.905
B-A유	MJ/ℓ	38.9		석유	B-A유	ℓ	9,300	38.9	kg/ℓ	0.930
B-B유	MJ/ℓ	40.4		석유	B-B유	ℓ	9,650	40.4	kg/ℓ	0.965
B-C유	MJ/ℓ	41.4		석유	B-C유	ℓ	9,900	41.4	kg/ℓ	0.990
프로판	MJ/kg	50.4		석유	프로판	kg	12,090	50.4	kg/kg	1.205
부탄	MJ/kg	49.6		석유	부탄	kg	11,850	49.6	kg/kg	1.185
나프타	MJ/ℓ	33.7		석유	나프타	ℓ	8,050	33.7	kg/ℓ	0.805
용제	MJ/ℓ	33.3	30.8	석유	용제	ℓ	7,950	33.3	kg/ℓ	0.795
항공유	MJ/ℓ	36.6	34.3	석유	항공유	ℓ	8,750	36.6	kg/ℓ	0.875
아스팔트	MJ/kg	41.4	39.1	석유	아스팔트	kg	9,900	41.4	kg/kg	0.990
윤활유	MJ/ℓ	38.7	36.2	석유	윤활유	ℓ	9,250	38.7	kg/ℓ	0.925
석유코크	MJ/kg	33.9	32.9	석유	석유코크	kg	8,100	33.9	kg/kg	0.810
부생연료1호	MJ/ℓ	37.0	35.0	석유	부생연료1호	ℓ	7,000	29.3	kg/ℓ	0.700
부생연료2호	MJ/ℓ	40.6	38.5	석유	부생연료2호	ℓ	8,850	37.0	kg/ℓ	0.885
천연가스(LNG)	MJ/kg	54.5	49.2	천연가스	천연가스	kg	9,700	40.6	kg/ℓ	0.970
도시가스(LNG)	MJ/m ³	44.2	40	천연가스	도시가스	m ³				
도시가스(LPG)	MJ/m ³	62.8	57.8	천연가스	도시가스	m ³				

그림 3-163 경유 총 발열량

- 경유 총 발열량 계산

총 발열량 = 1,350 x 9,050 = 12,217,500 kcal

○ 전기 이산화탄소배출계수 및 경유 탄소배출계수

- 전기 이산화탄소배출계수

; 환경부 「탄소포인트제 운영에 관한 규정³⁵⁾」에 따라 0.424 kg CO₂/KWh 적용

- 경유 탄소배출계수

; IPCC(Intergovernmental panel on climate change)에서 제시한 값인 0.837 Ton C/TOE를 이용함³⁶⁾

(3) 최종 이산화탄소 배출량 산정

○ 심부지열 난방

- 전기 이산화탄소 배출량(ton CO₂) = 전력 사용량 x 이산화탄소 배출 계수
 = 8,316 x 0.424 ÷ 1,000
 = 3.53 ton CO₂

35) 환경부, '탄소포인트제 운영에 관한 규정', 2009.

36) 한국에너지기술연구원, 'IPCC 탄소 배출 계수', 2016.

○ 경유 난방

- 전기 이산화탄소 배출량(ton CO₂) = 전력 사용량 x 이산화탄소 배출 계수
 = 756 x 0.424 ÷ 1,000
 = 0.32 ton CO₂

- 화석연료 이산화탄소 배출량(ton CO₂) = 해당연료의 TOE(총발열량/10⁷) x 탄소배출계수
 x 44/12(CO₂ 환산계수)
 = 12,217,500/10⁷ x 0.837 x 44/12
 = 3.75 ton CO₂

- 경유난방 총 이산화탄소 배출량 = 0.32 + 3.75 = 4.07 ton CO₂

다. 온실가스 배출량 분석

- 이산화탄소 배출량 산출 결과 심부지열 난방을 적용한 온실에서는 3.53 ton의 이산화탄소가 배출되었으며, 경유 난방을 적용한 온실에서는 4.07 ton의 이산화탄소가 배출되었음. 검토 결과 심부지열 난방을 적용한 온실이 경유 난방을 적용한 온실에 비해 약 13%의 이산화탄소 저감됨을 알 수 있음

라. 평형대별 이산화탄소 배출량 검토

- 시설원예의 평형대별 이산화탄소 배출량 비교를 위하여 100평(330 m²), 500평(1,652 m²), 1,000평(3,305 m²) 기준으로 심부지열 난방과 경유 난방의 이산화탄소 배출량을 다음과 같이 산정함
- 심부지열 난방의 경우 평형이 증가함에 따라 100평 (순환펌프 1개), 500평 (순환펌프 2개), 1,000평 (순환펌프 4개)에 대하여 전력 사용량을 산정함
- 경유 난방의 경우 평형이 증가함에 따라 100평 (순환펌프 1개), 500평 (순환펌프 2개), 1,000평 (순환펌프 4개)에 대하여 전력 사용량을 산정하였으며, 100평 1350 L 경유 소비량을 이용하여 비례식으로 500평 6750 L, 1,000평 13500 L 경유 소비량을 산정함

표 3-67 심부지열난방 및 경유난방 평형대별 전력 사용량 및 경유 소비량

구 분		100평(330 m ²)	500평(1,652 m ²)	1,000평(3,305 m ²)
심부지열난방	전력 사용량(kW)	8,316 kW	9,072 kW	10,584 kW
	경유 소비량(L)	1,350 L	6,750 L	13,500 L

- 표 3-67을 바탕으로 다음과 같이 이산화탄소 배출량을 산정함

표 3-68 평형대별 이산화탄소 배출량

구 분	100평(330 m ²)	500평(1,652 m ²)	1,000평(3,305 m ²)
심부지열 난방	3.53 ton	3.85 ton	4.49 ton
경유 난방	4.07 ton	19.39 ton	38.78 ton
저감율	13%	80%	88%

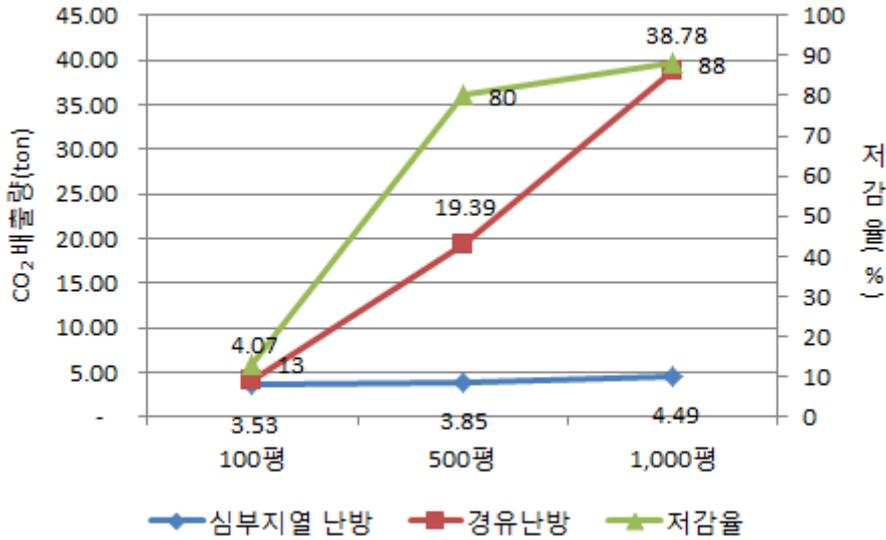


그림 3-164 평형대별 CO₂ 배출량 비교

- 심부지열 난방의 경우 평형대 변화(100평→1,000평)에 따라 이산화탄소의 배출량(3.53→4.49 ton)의 변화폭이 크지 않는 반면, 경유 난방의 경우 평형대 변화(100평→1,000평)에 따라 이산화탄소의 배출량(4.07→38.78 ton)이 급속하게 증가하는 경향을 나타냄
- 종합 검토 결과 경유 난방 대비 심부지열 난방의 이산화탄소 저감율은 평형 증가(100평→1,000평)에 따라 13%→88%로 효과가 크게 나타남을 알 수 있음

제 7절 시스템 표준화 및 정책 제안

1. 사업모델과 경제성분석

가. 심부지열 사업모델

(1) 모델의 설정방법

- 실험현장에 지중깊이 2,002 m 시추한 시추공에서 얻을 수 있는 심부지열 열량은 장기적인 모니터링과 유속제어, 온도차 등에 대한 실험분석을 통하여, 일정 조건에서는 170,000 kcal/hr로 나타났음
- 취득 가능한 열량을 기준으로 하여 전남지역에서 난방 가능한 유리온실의 면적은 1,700 m²로 산정되었음
- 따라서 2,000 m 시추공의 가능 난방면적 1,700 m²에 대하여 소규모 모델로 설정하였으며, 시추깊이를 기준으로 3,000 m 시추공은 중규모 모델, 4,000 m 시추공은 대규모 모델로 설정하였음
- 심부지열의 시추 깊이별 사업비는 시추와 지중열교환기 설치한 (주)한진디엔비에서 전남 농업기술원 연구 현장을 기준으로 산출하여 제시한 금액이며, 추후 다른 사업에서의 적용은 지역, 지형, 작업의 난이도 등을 고려한 할증을 고려할 필요가 있음

(2) 규모별 및 사업비

- 시추 깊이와 이용열량 등을 고려한 규모별 모델을 설정하여 표준으로 제시된 사업비를 기준으로 적용하였음

표 3-69 심부지열 규모와 사업비

모 델	시추깊이(m)	난방면적(m ²) [평]	사업비 (백만원)
소규모	2,000	1,700 [515]	850
중규모	3,000	6,217 [1,900]	1,458
대규모	4,000	13,421 [4,000]	2,187

(가) 소규모 모델

- 시추깊이(사업비) : 2,000 m (850백만원)
- 최하부 공내수 온도 : 55.3°C (측정온도)
- 실험 중 생산정/주입정 물 온도 : 37.4°C/23.9°C (측정온도)
- 관로 물 유량 : 12.6 m³/hr (측정유량)
- 취득 난방열량 : 198 kW (170,100 kcal/hr)
- 시추 실험지역 동절기 대표외기 기온 -6.4°C³⁷⁾에 의한 운영 가능한 재배온실의 난방면적 : 1,700 m² (515평)

37) 류연수, '월에서설의 보일러와 지열난방시스템 부하분담에 관한 연구', 농어촌연구원, pp. 54, 2012.12.

(나) 중규모 모델

- 시추깊이 (사업비) : 3,000 m (1,458백만원)
- 최하부 공내수 온도 : 76.95°C (2,000 m 측정기준으로 추정 산출온도)
- 생산정/주입정 물 온도 : 56.95°C/23.9°C (실험 참고치 추정산출)
- 관로 물 유량 : 18.9 m³/hr (2,000 m 펌프규격의 1.5배 적용)
- 취득 난방열량 : 725 kW (624,645 kcal/hr)
- 시추 실험지역 대표외기 기온 -6.4°C에 의한 운영 가능 재배온실의 난방면적 : 6,217 m² (1900평)

(다) 대규모 모델

- 시추깊이 (사업비) : 4,000 m (2,187백만원)
- 최하부 공내수 온도 : 120.25°C (2,000 m 측정기준으로 추정 산출온도)
- 생산정/주입정 물 온도 : 95.25°C/23.9°C (실험 참고치 추정산출)
- 관로 물 유량 : 18.9 m³/hr (2,000 m 펌프규격의 1.5배 적용)
- 취득 난방열량 : 1,566 kW (1,348,515 kcal/hr)
- 시추 실험지역 대표외기 기온 -6.4°C에 의한 운영 가능 재배온실의 난방면적 : 13,421 m² (4,000평)

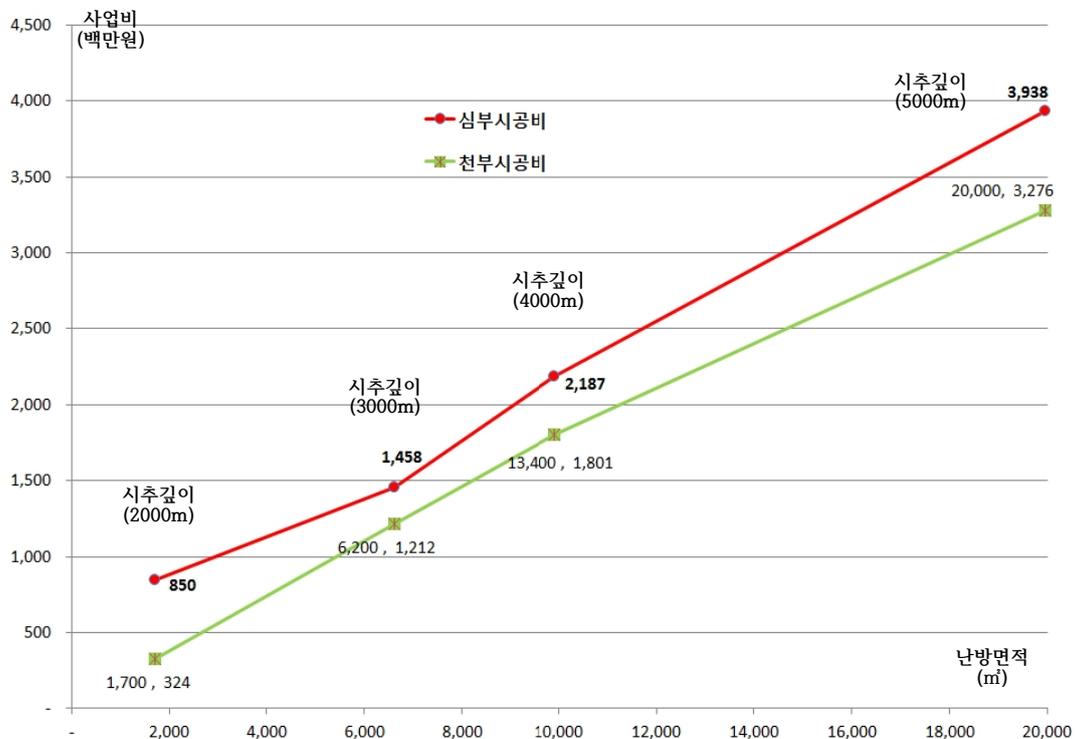


그림 3-165 심부지열과 천부지열 사업비 비교

나. 경제성 분석

(1) 분석 방법

- 심부지열난방설비에 대한 경제성 분석방법은 기존에 보급되어 운영 중인 천부지열히트펌프시스템과 비교하였음
- 소규모 모델의 경우, 심부지열 2,000 m 시추하는 경우에서 공사비용을 같은 난방열량을 얻을 수 있는 천부지열히트펌프시스템의 공사비를 비교하되 각각의 경우에서 발생하는 가동에 따른 운전비 즉 전기요금과 유지보수비 포함하였음
- 심부지열의 공사비는 기존에 일반적인 시공사례가 없어 본 연구에서 현장실험을 위해 시추한 주관연구기관의 제시한 비용을 이용하였으며, 천부지열 공사비는 ‘농어업에너지이용효율화사업’의 난방용량 당 1,638 원/kW을 적용하였음
- 천부지열히트펌프시스템의 전기요금은 가동 중인 농가의 사용실적 조사결과 평균 6,000 월/㎡으로 나타나 이를 적용하였고, 심부지열시스템은 연평균 가동시간 4,300시간과 50 원/kW의 전기요금, 수중모터펌프 7.5 kW로 산출하였음
- 심부지열의 시추깊이가 3,000 m인 경우는 수중모터 규격을 11 kW, 시추깊이가 4,000 m인 경우는 15 kW를 적용하였음
- 유지보수비는 시공비의 3%을 적용하였으며, 단 심부지열의 경우에는 히트펌프설비가 없어 유지관리가 요구되는 기계적 가동설비 부분이 매우 작기 때문에 전기, 기계설비인 수중펌프 및 배전반 등 설비비용을 5천만원으로 산정하여 적용하였음
- 심부지열의 시추깊이와 난방가능 용량 및 면적 그리고 그와 상응하는 천부지열히트펌프 시스템에 대한 설치비용과 유지관리비용은 표 3-70과 같음

표 3-70 실험 심부지열 시추공 설치 및 유지관리 비용

금액단위: 천원

구분	시추깊이 (공수)	소요부지 (㎡)	난방면적 (㎡)	부하용량(kW) (kcal/hr)	설치비용	연간 유지관리비용	
						전기료	보수비
심부	2,002 m(1)	1	1,700	198 (170,000)	850,000	1,612	1,500
천부	140 m(20)	540				324,000	10,200
심부	3,000 m	1	6,200	725 (624,000)	1,458,000	2,365	3,000
천부	200 m(50)	1,250				1,212,000	39,660
심부	4,000 m	1	13,400	1,100 (1,348,000)	2,187,000	9,589	6,000
천부	200m (75)	1,875				1,801,000	59,490
심부	5,000 m	1	20,000	2,000 (1,720,000)	3,938,000	17,126	12,000
천부	200 m(144)	4,000				3,276,000	119,682

(2) 경제성 평가

- 심부지열을 이용할 경우 경제성 평가는 천부지열을 이용하는 경우와 비교
- 천부지열에서의 고정비(감가상각, 수선, 이자)는 설치비의 12.45%³⁸⁾ 적용하고, 심부지열은 히트펌프 등 가동설비가 없으므로 천부지열의 50%적용하였음
- 시설비는 천부지열, 심부지열 모두 총 사업비의 20%를 적용하였는데, 정부지원의 ‘농어업에너지이용 효율화사업’에 의해 국고와 지방비 지원을 제외한 자부담을 20%를 기준으로 산출하였음

(가) 소규모

- 시추공 2,000 m를 시추하여 심부지열을 이용 1,700 m²의 온실을 난방했을 때와 온실 전체 난방부하의 70%와 100%를 천부지열히트펌프시스템으로 시공하여 운영했을 때 소요되는 사업비와 유지관리비를 적용하여 손익을 비교, 추정결과는 그림 3-166과 같음
- 온실 난방부하의 70%를 천부지열히트펌프시스템으로 운영했을 때 손익분기점은 6.5년, 100%인 경우 12년인데 비하여, 심부지열시스템을 설치하여 100% 온실 난방부하로 이용한 경우는 18.5년으로 경제성이 낮은 것으로 나타났음

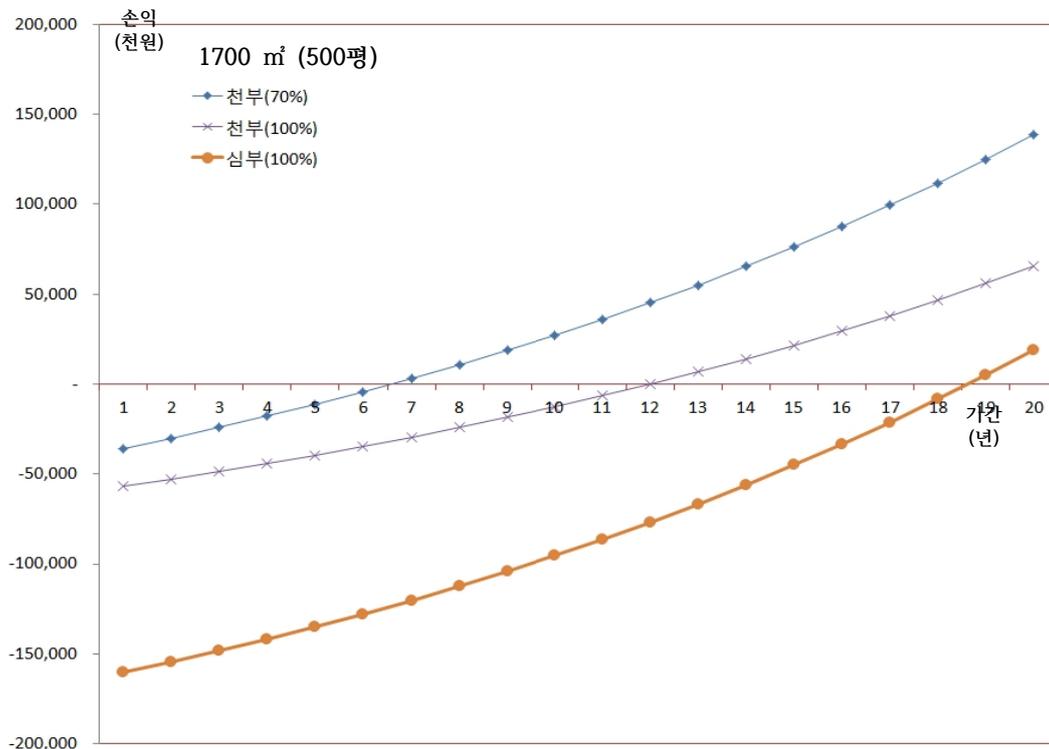


그림 3-166 시추깊이 2,000 m, 난방면적 1,700 m²

38) 김연중 외, ‘농업부문 에너지 수급전망과 청정에너지 농업시스템 구축(1/2차연도)’, 한국농촌경제연구원, pp. 104, 2010.

(나) 중규모

- 6,200 m²의 온실을 난방하기 위해서 심부지열 시추공 시추깊이를 3,000 m로 하였을 때와 같은 온실에 난방하기 위해 난방부하의 70%와 100%를 천부지열히트펌프시스템으로 시공하여 운영했을 때 소요되는 사업비와 유지관리비를 적용하여 손익을 비교, 추정 한 결과는 그림 3-167과 같음
- 심부지열의 시공비용은 천부지열히트펌프시스템 대비 1.21배 많이 소요되나 운용비 즉, 시설 운전 에 따른 전기요금에서 천부지열시스템은 히트펌프 운전 에 따른 전력사용량이 크고, 히트펌프 유지보수비를 감안해야하므로 장기간 운영 시에 심부지열시스템이 경제성에서 유리함
- 온실 난방부하의 70%를 천부지열히트펌프시스템으로 운영했을 때 손익분기점은 4년, 100%인 경우 7년인데 비하여, 심부지열시스템을 설치하여 100% 온실 난방부하로 이용한 경우는 5.3년으로 경제성이 기존의 지열히트펌프시스템과 대등하게 좋은 것으로 나타남

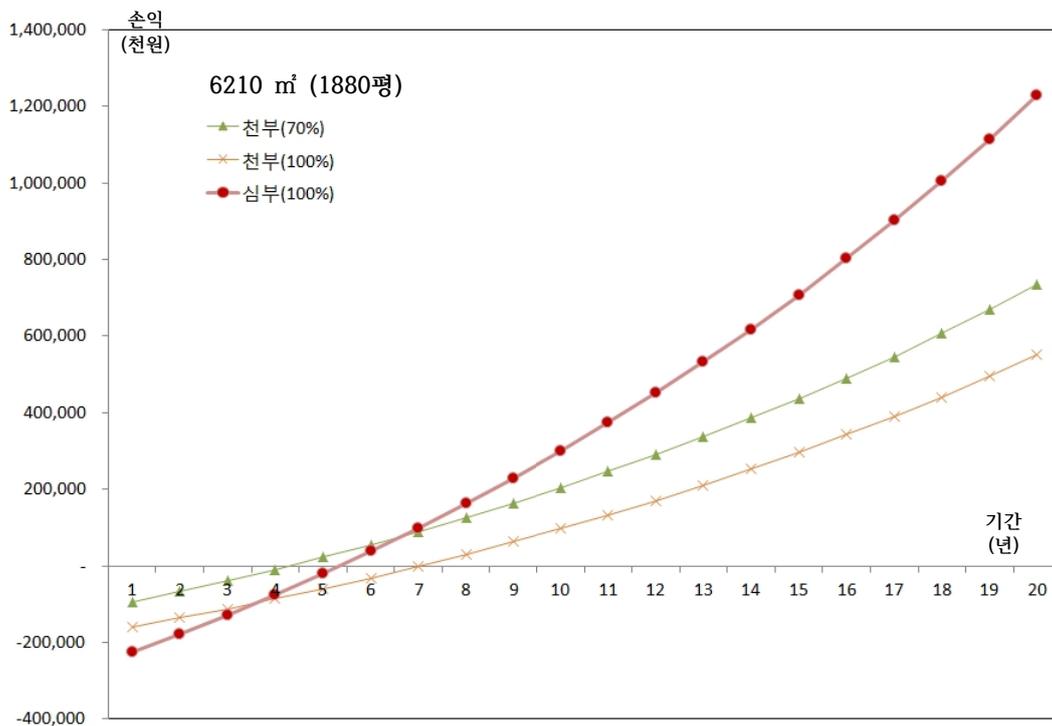


그림 3-167 시추깊이 3,000 m, 난방면적 6,200 m²

(다) 대규모

- 온실면적 13,400 m²을 난방하기 위해서 심부지열 시추공 시추깊이를 4,000 m로 하였을 때와 같은 온실에 난방하기 위해 난방부하의 70%와 100%를 천부지열히트펌프시스템으로 시공하여 운영했을 때 소요되는 사업비와 유지관리비를 적용하여 손익을 비교, 추정 한 결과는 그림 3-168과 같음

- 심부지열의 시공비용은 천부지열히트펌프시스템 대비 1.22배 많이 소요되나 운용비 즉, 시설 운전애 따른 전기요금에서 천부지열시스템은 히트펌프 운전애 따른 전력사용량이 크고, 히트펌프 유지보수비를 감안해야하므로 장기간 운영 시에 심부지열시스템이 경제성에서 유리함
- 온실 난방부하의 70%를 천부지열히트펌프시스템으로 운영했을 때 손익분기점은 3.6년, 100%인 경우 6년인데 비하여, 심부지열시스템을 설치하여 100% 온실 난방부하로 이용한 경우는 3년으로 경제성이 기존의 지열히트펌프시스템에 비하여 우수한 것으로 나타남

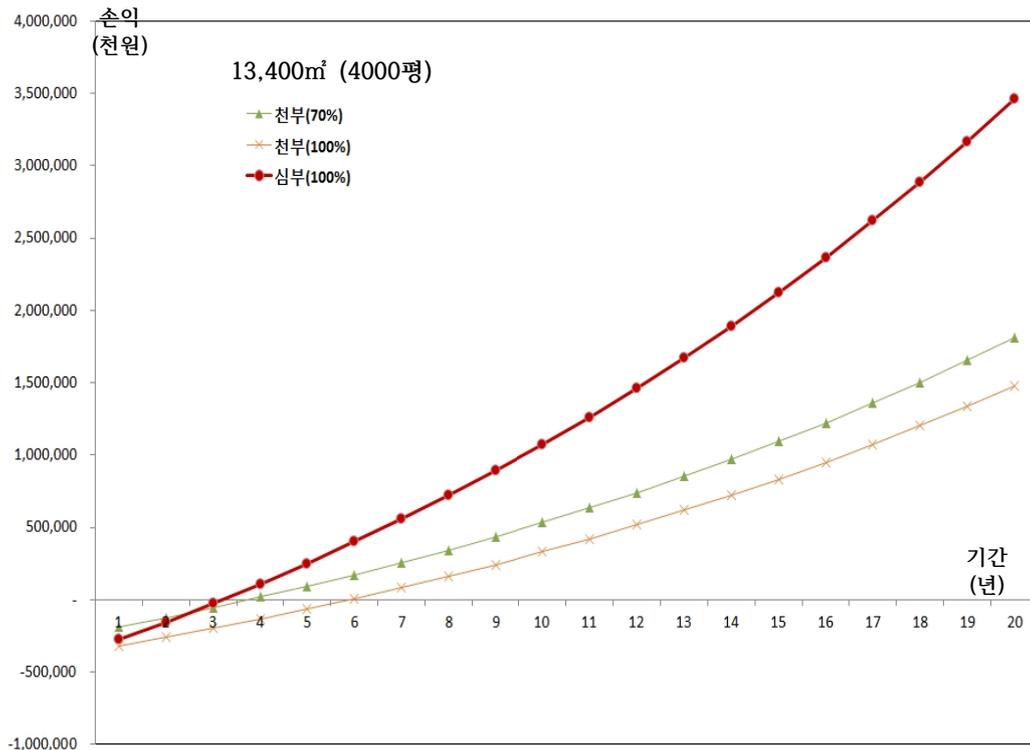


그림 3-168 시추깊이 4,000 m, 난방면적 13,400 m²

- 심부지열시스템을 이용하여 원예시설을 난방하려고 할 때는 작은 면적의 소규모 온실보다는 6,000 m²이상의 중규모 이상 온실에서 경제성 효과가 높은 것으로 나타나 온실 면적이 크거나 소규모 온실이 집단을 이루고 있는 단지의 중앙난방방식으로 도입 적용할 경우 경제적 효과가 클 것으로 예상됨

다. 소 결

- 실증실험을 위해 시추한 2,002 m 심부지열은 실험결과 전남지역 온실 1,700 m²에 난방 가능한 것으로 나타나 이를 소규모 모델로 설정하였으며, 이 온실규모에 천부지열히트펌프시스템을 설치했을 때의 공사비와 비교한 결과 2.63배의 공사비와 원가회수기간이 18.5년으로 경제성이 낮은 것으로 나타남

- 시추깊이 3,000 m 중규모 모델은 온실난방 가능 면적은 6,200 m²이며 천부지열히트펌프 시스템을 설치했을 때의 공사비와 비교한 결과 1.21배의 공사비와 원가회수기간이 5.3년으로 경제성이 기존의 지열히트펌프시스템과 대등하게 좋은 것으로 판단됨
- 대규모 모델은 시추깊이가 4,000 m로 온실난방 가능 면적은 13,400 m²이며 천부지열히트펌프시스템을 설치했을 때와 비교한 결과 공사비는 1.22배이나 저렴한 유지관리비용으로 원가회수기간이 3년으로 경제성이 기존의 지열히트펌프시스템에 비하여 우수함
- 심부지열의 시추공 천공은 1개소로 천부지열히트펌프시스템의 시추공 수량과 부지면적에 비하여 현저히 작아 토지이용과 환경에 유리함
- 천부지열히트펌프시스템은 지중으로부터 최대 15℃의 온도를 얻어 이를 전기를 사용하는 히트펌프를 가동하여 수온을 50℃로 상승시켜 사용하는 반면, 심부지열은 지중으로부터 직접 50℃내외의 수온을 얻음으로써 전기에너지 사용을 대폭 줄일 수 있는 친환경적인 에너지임을 확인함

2. 시스템 표준화

- 심부지열을 이용한 원예시설 난방활용 보급을 위한 「시스템 표준화」는 가. 지중열교환기, 나. 지상설비, 다. 온실설비로 구분되며, 금회 심부지열 2,002 m 굴착을 통한 원예시설 지열난방 시스템 표준화 절차 및 내용은 다음과 같음

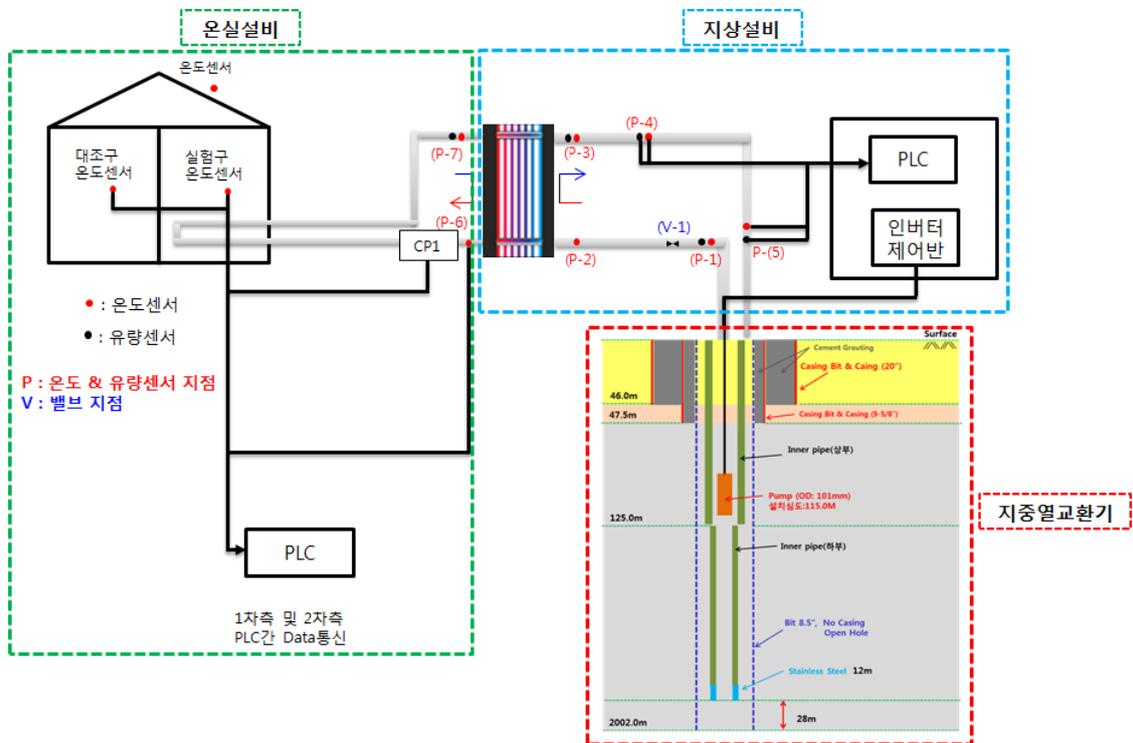


그림 3-169 전체 시스템 구분도

가. 지중열교환기

- 심부시추 작업(케이싱 작업 포함)을 통한 시추공 형성(금회 8.5 Inch 직경, 2,002 m 굴착) 및 지열수(Geothermal water) 수취를 위한 수중펌프(Submersible pump), Inner pipe를 포함하는 시스템 구성

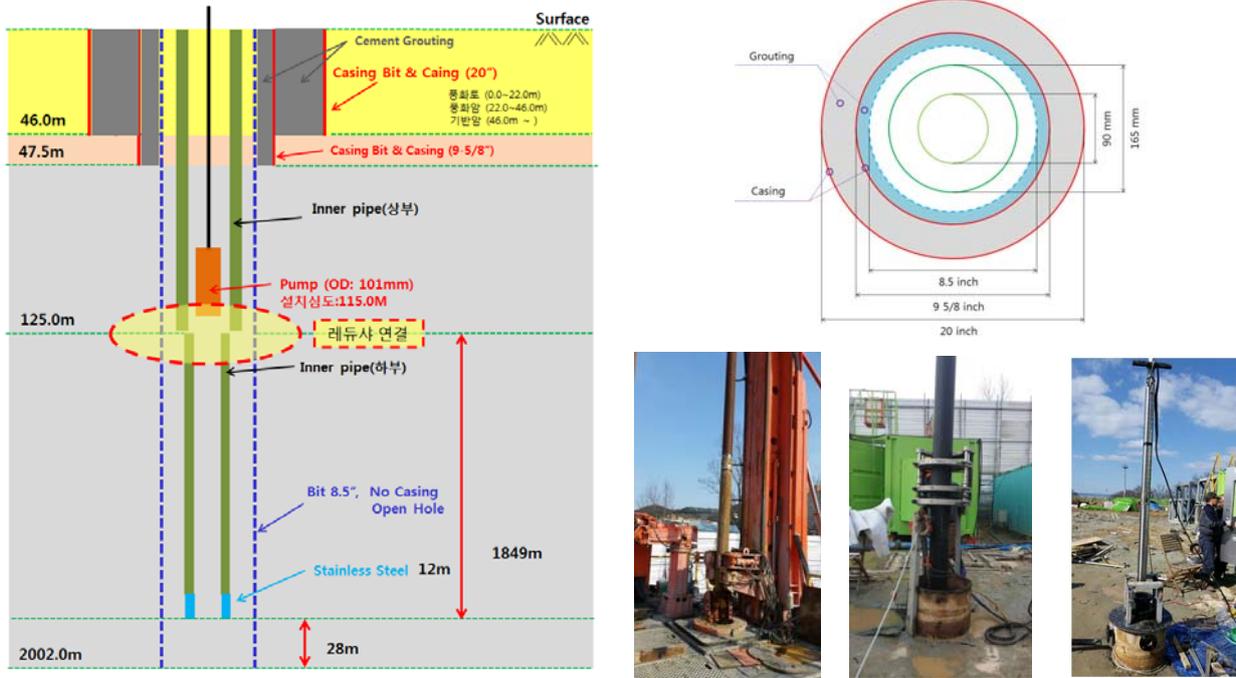


그림 3-170 지중열교환기 설계 및 시공

표 3-71 지중열교환기 주요 제원

구 분			제 원	
암반 특성	GL. 0.0~22.0 m	풍화토	GL. 0.0~46.0 m	20 inch casing bit & casing
	22.0~46.0 m	풍화암	0.0~47.6 m	9-5/8 inch casing bit & casing
	46.0 m~	기반암	0.0~2,002 m	8.5 inch open hole
Inner pipe	상 부	OD : 165 mm, ID : 134.4 mm, T : 15.3 mm		
	하 부	OD : 90 mm, ID : 60 mm, T : 15 mm		
순환펌프(Submersible pump)			용량 : 10 HP(7.5 kW), ID : 101 mm	

나. 지상설비

- 지중열교환기(BHE)를 통하여 생산된 지열수를 열교환기를 거쳐 다시 지중열교환기로 들어가는 배관라인 및 센서 등을 설치함
- 지중열교환기(BHE)의 지상연결부인 Well head를 비롯하여 인버터제어판, Data logger (온도, 유량, 유속 등을 계측 및 저장), 지상 배관라인(동결심도 이하 매설), 온도계 유량계, 버퍼탱크를 포함하는 시스템으로 구성됨



(a) Well head



(b) Data logger



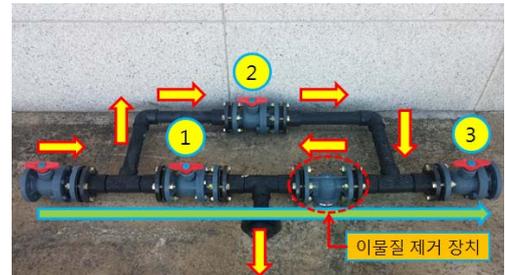
(c) 지상 배관



(d) VVVF



(e) 열교환기



(f) 이물질 제거 장치

그림 3-171 지상설비

표 3-72 지상설비 주요 제원

구분	제원
지상배관	OD : 60 mm, ID : 49 mm, T : 5.5 mm
매설 깊이	1.2 m
보온재	카이론 40 mm 이중 보온
열교환기	판형 75,000 kcal/hr

다. 온실설비

- 온실설비는 열교환기를 거친 순환수가 시설원에 작물의 생육에 필요한 난방 공급을 위하여 배관라인, 순환펌프, 방열기, 온도계 등의 설비를 포함하는 시스템으로 구성됨

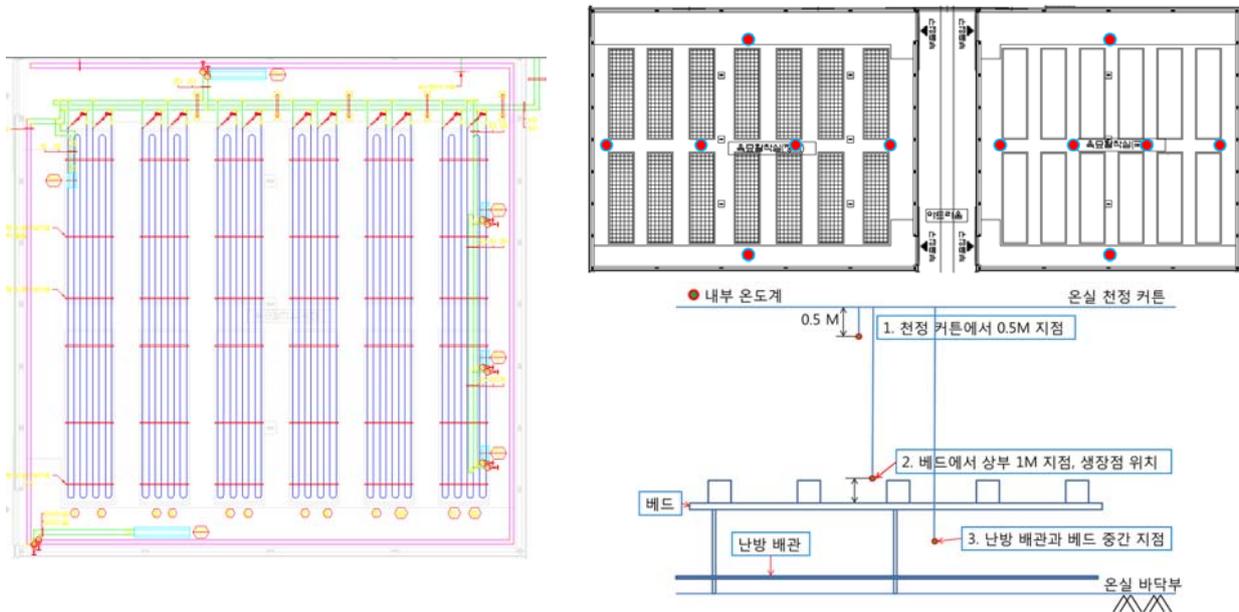


그림 3-172 온실설비 설계도 및 시공

표 3-73 온실설비 주요 제원

구분	제원
주관 직경	50 mm x 5 m, 40 mm x 5m, 32 mm x 5 m
방열기	팬코일 형식, 용량 : 10,000 kcal/hr
순환펌프	용량 : 1 HP(0.75 kW)

3. 정책 제안

가. 서울 국회의원 정책 제안 논의

- 일 시 : 2016년 6월 13일
- 장 소 : 쉐라톤 서울 팔래스 강남 호텔 2층(서울특별시)
- 내 용 : 심부지열을 이용한 원예시설 난방 시스템 적용 활용성 및 정책에 대한 논의



심부지열 이용기술 및 산업화	
기술성과	- 세계 최고 심부시추시스템(시추장비+위터해머) 원천기술 확보 - 장비제작, 시추, 생산 및 활용 전주기 기술 확보
경제성	- 기존 시추시스템 심부시추비용의 60% 이상 절감 - 심부지열 에너지 개발 및 활용 기반 마련
적용성	- 유리온실 난방 실험연구 완료, 2000평 이상 규모 사업성 입증 (천부지열대비 시공비 120%, 운영관리비 9%)
기대효과	- 심부지열의 농어업 첨단생산기술화로서 난방에너지 절감 및 농수산물 가격 경쟁력 제고
산업화	- 대규모 실증 및 시범사업을 통한 정부지원사업화 - 심부지열에너지 활용을 위한 법규개정(신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 시행규칙 등)



그림 3-173 국회의원 정책 제안

나. 농림축산식품부 정책 제안

- 일 시 : 2016년 7월 20일
- 장 소 : 세종특별자치시 농림축산식품부 원예경영과
- 참석자 : 원예경영과 사무관, 주무관, 농어촌공사 첨단기술사업처 차장 외
- 내 용 : 심부지열을 이용한 원예시설 난방 시스템 적용성 및 경제성에 관한 협의
심부지열난방 시스템을 국가 지원 산업으로 육성하기 위한 방법 및 방향 제시



2016. 6. 30

한국농어촌공사
농어촌연구원
Energy Research Division Rural Research Institute
Korea Rural Community Corporation



그림 3-174 세종시 정책제안 회의

제 4장 연구개발 기술 발전 기여도 및 활용 계획

제 1절 관련분야 기술 발전에의 기여도

1. 대구경 장심도 시추 기술

- 장심도 시추(Deep Drilling)를 위한 시추기 개발(Drilling Rig)
 - 심부지열 개발의 기본 요소인 장심도 시추를 위하여 그 동안의 축적된 기술력과 금회 과제인 나주(羅州) 지역에서의 시추작업의 기술을 바탕으로 5 km 이상의 시추가 가능한 인양력 450 ton 이상급의 장심도 시추기를 개발함(D&B 450W)



그림 4-1 인양력 450Ton 이상급 장심도 시추기(D&B 450W)

- 대구경 장심도 시추가 가능한 워터 해머 비트 (Water Hammer Bit) 개발
 - 금회 적용된 대구경인 8.5 Inch 비트를 사용한 장심도 시추 경험을 바탕으로 장심도 지반조건에서 「물과 공기의 혼합(Accumulator) 및 배출의 조건」과 「공기와 물의 용해도 상관관계」를 완벽히 규명하여, 장심도 시추용 대구경 12.0 Inch 워터 해머 비트를 개발함



그림 4-2 Water hammer bit (좌:8.5 inch, 우: 12 inch)

○ 대구경 장심도 시추 기술 확보

- 금회 나주 농업 기술원 현장에서서의 실증시추 경험(8.5 Inch, 2,002 m 시추)을 바탕으로 국내 & 해외의 「심부 지열 열 공급 및 발전」을 위한 대구경 장심도 시추기술을 확보함



그림 4-3 장심도 시추 전경 【좌: 광주(光州) 우: 나주(羅州)】

2. 지중열교환기(BHE : Borehole Exchanger) 설치 기술

○ 지중 열교환기 Inner Pipe 시공 기술 확보

- 시추공 내 생산파이프는 열전도율의 특성을 고려한 Inner pipe를 사용하고 상부 Inner pipe와 하부 Inner pipe의 직경을 달리 하여 순환수의 유속을 조절하는 과정을 통하여 단열 및 전열을 향상시키고 난류를 일으켜 열전달 성능을 향상시키는 시공 기술을 확보함
- 주입되는 주입수와 Inner pipe를 통하여 회수되는 지열수의 원활한 확보를 위하여 상부 구간에 대하여 직경이 크고 하부 구간에 대하여 직경이 작은 Inner pipe를 시공하고 직경을 달리하는 상부 Inner pipe와 하부 Inner pipe에 「레듀셔(Reducer)」를 적용하여 직경의 차이에서 나타는 인장력의 감소를 최소화하는 시공기술을 확보함

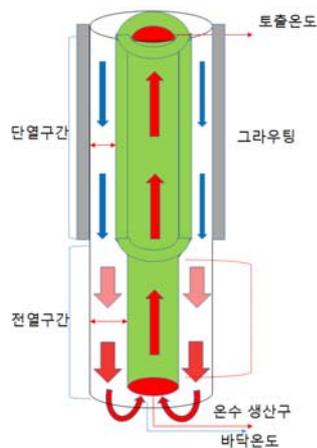


그림 4-4 지중열교환기 지열수 순환 원리 및 시공작업

○ Inner Pipe의 안정적 시공기술 확보

- 장심도 시추공에서의 지열수 회수를 위한 Inner pipe 시공과 관련하여 「맞대기 용착 (Butt fusion)」을 적용하여 국내 최초로 최 장심도 Inner pipe 시공 기술을 확보함
- 맞대기 용착(Butt fusion) 지점에 「센트럴라이저(Centralizer)」를 설치하여 시추공 내에서 Inner pipe의 좌굴을 방지하고 안정적인 지지 역할을 통하여 지열수의 원활한 순환을 도모하는 시공기술을 구현함



그림 4-5 Inner Pipe 안정적 시공기술 확보(Butt fusion & Centralizer)

3. 온실배관 난방 효율화 시스템

○ 기존 배관을 활용한 시공 및 난방효과 증가 기술 구축

- 온실 배관의 원활한 시공성을 위하여 「기존 배관에 연결하는 방식」으로 부수적으로 스테인레스 강관(50 mm), 일반 배관용 탄소강관(15 mm)을 적용하고, 「방열기」를 설치하여 난방 효과를 극대화 하는 기술을 구현함



그림 4-6 온실 배관 시공 기술

4. 지열히트펌프시스템 사용분석 및 심부지열 효율향상 기술개발

○ 원예시설 지열히트펌프시스템 에너지사용량 분석

- 22개 원예시설에 대한 현장방문 및 시설, 전기요금고지서 등을 조사함
- 실제 사용하고 있는 에너지사용량을 분석한 결과 2013년까지 보급된 지열히트펌프의 전기용량은 25,352kW이며, 연간사용량은 138,175,800kWh로 조사됨
- 이에 따른 전기요금은 저렴한 농사용 전기요금 적용으로 약 71억원이며, 난방비용 절감은 전기요금체제로 인한 영향이 큼
- 원예시설 지열히트펌프시스템의 요소별 전기사용량 분석결과 히트펌프의 전기소비량은 전체의 75%이상 차지함

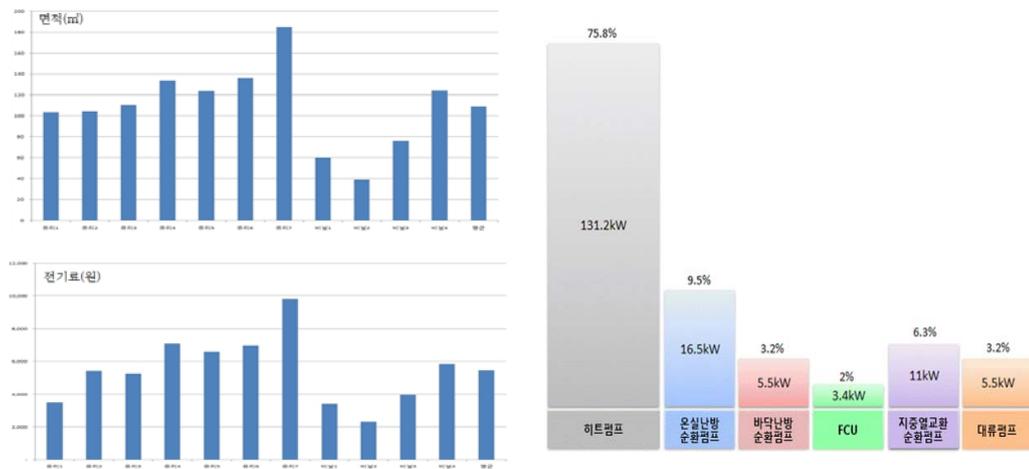


그림 4-7 원예시설 지열히트펌프 전력사용과 요소별 소비전력

○ 심부지열 취득열량 효율향상 기술개발

- 심부지열은 히트펌프 없이 고온을 직접 취득할 수 있는 기술로 기존의 지열히트펌프 시스템에 비하여 전기에너지 사용의 대폭절감으로 저렴한 유지관리비 구현이 가능하지만 장심도 시추공 시공에 고비용이 요구됨
- 따라서 1공의 심부지열 시추공에서 최대열량과 온도를 취득하는 기술이 고효율운전에 필요하여, 연구를 통해 방법론 기술개발 및 특허등록으로 실용화에 발판을 마련함
- 특히 제10-1587553호 ‘유속제어에 의한 지중열교환기의 최적운전 제어방법’을 취득함

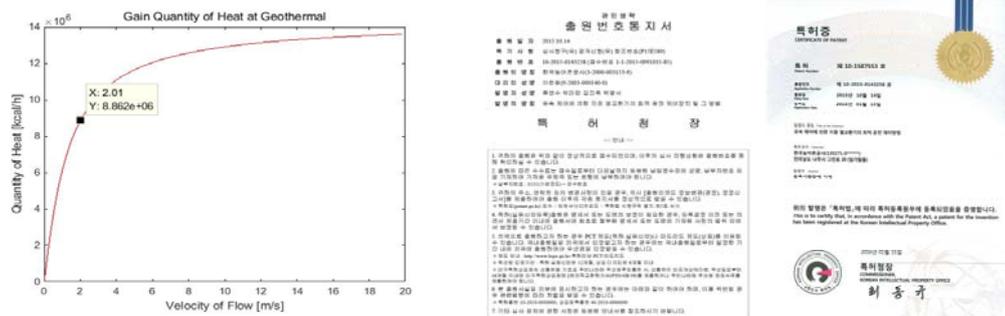


그림 4-8 취득열량 곡선과 특허증

5. 심부지열 순환 시뮬레이터 제작

- 심부지열 순환 시뮬레이터를 통해 난방 성능을 상승시키는 기법을 확보함
 - 심부지열 순환 시뮬레이터를 개발 및 제작함으로써 실험실 내에서 난방 성능을 예측할 수 있고 펌프의 VVVF 제어 기법과 On-off 제어 기법으로 난방 성능을 향상시키는 기술을 구현할 수 있었음. 실제 현장에서도 제어 기법을 적용시켜 난방 성능을 향상시킴

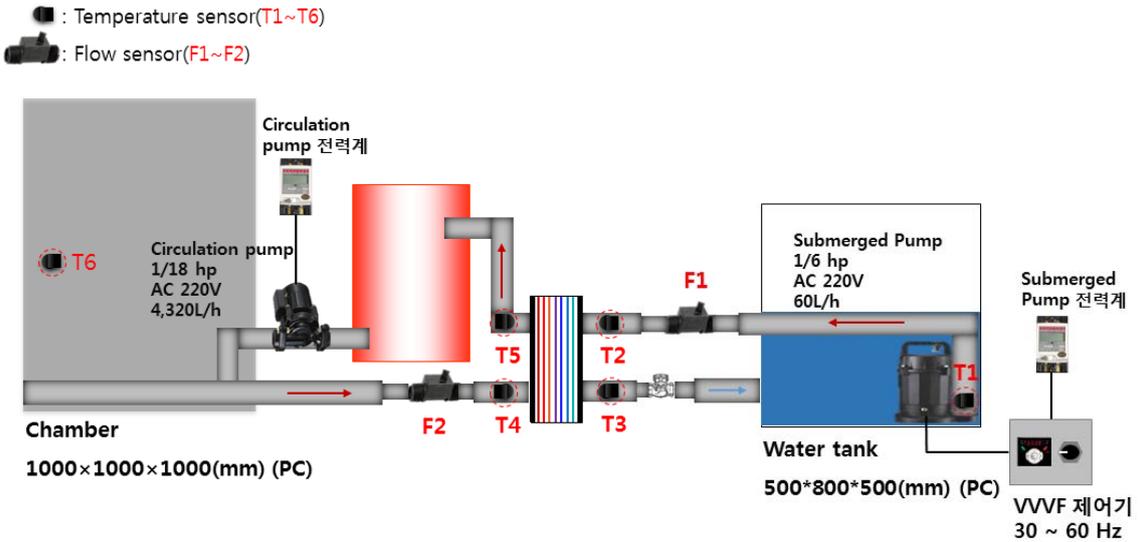


그림 4-9 심부지열 순환 시뮬레이터 개략도

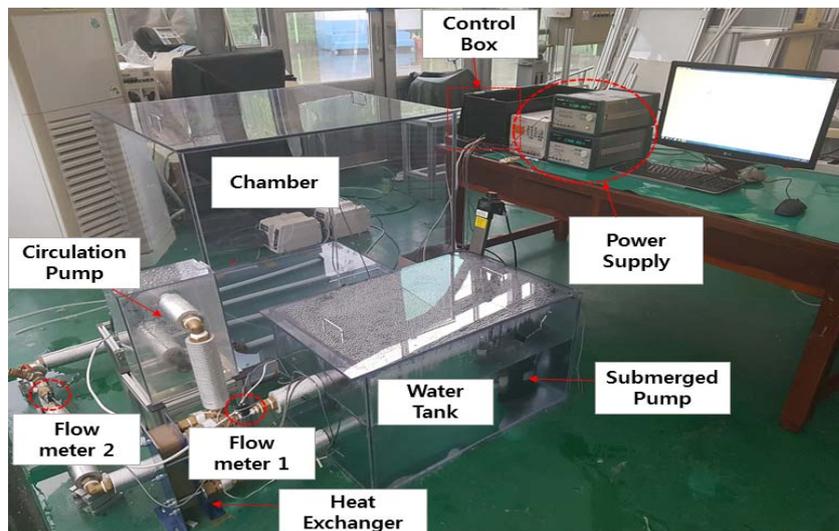


그림 4-10 심부지열 순환 시뮬레이터 사진

- 심부지열난방 성능을 구하고 분석할 수 있는 알고리즘을 개발함
 - 심부지열 순환 시뮬레이터의 데이터 로거 내에 소프트웨어를 통해서 난방 성능을 구하기 위한 신호들을 계측 및 저장하여 난방 성능을 구하고 분석할 수 있는 알고리즘을 개발함

표 4-1 데이터 취득 목록(예시)

Water(T1) 42°C	T2 (Water tank 온도 / °C)	T3 (Water tank 리턴 온도 / °C)	T4 (열교환기 유입 온도 / °C)	T5 (Chamber 공급 온도 / °C)	T6 (Chamber 온도 / °C)
	40.3	38.8	37.6	39	34.8
	F1 (Water / L/s)	F2 (Chamber / L/s)	취득열량 (kW)	COP_1	COP_{total}
0.154	0.100	2.88	5.38	11.73	

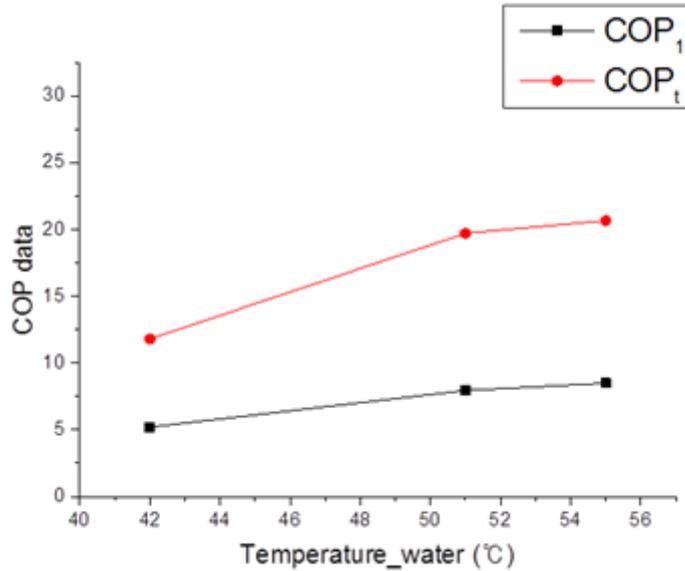


그림 4-11 난방 성능 그래프 예시

6. 온실 환경 자동 제어 및 모니터링 시스템 기술 확보

- 실시간으로 온실 내 작물 생장 환경을 계측 및 모니터링하는 시스템 기술을 확보함
 - NI 장비의 소프트웨어인 Labview를 통해서 실시간으로 생장 환경을 보정하고 계측 및 모니터링 할 수 있는 시스템 기술을 확보함

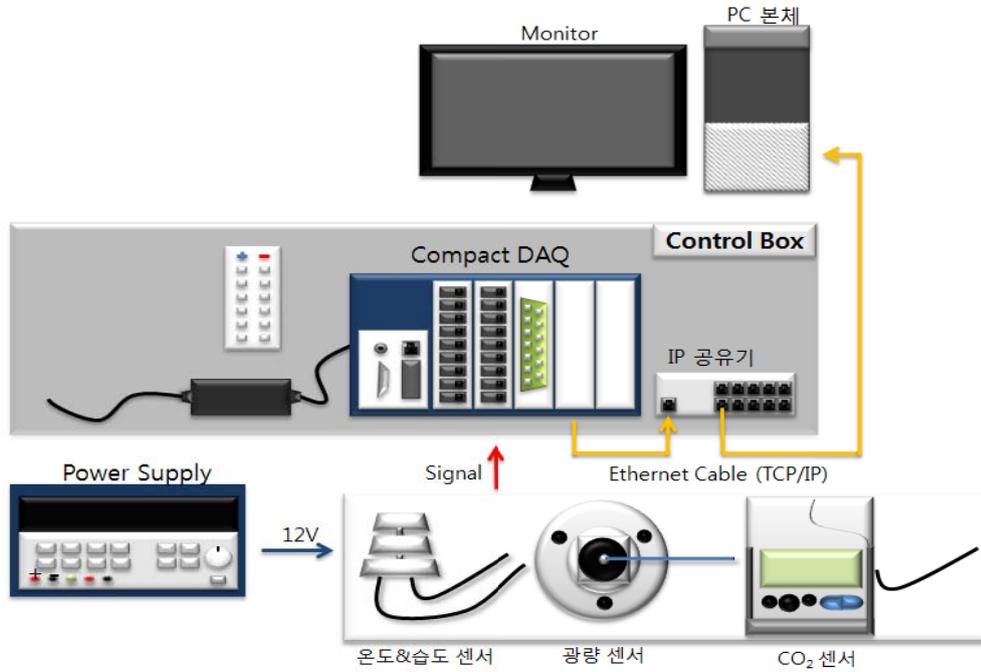


그림 4-12 모니터링 하드웨어 구성 개략도



그림 4-13 실험실 내 모니터링 장비 세팅 사진

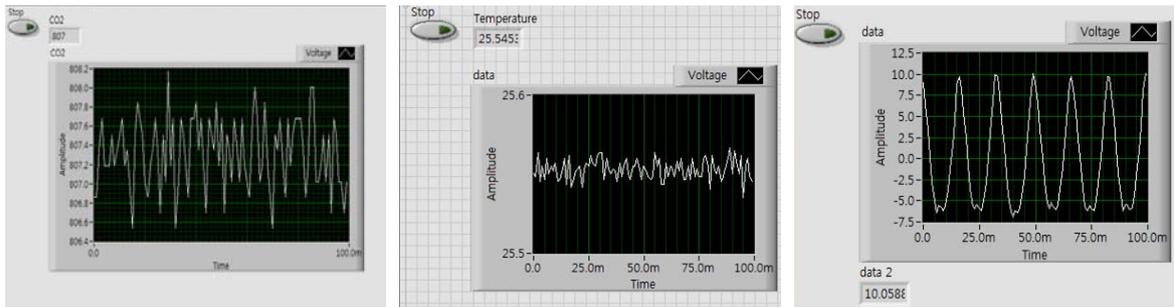


그림 4-14 모니터링 시스템 화면

제 2절 성과 활용 계획

1. 심부지열 시추용 시추장비 및 시추 시스템 수출

- 인양력 450Ton 이상, 5km 이상의 시추가 가능한 시추기(Drilling Rig) 및 워터 해머 시추 시스템(Water Hammer Drilling System) 수출
 - 지속적인 Water Hammer 시추 시스템 및 Drilling Rig의 개발 그리고 국내 검증 【나주(羅州)】을 통한 축적된 노하우를 바탕으로 지난 2015년 12월 DHE Sweden AB社에 5km 시추가 가능한 D&B 450W Rig 와 워터해머 시추 시스템을 수출 함



그림 4-15 D&B 450W Rig

2. 심부지열 시추기술(Drilling Technology) 수출

- 심부 지열 개발 장심도 시추 (Deep Drilling) 5km 이상 시추 서비스 수행
 - 국내와 같은 비화산 지대로서 화강암(Granite)이 분포하는 북유럽의 중심지 핀란드와 스웨덴에 대하여 수출된 D&B 450W Rig와 Water Hammer 시추 시스템을 이용하여 2016년 11월 핀란드 Tampre 지역을 시작으로 Helsinki 그리고 스웨덴의 Mallo지역에 이르는 3개 도시에 대하여 시추 심도 6km 이상의 심부지열 개발을 위한 장심도 시추 서비스를 수행함



그림 4-16 나주 지역 장심도 시추(2,002 m)

3. 온실 난방 사업 제안

- 심부지열 직접 열활용을 이용한 지중 열교환기 온실 난방 사업제안

【시설원예작물 (딸기, 토마토, 오이, 멜론)】

- 「심부지열 직접 활용을 이용한 원예시설 난방활용 및 경제성 분석」을 통하여 시설원예 농가의 운영비를 절감하고 심부지열을 이용한 원예시설 시스템 보급 하고자 작물의 생육조건을 검토하고 온실 타입(유리온실, 비닐온실) 및 평형대별 전력량을 비교하여 경제성을 평가함

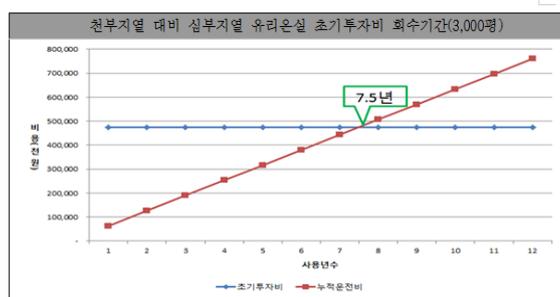
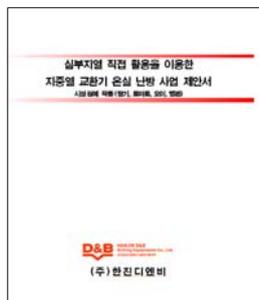


그림 4-17 심부지열 직접 열활용을 이용한 지중 열교환기 온실 난방 사업제안서

4. 시설 난방 사업 제안

- 심부지열 직접 열활용을 이용한 지중 열교환기 시설 난방 사업제안

- 클럽하우스에서 사용하는 연간 LPG 보일러 운영비를 검토하고 이에 대하여 심부 지열 난방을 적용하는 방식으로 기존의 배관에 심부 지열용 배관을 연결하여 연중 피크 시즌에 사용부하의 안정화를 위하여 급탕 및 난방을 위한 복합적인 시스템을 구현



그림 4-18 클럽하우스 시설난방 사업제안서

5. 심부지열난방 성능 향상 모의실험

○ 실험실 내에서 심부지열의 난방 규모 예측을 위한 모의실험

- 본 연구에서 VVVF 제어와 On-off 제어를 통해서 난방 성능의 미치는 영향을 분석하였기 때문에 향후 다른 제어 기법을 이용한 시스템의 경우에 미리 시뮬레이터를 통해서 난방 규모를 예측할 수 있음

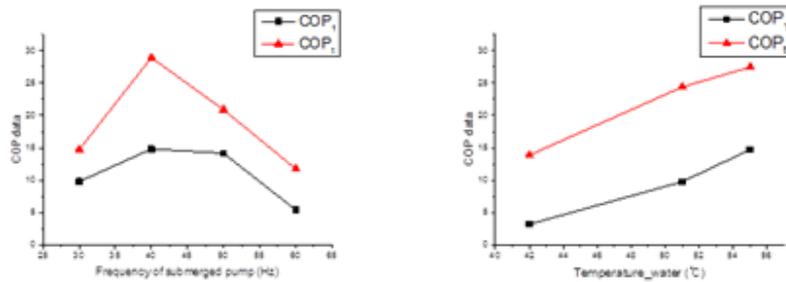


그림 4-19 제어 기법에 따른 난방 성능 분석 실험

제 5장 참고문헌

1. 에너지경제연구원, '에너지통계연보', 2012.
2. 에너지경제연구원, 면세유 자료, 농협중앙회, 2008.
3. 농림축산식품부, '2012 시설채소 온실현황 및 채소류 생산실적', '2012 화훼재배 현황', 2012
4. 한국농어촌경제연구원, '농업전망 2010-녹색성장과 농업·농촌의 새로운 활로', 2010.
5. Antics and Snnner, 'Status of Geothermal Energy Use and Resources in Europe', Proceedings European Geothermal Congress 2007
6. Conti et al., 'Geothermal Direct Uses in Italy: Country Update for WGC 2015', Proceedings World Geothermal Congress 2015
7. Carella and Sommaruga, 'Italian agricultural uses of geothermal energy', Bulletin d'Hydrogeologie NO 17, 1999
8. Andritsos et al., 'Geothermal Activities in Greece During 2006-2009', Proceedings World Geothermal Congress 2010
9. The New Mexico Bureau of Geology and Mineral Resources, 'Geothermal Energy in New Mexico', 2006
10. Heekeren and Bakema, 'The Netherlands Country Update on Geothermal Energy', Proceedings World Geothermal Congress 2015
11. Wong et al., 'Geothermal Energy', Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, 2007
12. World Energy Resources, 'Geothermal', 2013
13. Danube Region Strategy energy, 'Danube Region Geothermal Report', 2014
14. PAUL V. NELSON, 'GREENHOUSE Operation and Management' PRENTICE HALL, 1991.
- 15 Tonnage of Oil equivalent, 석유환산톤
16. 에너지경제연구원, 농협중앙회 면세유 자료, 2008.
17. 농림축산식품부 홈페이지(<http://library.mafra.go.kr/skyblueimage/15939.pdf>) 통계자료 발췌, 2014.12.
18. 류연수, '원예시설의 보일러와 지열난방시스템 부하분담에 관한 연구', 농어촌연구원, pp. 8-12, 2012.
19. 박미란 외2, '재배작물 및 지역별 온실의 지열 냉난방 시스템 조사 분석', 한국태양에너지학회 추계학술대회, 2014.11.
20. 한국전력공사, <http://cyber.kepco.co.kr/ckepco/front/jsp/CY/E/E/CYEEHP00105.jsp#>
21. 농촌진흥청, '땅에서 찾아낸 에너지의 보고', pp. 14, 2009.8.
22. 류연수 외2, '원예시설 지열냉난방시스템 전기에너지 사용량 분석', 한국태양에너지학회 추계 학술대회, 2014.11.
23. VDI 4640 PART1, 'Thermal use of the underground-Fundamentals, approvals, environmental aspects', 2010

24. Park et al., 'Thermal Properties of Rocks in the Republic of Korea', Econ. Environ Geol. 42, pp591-598
25. 김형찬 외 1, '지온 경사 산출을 위한 효과적인 온도검층자료 이용방법 연구', Econ, Environ, Geol, Vol.32, pp. 503-517, 1999.
26. Hyounchan Kim and Youngmin Lee, 'Heat flow in the Republic of KOREA', Journal of Geophysical Research, Vol.112, B05413, doi:10.1029/2006JB009,266, 2007.
27. 송재엽, '공동주택 바닥난방 시스템용 자동온도조절기의 제어특성 및 열환경 해석에 관한 연구', 경원대학교 석사학위논문, pp. 9-10, 2006.
28. 정만호, '수도설비의 인버터 모터 적용 방안' 한양대학교, 석사학위, pp.46-52, 2010.8.
29. 황세호외 2인, '심부시추공 온도, 자연감마선 물리검층', 한국지질자원연구원, 기술자문보고서, (주)한진디엔비, 2012.12.
30. 이병일 외, '시설원예학', 향문사, pp. 106-110, 2002.
31. 한국농어촌공사, '시설원예에너지이용효율화사업 지열(냉)난방보급사업 기술검토자료, 지열분야 설계 및 시공기준', 2010.6.
32. 농촌진흥청, '시설원예 에너지절감 기술', 2012
33. 최선미, '지열원 열펌프 시스템의 에너지 절감 및 온실 가스 저감 효과에 관한 연구' 한양대학교, 석사학위, pp. 40-42, 2008.8.
34. 환경부, '공공부문 온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침', 2013.
35. 환경부, '탄소포인트제 운영에 관한 규정', 2009.
36. 한국에너지기술연구원, 'IPCC 탄소 배출 계수', 2016.
37. 류연수, '원예시설의 보일러와 지열난방시스템 부하분담에 관한 연구', 농어촌연구원, pp. 54, 2012.12.
38. 김연중 외, '농업부문 에너지 수급전망과 청정에너지 농업시스템 구축(1/2차연도)', 한국농촌경제연구원, pp. 104, 2010.

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 첨단생산기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 농림축산식품부에서 시행한 첨단생산기술개발사업의 연구 결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.