R&D / 11기술혁신E04

지중 열에너지 전환·활용·저장시스템 설계 및 성능평가기술 개발 최종보고서

2014. 07. 10.

주관연구기관 / 한국과학기술원
공동연구기관 / 인천국제공항공사
위탁기관 / 울산대학교

국 토 해 양 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토해양부장관 귀하

본 보고서를 "지중 열에너지 전환·활용·저장시스템 설계 및 성능평가기술 개발에 관한 연구"과제의 보고서로 제출합니다.

2014 07. 10 .

주관연구기관명 : 한국과학기술원

주관연구책임자 : 이 승 래

연 구 원 : 강신항, 강한별, 고규현, 김민준, 박도원

박스칸, 박준영, 박현구, 윤석, 전경한(전준서), Nikhil NV

위탁연구기관명 : 울산대학교

위탁연구책임자 : 신 호 성

연 구 원 : 김종윤, 김지민, 류진석, 이준오, TO VIET NAM

공동연구기관명 : 인천국제공항공사

공동연구책임자 : 이 명 현

연 구 원 : 김동철, 김문한, 민병조, 박대현,

박종혁, 배진환, 이창원, 조남현, 홍덕문

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>11기술혁신
E04</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td colspan="2">2013.05.20.~
2014.05.19</td><td>단 계 구 분</td><td>3/3</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 사 업 명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="5">건설기술혁신사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>대 과 제 명</td><td colspan="5">지중 열에너지 전환·활용·저장시스템 설계 및 성능 평가기술 개발</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">이승래</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 21명
내부 : 2명
외부 : 19명</td><td>해당단계
연 구 비</td><td colspan="2">정부 : 344,000천원
기업 : 344,000천원
계 : 688,000천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 28명
내부 : 2명
외부 : 26명</td><td>총연구비</td><td colspan="2">정부 : 562,000천원
기업 : 557,000천원
계 : 1,119,000천원</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2" rowspan="2">KAIST
건설 및 환경공학과</td><td>공동연구
기관명</td><td colspan="3">인천국제공항공사</td></tr>
<tr><td>참여기업명</td><td colspan="3">인천국제공항공사</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="6">상대국명 : 상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="6">연구기관명 : 울산대학교 연구책임자 : 신호성</td></tr>
<tr><td colspan="5">요약</td><td>보고서면수</td><td>363</td></tr>
<tr><td colspan="7">○ 지반 조건을 고려한 지중 열 물성 D/B 구축 및 평가 기술 개발
▶ 국내 4개 권역별 주요 화강 풍화토 대상으로 열전도도 D/B구축(100건)
▶ 함수비,건조단위중량,광물구성,모관흡수력,입도분포에 따른 열전도도 분포 양상 비교 분석</td></tr>
</table>

○ **지반의 열전달 거동 모델 개발**

▶열-수리-역학 거동이 연동된 유한요소 수치해석기법 개발

- 기존 수치 기법 대비 95% 수준의 정확도 확보

○ **지열 전환 및 저장 해석 모델 개발 및 기존 프로그램 및 이론해 대비 검증**

▶지열교환기 형태에 따른 열전달 수치해석기법 개발 및 검증

- ABAQUS/Standard 대비 99 % 수준의 정확도 확보
- 코일형 지열 교환기 해석 모델 및 해석해 개발

○ **지반 열 물성 추정 프로그램 개발**

▶ 광물 특성, 지반 함수비, 간극비 등의 지반의 기본 물성치를 활용한 인공신경망 이론 기반 열특성 추정 모델의 개발

▶사용자 친화적 인터페이스를 갖춘 열특성 추정모델 프로그램 개발

○ **지열 전환 및 저장 해석 모델 개발 (II)**

▶ 불균질한 지반의 열전달 특성을 고려한 지열교환기-지반 열 교환/저장 거동 해석기법 개발

▶ 다층 지반 및 지반의 불균질성을 고려한 등가 열 물성계수 역해석 기법 개발

○ **시공 경제성 평가 및 운영 중 지반 열 환경 평가 연구**

▶ 지열교환기 배치 간격으로 인한 열간섭 효과에 대한 연구

▶ 열교환 파이프 배치 형태 및 간격별 열효율 평가

▶광대역 지반의 장기 열 저장/전환 거동 평가

○ **UTECUS 스마트 모니터링 네트워크 개발**

▶ 핵심 계측 인자 및 계측 지점 도출

▶ 다중 계측 센서 배치를 통한 스마트 모니터링 네트워크 시스템 개발

○ **UTECUS 설계 프로그램 개발**

▶ 하이브리드 에너지 및 에너지 피크 부하를 고려한 지열에너지 전환/활용/저장 시스

템 설계 프로그램의 완성

▶ 열-수리-역학, 하이브리드모듈 추가

▶ 설계프로그램의 적용: 개발된 프로그램으로 기본 설계 실시, 설계 프로그램의 제도적 보완 및 인증추진

○ **UTECUS 경제성 분석 및 최적 운전 방안 도출**

▶ 경제성 예측 기법 개발: 기존 경제성 분석 기법과의 비교

▶ 모니터링을 통한 최적운영방안 도출: 제안된 운영방안 전후 운영비 비교

▶ 최적 운전을 위한 경제성 예측 기법 개발

○ **Mockup 실증 실험을 통한 시스템 검증**

▶ Mockup 실증 실험을 통한 최적 운전 방안 검증

▶ 실증 실험을 통한 설계 프로그램 검증

▶ 최적 운영 모드 프로그램화

▶ 모니터링 시스템 및 설계 프로그램의 보완 및 수정을 통한 통합화

▶ 지열 시스템 제도 개선: 기존의 제도화 및 지침서 보완

색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	저심도 지열에너지, 지중 열에너지저장, 하이브리드 지열 히트펌프설계, 상시 모니터링, 성능평가
	영 어	Geothermal energy, Underground thermal energy storage, Hybrid ground heat pump design, Realtime monitoring, Performance evaluation

요 약 문

Ⅰ. 제 목

지중 열에너지 전환•활용•저장시스템 설계 및 성능평가기술 개발

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

▶ 지구온난화로 인한 전 지구적 온도 상승 및 겨울철 이상 기후(북극 빙하 이상으로 인한 초저온현상)는 인류의 냉·난방 전력 수요를 급증시켰으며 이로 인해 지속가능한 대체 냉·난방 에너지원 확보가 절실해짐

▶ 삶의 질 향상 및 에너지 자립이라는 측면에서 냉/난방에 대한 탄소 중립적이며 친환경적인 대체 에너지원 개발이 요구되었으며 다양한 신재생 에너지원 중 접근 성 및 경제성에서 저심도 지열 에너지(geothermal energy)가 가장 효율적으로 평가되고 있음(DOE, 2001). 그러나 현재까지 지중 열 교환기, 구조물 매입형 지중열 교환 기술, 지열 히트펌프, 열 교환 설비 설계 등과 같이 지열 교환 및 활용이 주 연구 개발 대상으로 고려되어 왔음.

▶저심도 지열 에너지 기술은 연중 약 10~15℃의 온도를 유지하는 저심도 지반(50m~200 m 심도 이내의 토사 및 암반)을 여름철에는 냉방원(cooling source)으로 겨울철에는 열원(heating source)으로 활용하는 에너지 전환기술로써 우리나라와 같이 여름과 겨울의 계절 특성이 뚜렷한 기후에 가장 적합함

▶ 지중 열에너지 저장 기술 (Underground Thermal Energy Storage)은 기본적으로 크게 대수층 지하수에 열에너지를 저장하는 대수층 열 에너지 저장 (Aquifer Thermal Energy Storage; ATES)기술과 다수의 지중 열 교환기를 배열식(array-type)으로 저장하는 시추공 열에너지 저장(Borehole Thermal Energy Storage; BTES)기술로 나뉨

▶ 상대적으로 기술 완성도가 높은 ATES에 비해 BTES에 기반한 지중 열에너지 전환/활용/저장 기술은 설계 및 시공에 대한 구체적인 가이드라인 마련이 쉽지 않은 상황으로써 향후 실제 적용 및 사업화를 위해서는 많은 연구 개발이 요구됨

▶ 본 연구 개발 과제에서는 BTES 형태의 지중 열에너지 전환/활용/저장 시스템의 설계 및 성능평가와 관련한 연구개발을 수행하였음

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

○ 최종 목표

다양한 신재생에너지원의 효율적이고 경제적 활용을 위한 지반 조건을 고려한 지중 열에너지 전환•활용•저장 (Underground Thermal Energy Conversion, Utilization, and Storage; UTECUS) 시스템의 설계 및 성능평가 기술을 개발하고자함

○ 연구목표 및 내용

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	지반 조건을 고려한 지중 열 물성 D/B 구축 및 평가 기술 개발	- 국내 주요 화강 풍화토 및 암반의 열 물성 변화 특성 실험 수행과 데이터베이스 구축
	지반의 열전달 거동 해석 모델 개발	- 포화/불포화 다공질 지반에 대한 열-수리-역학적 구성 모델의 개발 - 다공질 재료의 열-수리-역학적 지배 방정식에 의한 유한요소 프로그램 개발
	경제성 분석 및 예측 기법 연구	- 기존 경제성 분석 사례 조사 및 합리적 예측 기법 도출
2차년도	지반 열 물성 추정 프로그램 개발	- 광물 특성, 지반 함수비, 간극비 등의 지반의 기본 물성치를 활용한 인공신경망 이론 기반 열 특성 추정 모델의 개발 - 사용자 친화적 인터페이스를 갖춘 열특성 추정모델 프로그램 개발
	지반의 열전달 거동 해석 모델 개발 (II)	- 개발된 열-수리-역학 유한요소 프로그램을 이용한 UTECUS 지열 저장거동 매개변수 해석 - 하이브리드 지중 열 저장 능력 및 지하수위, 지표면 온도 변화 등에 의한 장기적인 효율성 및 지중 열환경 평가
	지열 전환 및 저장 해석 모델 개발	- 불균질한 지반의 열전달 특성을 고려한 지열교환기-지반 열 교환/저장 거동 해석 기법 개발 - 다층 지반 및 지반의 불균질성을 고려한 등가 열 물성계수 역해석 기법 개발
	시공 경제성 평가 및 운영 중 지반 열 환경 평가 연구	- 지열교환기 배치 간격으로 인한 열간섭 효과에 대한 연구 - 열교환 파이프 배치 형태 및 간격별 열효율 평가 - 광대역 지반의 장기 열 저장/전환 거동 평가
	UTECUS 스마트 모니터링 네트워크 개발	- 핵심 계측 인자 및 계측 지점 도출 - 다중 계측 센서 배치를 통한 스마트 모니터링 네트워크 시스템 개발
	1차 Mockup 시험 수행	- 설계, 모니터링 기술 및 경제성 평가 모델 검증을 위한 Mockup 시험 수행

3차년도	UTECUS 설계 프로그램 개발	- 하이브리드 에너지 및 에너지 피크 부하를 고려한 지열에너지 전환/활용/저장 시스템 설계 프로그램의 완성 - 열-수리-역학, 하이브리드모듈 추가 - 설계프로그램의 적용: 개발된 프로그램으로 기본 설계 실시
	UTECUS 경제성 분석 및 최적운전 방안 도출	- 경제성 예측 기법 개발: 기존 경제성 분석 기법과의 비교 - 모니터링을 통한 최적운영방안 도출: 제안된 운영방안 전후 운영비 비교 - 최적 운전을 위한 경제성 예측 기법 개발
	Mockup 실증 실험을 통한 기술 패키지 구축 및 검증	- Mockup 실증 실험을 통한 최적 운전 방안 검증 - 실증 실험을 통한 설계 프로그램 검증 - 최적 운영 모드 프로그램화 - 모니터링 시스템 및 설계 프로그램의 보완 및 수정을 통한 통합화

Ⅳ. 연구개발결과

연 차	연구 내용	연구 결과
1차년도	**지반 조건을 고려한 지중 열 물성 D/B 구축 및 평가 기술 개발** - 국내 주요 화강 풍화토 및 암반의 열 물성 변화 특성 실험 수행과 데이터베이스 구축 - 실험 방법: 탐침법 및 섬광법을 이용한 열전도도 측정 - 대상 시료: 국내 4개 권역별(충청 세종, 강원 평창, 부산 금정, 전라 담양) 화강암질 풍화토 채취 후 실험	- 국내 4개 권역별 주요 화강 풍화토를 대상으로 열전도도 D/B구축(100건) - 함수비, 건조단위중량, 광물구성, 모관흡수력, 입도분포에 따른 열전도도 분포 양상 비교 분석 - 국내 화강풍화토의 경우 건조상태의 열전도도는 0.15 ~ 0.3 W/mK 범위에 분포 - 국내 화강풍화토의 경우, 함수비에 따른 열전도도 증가는 건조단위중량과 점토광물의 함량에 따라 복합적으로 영향을 받으며 이루어짐
	지반의 열전달 거동 해석 모델 개발 - 지열교환기 형태에 따른 열전달 수치해석기법 개발 및 검증 (단일 및 복수의 U 형 지열교환기와 Spiral Coil 형 지열교환기에 대한 3차원 및 축대칭 수치해석모델 개발)	- U형 실험 대비 95% 수준의 정확도 확보 - 이론 해석모델 및 실내 모형토조와의 실험값과 비교 - 개발된 모델의 정확성 및 효율성: 20% 향상 - 개발된 알고리즘의 정확성: 10% 향상
	지반 열 물성 추정 프로그램 개발 - 광물 특성, 지반 함수비, 간극비 등의 지반의 기본 물성치를 활용한 인공신경망 이론 기반 열 특성 추정 모델의 개발 - 사용자 친화적 인터페이스를 갖춘 열특성 추정모델 프로그램 개발	- 개발된 인공신경망 모델은 5개(흙의 함수비, 흙의 간극률, 흙입자의 열전도도, 균등계수, 곡률계수)의 입력변수와, 단일 은닉층 및 Logsig-Tansig 전달함수 조합, 뉴우런의 개수가 9개일때최적인 것으로 나타났으며, 0.85이상의 결정계수를 나타내어 모델의 열전도도추정 적절성 확보 - 실내 실험을 통해 구축된 데이터베이스를 기반으로 간극률(porosity)과 함수비(water content)에 대한 새로운 열

2차년도		전도도 추정모델을 제안하였고, 이를 사용자 친화적 인터페이스를 갖춘 프로그램화
	광대역 지반의 장기 열저장/전환거동 시뮬레이션 - 열의 전도-대류해석을 위한 파이프 유한요소 기법 개발 - 지하수의 지열시스템의 성능에 영향 평가	- 파이프 내의 유체흐름과 주위지반으로의 대류를 고려할 수 있는 유한요소의 개발 - 개발된 유한요소코드와 역해석 프로그램을 이용하여 열응답실험 결과로부터 보다 신뢰성이 높은 지반 열물성치의 추정 - 지하수와 파이프 유체 속도에 따른 지중열교환기의 장기 열성능 해석
	최적 운용비 산정 기법 개발 - Mockup1 수직밀폐형 열교환기 타입별 실증 실험을 수행하여 열교환율 측정 - 열교환기 타입별 열효율을 고려한 최적시공비 산정	- Mockup1 수직밀폐형 열교환기 타입별 실증 실험을 수행하여 열교환율 측정 - 열교환기 타입별 열효율을 고려한 최적의 경제성 평가 - W자형 적용시 U자형 대비 10~15% 열효율이 향상되며 시공비 약 5% 절감
	UTECUS 스마트 모니터링 네트워크 개발 - 광섬유 온도 센서의 적용성 평가를 위해 전기식 센서와 광섬유 센서의 오차율 측정 비교	- 모형 토조 실험을 통한 광섬유 온도 센서의 적용성 평가를 위해 전기식 센서와 광섬유 센서의 오차율 측정 - 열응답 실험시 광섬유 센서와 전기식 센서 오차율 5% 이내
3차년도	**UTECUS 하이브리드 설계프로그램** - 수직밀폐형 및 에너지파일 설계기술의 국산화 -지반물성모듈, 코일형열교환기설계모듈, 지하수흐름 모듈 등이 내장	- 에너지파일 설계 인자의 정확성 향상 - 열 물성 입력 모듈화: 열 물성 추정 프로그램의 신뢰성 향상을 위한 데이터베이스 확장, 다양한 지반 조건에서의 실증 데이터 확보 - 지하수 흐름을 고려한 설계 알고리즘 적용: 프로그램에 내장된 해석해의 수치해석적 검증 완료(정확도 95% 이상 확보) - 다양한 타입의 열교환기를 고려할 수 있는 설계프로그램 구축 - 수직밀폐형과 에너지파일형 두 적용 가능한 설계모듈 구축
	UTECUS 실증시스템 구축 및 경제성 분석 프로그램 개발 - 설계 모듈 검증을 위한 수직 밀폐형 Mockup1 구축 - 에너지 파일을 이용한 Mockup2 지열 냉난방 시스템 구축	- 최적 운전방안 정확도 검증, 최적 운영방안과 결과 비교 - 실증 실험을 통한 설계 프로그램 검증 - 최적 운영 모드 프로그램화 완성 - 타 설계 프로그램과의 결과 비교를 통한 설계 프로그램의 정확성 검증 완료 - 검증된 데이터를 근거로 전문기관에 정식 소프트웨어 등록 완료

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

○ 화강풍화토 열전도도 D/B 및 추정 모델의 적용 가능

○ 지열시스템 설계 시 지반 열 물성 추정 프로그램의 활용

○ 범용 열원모델 및 효율적인 이론해 산정 기법의 설계 프로그램 적용

○ 에너지 파일의 열-수리-역학적 안정성에 대한 통합적 평가

○ 열-수리-역학적 구성 모델 및 유한요소해석 코드의 다양한 활용 가능

○ 지열히트펌프 시스템의 합리적 경제성 분석

○ UTECUS 스마트 모니터링 네트워크 활용

Summary

Ⅰ. Title

Design and Performance Evaluation Technology for Underground Thermal Energy Conversion • Utilization • Storage System

Ⅱ.Objectives and Neccssaries

▶ Global temperature rise and anomalous the climate of winter(ultralow temperature phenomenon in arctic glacier) by global warming has caused an increase cooling·heating electricity demand, As a result, there is an urgent need of secure of sustainable alternative cooling·heating energy sources

▶ In increase the quality of life and energy independence, alternative energy source development about cooling and heating is required to be eco-friendly and satisfy carbon neutrality. Also among the renewable energy, low depth geothermal energy was valued in accessibility and economics(DOE, 2001).

▶ Up to now, geothermal energy exchange and application like ground heat exchanger, geothermal heat pump, design of heat exchange facilities have been considered as the main research object

▶ Basically, Underground Thermal Energy Storage is largely divided into Aquifer Thermal Energy Storage(ATES) and Borehole Thermal Energy Storage(BTES) that stores multi ground heat exchanger as array type

▶ Compared to ATES that has relatively high technique perfection, underground thermal energy conversion · utilization · storage system based on BTES is not easy to prepare and does not have any specific guide line about design and construction

▶ Research and development project of design and performance evaluation technology for BTES type underground thermal energy conversion · utilization · storage system will be done this year

Ⅲ. Content and Scope

○ **Final Goal**

Design the Underground Thermal Energy Conversion, Utilization, and Storage(UTECUS) system and develop performance evaluation technology for effective and economical utilization of various new renewable energy

○ **Objectives and Details of Research**

Year	Research Objectives	Major Research Details
1st Year	Establish a database of ground heat properties in consideration of geotechnical conditions and develop assessment technologies	- Conducting tests to observe characteristics of changing thermal properties of major decomposed granite soils and bedrocks in Korea and establishing a relevant database
	Develop a model to interpret the ground heat transfer behavior	- Developing a thermo-hydro-mechanical model for saturated/unsaturated porous grounds - Developing a finite element program based on the thermo-hydro-mechanical governing equations of porous materials
	Analyze economic feasibility and studying prediction techniques	- Investigating the existing cases of analyzing economic feasibility, and finding reasonable prediction techniques
2st Year	Develop a program to predict ground heat properties	- Developing a thermal property prediction model based on the theory of artificial neural network using basic properties of grounds, such as mineral characteristics, moisture content in the ground and void ratios - Developing a program for a thermal property prediction model equipped with a user-friendly interface
	Develop a model to interpret the ground heat transfer behavior (II)	- Interpreting parameters for the geothermal storage behavior of UTECUS using the developed thermo-hydro-mechanical finite element program - Assessing long-term efficiency and geothermal environment based on the changes in the hybrid ground heat storage ability, underground water levels, and ground surface temperatures
	Develop a model to interpret geothermal conversion and storage (I)	- Developing ground heat exchangers and techniques to interpret the ground heat exchange/storage behavior in consideration of the characteristics of uneven ground heat transfer - Developing techniques for inverse analysis of equivalent heat property coefficients in consideration of the non-homogeneity of multi-layered soils and grounds
	Carry out research on the assessment of the economic feasibility of construction and on	- Research on the effects of thermal interference due to the intervals in arrangement of ground heat exchangers

	the assessment of geothermal environment during operation	- Assessing the thermal efficiency depending on the layout and interval of arrangement of heat exchange pipes - Assessing the long-term heat storage/conversion behavior of wideband ground
	Develop a UTECUS smart monitoring network	- Finding core measuring factors and measuring points - Developing a smart monitoring network system through the arrangement of multi-measuring sensors
	Conduct the first-round mockup test	- Conducting a mockup test in order to verify the model for assessing design and monitoring technologies and economic feasibility
3stYear	Develop a UTECUS designing program	- Completing a program to design a conversion/utilization/storage system for geothermal energy in consideration of hybrid energy and energy peak load - Adding a thermo-hydro-mechanical hybrid module - Applying the design program: Conducting basic design with the developed program
	Analyze the economic feasibility of UTECUS and find optimized operational measures	- Developing economic feasibility prediction techniques: Comparison with existing economic feasibility analysis techniques - Finding optimized operational measures through monitoring: Comparison of operational costs before and after the implementation of suggested operational measures - Developing an economic feasibility prediction technique for optimized operation
	Establish and verify the technological package through empirical mockup tests	- Verifying the optimized operational measures through empirical mockup tests - Verifying the design program through empirical tests - Programming the optimized operational mode - Integrating the monitoring system and design program through supplementation and modification

Ⅳ. Results

Year	Research Objectives	Major Research Details
1stYear	**Establish database of heat properties considering soil conditions** - Conduct experiments for weathered granite soil and build heat conductivity database - Test methodology: Probe test, FDM, HPM - Object samples: 4 zones in domestic (Sejong, Pyeongchang, Geumjeong, Damyang)	- Build heat conductivity database for weathered granite soil of 4 zones in domestic (Sejong, Pyeongchang, Geumjeong, Damyang) - Comparative analysis of distribution of thermal conductivity according to water content, dry unit weight, composition of mineral, capillary absorption force, size distribution - In domestic weathered granite soil, thermal conductivity

		in dry condition varies from 0.15 to 0.3 W/mk. - In domestic weathered granite soil, increase of thermal conductivity according to water content is influenced by dry unit weight and content of clay mineral
	Development of heat transfer behavior model of ground - Development of finite element numerical analysis model combined with heat-water-physical behavior	- Securement of 95% accuracy compared to existing numerical method - Securement of 95% accuracy compared to U type GHE test - Securement of 95% accuracy compared to Coil type GHE test / Fluent - Improvement of 20% accuracy for developed algorithm
2stYear	**Develop the program for estimating the geo-thermal property** - Develop a thermal property prediction model based on the ANN unsing basic properties of grounds, such as mineral characteristics, moisture content in the ground and void ratios - Develop the user friendly program for estimating thermal property.	- Research on the optimal performance of the ANN model when five input parameters (water content, porosity, thermal conductivity, uniform coefficient, and curvature coefficient), single hidden layer, Logsig-Tansig transmission function, and nine numbers of neuron - Estimating the thermal conductivity with more than 0.85 of the coefficient of determination using the ANN model. - User friendly programming of the new estimating model for the thermal conductivity using the porosity and water content based on database which established by laboratory test.
	Simulate the thermal storage & recovery for large scale space - Develop the pipe element module for conduction and convetion phenomena based on the FEM. - Evaluation of the groundwater impact on the geothermal system performance	- Developing the pipe-flow element which model convective heat transfer between fluid flow inside the pipe and surrounding material, and also advective and conductive heat movement of the fluid inside the pipe. - Estimating the more reliable geo-thermal property using the developed FEM code and back analysis program. - Research on the effect of the groundwater and water velocity inside pipe to the long-term heat exchanger performance
	Develop a method to estimate optimal operation cost - Measuring the heat exchange rate for various type of the vertical heat exchangers which installed on the field (Mockup1). - Measuring the optimal construction cost considering the heat efficiency for various type of the heat exchanger	- Measuring the heat exchange rate for various type of the vertical heat exchangers which installed on the field (Mockup1). - Optimal economic assesment considering various type of the heat exchangers. - Improving 10~15% heat efficiency and 5% cost reduction using the W-type exchanger compared to U-type

	Develop a UTECUS smart monitoring network - Compare the error rate of electric sensor and fiber sensor for evaluating application of fiber-optic temperature sensor	- Mesasurement of error rate of optical fiber sensor and electrical sensor for application of fiber-optic temperature sensor through steel box model experiment. - Within error rate of fiber sensor and electric sensor 5% during TRT
3stYear	Develop a UTECUS designing program - localization of design method of closed vertical type and energy pile - soil property module, coil type GHE design module, groundwater flow module	- Accuracy for energy pile design was improved input thermal property module : database extension for reliability improvement of thermal property estimation program, empirical data in diverse soil conditions - Application of design algorithm considering groundwater flow : analytical solution in the program was numerically verified(accuracy : more than 95%) - can consider diverse type of GHE module which is applicable both of closed vertical type and energy pile was built
	Establish UTECUS system and development of economic analysis program - Establish closed vertical type Mockup1 for verification of design module - Establish Mockup2 geothermal heating/cooling system using energy pile	- Verifying accuracy for optimal operation plan and comparing it's result - Verifying the program through experiments - Optimal operation mode was programmed - Verifying accuracy of the program through comparison with other design program - Software registration to professional organization based on verified data

Ⅴ. Utilization plan

○ Application of thermal conductivity estimation model for korean weathered granite soil

○ Application of design program for general purpose

○ Efficient theoretical solution assessment using the developed heat source model

○ Integrated evaluation of thermal-hydraulic-mechanical stability of energy pile

○ Various application of thermal-hydraulic-mechanical configuration model

○ Reasonable economic analysis of ground heat pump system

○ Utilization of UTECUS smart monitoring system

CONTENTS

Chapter 1. Introduction ····· 29
Section 1. Background and necessities ····· 29
1. Introduction ····· 29
2. Importance of research ····· 34
Section 2. Objectives and scopes ····· 42
1. Ultimate objective ····· 42
2. Objectives and content ····· 43
3. Strategy and method ····· 44
4. International group research and development plan ····· 61

Chapter 2. Status of research and development ····· 63
Section 1. Domestic technology and industry trend ····· 63
1. Technology trend ····· 63
2. Market trend ····· 64
3. Domestic research infra ····· 66
Section 2. Abroad technology and industry trend ····· 68
1. Technology trend ····· 68
2. Market trend ····· 69
Section 3. Cooperation possibility connected other industry, domestic/abroad project ····· 71
1. Cooperation with heat pump industry ····· 71
2. Cooperation with participating company ····· 72
3. Cooperation with European university ····· 72

Chapter 3. Results of study ····· 75
Section 1. Establish database of heat properties and development of assessment technology ····· 75
1. Database development of thermal conductivity for weathered granite soil in Korea ····· 75
2. Thermal properties estimation program ····· 111
Section 2. Development the heat transfer behavior model in soil ····· 121
1. Geothermal system design ····· 121
2. Design modules ····· 128
3. Groundwater advection module ····· 157
4. Module verification via Mockup tests ····· 175
Section 3. Development of thermal energy transfer and storage analysis model and verification ····· 214
1. SUPG Numerical tools ····· 215
2. Verification of developed THM code about groundwater flow ····· 217
3. Effect of groundwater advection in single GCHP ····· 220
4. Effect of groundwater advection in group GCHPs ····· 227
Section 4. Research of economic analysis and estimation methods ····· 230
1. Principle of smart sensor ····· 231

2. Smart monitoring system test ····· 234
Section 5. UTECUS economic analysis ····· 242
1. LCC model and previous cases investigation ····· 242
2. LCC analysis for second-passenger terminal in Incheon Airport ····· 252
3. LCC analysis for three-level construction sites in Incheon Airport ····· 254
4. Development of LCC program ····· 271
Section 6. System verification and operation evaluation ····· 298
1. Economical operation methods ····· 299
2. Mockup2 energy pile system ····· 302
3 Mockup2 optimum operation methods ····· 311

Chapter 4. Accomplishments of objectives and contribution to related research ····· 343
1. Yearly research objective and scope ····· 343
2. Achievement of research objective ····· 345

Chapter 5. Applications of research result ····· 347
Section 1. Application plan ····· 349
1. Application plan for Incheon Airport geothermal project ····· 349
2. Future research plan ····· 350
Section 2. expectation outcome and ripple effect ····· 350
1. Academic/manpower training aspects ····· 350
2. Technical/economy industrial aspects ····· 351
3. Encouragement of the country's image/overseas market expansion ····· 352
Section 3. Business applications ····· 353
1. Analysis for present condition of participating company ····· 353
2. Cooperation method and promotion strategy ····· 355

Chapter 6. References ····· 357

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요 ····· 29
제 1 절 연구 배경 및 필요성 ····· 29
1. 연구개발 개요 ····· 29
2. 연구개발의 중요성 ····· 34
제 2 절 연구 목표 및 내용 ····· 42
1. 연구 최종 목표 ····· 42
2. 연구 목표 및 내용 ····· 43
3. 연구 개발 추진 전략 및 방법 ····· 44
4. 국제공동연구개발 추진계획 ····· 61

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 63
제 1 절 국내기술 및 산업동향 ····· 63
1. 기술 동향 ····· 63
2. 시장 동향 ····· 64
3. 국내 연구개발 인적/물적 인프라 ····· 66
제 2 절 국외기술 및 산업동향 ····· 68
1. 기술 동향 ····· 68
2. 시장 동향 ····· 69
제 3 절 연구과제의 타 산업 및 국내외 연계 협력 가능성 ····· 71
1. 기계 공조 및 히트 펌프 관련 산업계와의 협력 ····· 71
2. 참여기업(인천국제항공사)과의 추후 협력 ····· 72
3. 지열관련 유럽 우수 대학 및 연구소와의 협력 ····· 72

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 ····· 75
제 1 절 지반 조건을 고려한 지중 열 물성 D/B 구축 및 평가 기술 개발 ····· 75
1. 국내 화강 풍화토의 열전도도에 관한 데이터베이스 구축 ····· 75
2. 지반 열 물성 추정 프로그램 개발 ····· 111
제 2 절 설계프로그램 개발 ····· 121
1. 지열 시스템 설계 ····· 121
2. 주요 설계 모듈 ····· 128
3. 지하수 흐름 반영 ····· 157
4. Mockup 실험을 통한 모듈 검증 ····· 175
제 3 절 광대역 지반의 장기 열저장/전환 거동 해석 ····· 214
1. SUPG 수치기법 ····· 215
2. 지하수 흐름에 대한 개발된 THM 코드의 비교 검증 ····· 217
3. 단일(Single) 열교환 시스템에서 지하수 흐름의 영향(TRT, TPT) ····· 220
4. 그룹(Group) 열교환 시스템에서 지하수 흐름의 영향 ····· 227

제 4 절 UTECUS 스마트 모니터링 네트워크 개발 ····· 230
1. 광섬유 센서의 원리 ····· 231
2. 스마트 모니터링 실험 ····· 234
제 5 절 UTECUS 경제성 분석 기법 개발 ····· 242
1. 경제성 모델 및 기존 사례 조사 ····· 242
2. 인천국제공항 제 2여객터미널 경제성 분석 ····· 252
3. 인천공항 3단계 건설 부지 열교환기 유형별 시험시공 및 경제성 평가 ····· 254
4. 경제성 분석 프로그램 Module 개발 ····· 271
제 6 절 시스템 검증 및 운영 평가 ····· 298
1. 경제적 운영방안 제시 ····· 299
2. Mockup2 에너지 파일 시스템 구축 ····· 302
3. Mockup2 시스템 최적운전방안 ····· 311

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도 ····· 343
1. 연차별 연구 목표 및 연구개발 수행 현황 ····· 343
2. 연구개발 목표의 달성도 ····· 345

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ····· 347
제 1 절 연구결과의 활용방안 ····· 349
1. 인천국제공항 지열 설비 설계 및 유지관리 현장 적용 및 실용화 방안 모색 ····· 349
2. 추후 연구: 현장 적용성 개선을 통한 기술의 제품화 및 경쟁력 강화 ····· 350
제 2 절 기대성과 및 파급효과 ····· 350
1. 학문적, 인력양성 측면 ····· 350
2. 기술적, 경제·산업적 측면 ····· 351
3. 국가이미지 제고 및 해외 시장 진출 ····· 352
제 3 절 연구결과의 기업활용방안 ····· 353
1. 참여기업의 현황분석 ····· 353
2. 참여기업별 연계방안 및 추진전략 ····· 355

제 6 장 참고문헌 ····· 357

그림 차례

제 1 장

그림 1-1-1 저심도 지열 에너지의 활용 ····· 30
그림 1-1-2 ATES와 BTES 기반 저심도 지중 열 에너지 저장 기술 ····· 32
그림 1-1-3 본 연구개발 과제의 개요 ····· 33
그림 1-1-4 지반의 열 특성에 대한 데이터베이스 구축 및 예측 모델 개발 ····· 35
그림 1-1-5 지반 내 열전달 해석 기술의 개선 ····· 36
그림 1-1-6 UTECUS 성능평가를 위한 스마트 모니터링 네트워크 ····· 38
그림 1-1-7 설계프로그램 및 경제성 평가 모델 개발을 통한 사업화 유도 ····· 39
그림 1-1-8 무탄소 도시 내 UTECUS의 적용 ····· 40
그림 1-1-9 UTECUS를 활용한 고부가가치 토목 지반 지열 기술 시장 발굴 ····· 41
그림 1-2-1 총괄 추진 체계 ····· 46
그림 1-2-2 당해 연구개발 추진전략 ····· 48
그림 1-2-3 연차별 세부 추진계획 및 방법 ····· 50
그림 1-2-4 연구기기・장비・시설 구축 및 활용 방안 ····· 54
그림 1-2-5 ERP를 이용한 KAIST 연구비 관리 시스템 (1) ····· 57
그림 1-2-6 ERP를 이용한 KAIST 연구비 관리 시스템 (2) ····· 58
그림 1-2-7 KAIST 연구비 집행 과정 ····· 59
그림 1-2-8 KAIST 감사시스템 ····· 60

제 2 장

그림 2-1-1 당해과제 관련 국내 기술 동향 ····· 64
그림 2-1-2 저심도 지열 관련 국내 시장 동향 ····· 66
그림 2-2-1 저심도 지중 열 저장 관련 국가별 동향 ····· 69
그림 2-2-2 세계 및 국가별 저심도 지열 에너지 활용 규모 ····· 70
그림 2-3-1 타산업 및 국내외 협력 가능성 ····· 71

제 3 장

그림 3-1-1 열전도 메커니즘 ····· 77
그림 3-1-2 수분이 함유된 흙 입자 사이의 열 전달 ····· 77
그림 3-1-3 모래와 자갈의 평균 열전도도 (a) 동결; (b) 비동결 ····· 83
그림 3-1-4 실트와 점토의 평균 열전도도 (a) 동결; (b) 비동결 ····· 83
그림 3-1-5 피트의 평균 열전도도 (a) 동결; (b) 비동결 ····· 83
그림 3-1-6 열전도도 실험장비 (a)TP08 (b) Quickline 30 (c) HFM 436 ····· 89
그림 3-1-7 TP08 Probe (Hukseflux) ····· 90
그림 3-1-8 탐침 실험 원리 ····· 91

그림 3-1-9 광물정량분석(XRD) 결과(W3) ····· 92
그림 3-1-10 광물정량분석(XRD) 결과(W3) ····· 92
그림 3-1-11 흙의 열전도도에 영향을 주는 인자 (a) 열전도도-함수비,
(b)실험데이터(W3,전남 담양군) 및 분포양상 ····· 93
그림 3-1-12 석영질 흙의 함수비 변화에 따른 열전도도의 변화 ····· 94
그림 3-1-13 건조단위중량 변화에 따른 열전도도의 변화 (a)W1, (b)W2, (c)W3, (d)W4 ····· 95
그림 3-1-14 간극비에 따른 열전도도 분포 ····· 96
그림 3-1-15 균등계수가 열전도도에 미치는 영향 ····· 96
그림 3-1-16 건조단위중량 별 함수비에 따른 열전도도 분포 ····· 97
그림 3-1-17 S1의 함수특성곡선 ····· 98
그림 3-1-18 S1의 모관 흡수력에 따른 열전도도 ····· 99
그림 3-1-19 S1의 체적 함수비에 따른 열전도도 ····· 99
그림 3-1-20 W의 함수특성곡선 ····· 100
그림 3-1-21 W2의 모관 흡수력에 따른 열전도도 ····· 101
그림 3-1-22 W2의 체적 함수비에 따른 열전도도 ····· 101
그림 3-1-23 건조한 석영질 시료의 열전도도의 기존 추정 모델과의 비교 ····· 102
그림 3-1-24 석영질 실트 및 모래 열전도도의 기존 추정 모델과의 비교 ····· 103
그림 3-1-25 세종시 연기군 화강풍화토(W1) 열전도도의 기존 추정 모델과의 비교 ····· 105
그림 3-1-26 강원도 평창군 화강풍화토(W2) 열전도도의 기존 추정 모델과의 비교 ····· 105
그림 3-1-27 전라남도 담양군 화강풍화토(W3) 열전도도의 기존 추정 모델과의 비교 ····· 106
그림 3-1-28 부산시 금정구 화강풍화토(W4) 열전도도의 기존 추정 모델과의 비교 ····· 106
그림 3-1-29 W1시료에 대한 실험데이터와 새로운 모델의 산정 값 ····· 107
그림 3-1-30 W2시료에 대한 실험데이터와 새로운 모델의 산정 ····· 108
그림 3-1-31 W3시료에 대한 실험데이터와 새로운 모델의 산정 값 ····· 108
그림 3-1-32 W4시료에 대한 실험데이터와 새로운 모델의 산정 값 ····· 108
그림 3-1-33 기존 모델과 새로운 모델 비교 (대상시료 W2, n=0.534) ····· 109
그림 3-1-34 건조상태에서의 건조단위중량 별 실험 데이터와 새로운 모델 산정 값 ····· 109
그림 3-1-35 프로그램의 FLOW CHART ····· 112
그림 3-1-36 3차원 열전도도 곡면식 ····· 112
그림 3-1-37 화강풍화토 Rough Estimation 입력창 ····· 113
그림 3-1-38 화강풍화토 Detailed Estimation입력창 ····· 113
그림 3-1-39 실트 및 점토의 입력창 ····· 114
그림 3-1-40 기타 시료의 입력창 ····· 114
그림 3-1-41 화강풍화토 열전도도 산정을 위한 인공신경망 모델 구조 ····· 115
그림 3-1-42 최적모델구성을 위한 뉴우런 수와 전달함수 조합에 따른 예측정도(R2) 비교 ····· 119
그림 3-1-43 경험적 모델과 인공신경망 모델로 예측된 정규화 된 열전도도 비교(학습자료) ···· 120
그림 3-1-44 경험적 모델과 인공신경망 모델로 예측된 정규화 된 열전도도 비교(검증자료) ···· 120
그림 3-2-1 히트펌프의 냉방 사이클 ····· 122
그림 3-2-2 히트펌프의 난방 사이클 ····· 122
그림 3-2-3 부하, 히트펌프 제원 입력 (GLD) ····· 124
그림 3-2-4 설계 결과 화면 (GLD) ····· 125

그림 3-2-5 지중 열교환기 제원 입력 (EED) ····· 126
그림 3-2-6 설계 결과 화면 (EED) ····· 126
그림 3-2-7 보어홀 열 저항에 따른 지중 열교환기 요구 깊이 변화 ····· 129
그림 3-2-8 U자형 교환기(n=2)일 때의 파이프 유효 직경 ····· 131
그림 3-2-9 코일형 열교환기의 형상 ····· 140
그림 3-2-10 3x3의 보어홀 배치 ····· 141
그림 3-2-11 열 간섭으로 인해 쌓이는 축열 ····· 142
그림 3-2-12 2층 지반과 지중 열교환기 ····· 144
그림 3-2-13 에너지 파일의 보어홀 단면적 ····· 146
그림 3-2-14 열응답시험 시뮬레이션을 위한 유한요소모델 ····· 147
그림 3-2-15 시간에 따른 온도변화 ····· 148
그림 3-2-16 코일형 에너지파일의 열응답시험을 위한 유한요소모델 ····· 150
그림 3-2-17 측정된 주입 온도와 시뮬레이션에 적용된 회귀 식 ····· 150
그림 3-2-18 열교환기 배치 및 형상 ····· 151
그림 3-2-19 코일형 열교환기 설치 과정 ····· 151
그림 3-2-20 경과 시간에 따른 순환수 온도 결과 ····· 152
그림 3-2-21 실험 및 수치해석의 온도 변화 양상 비교 ····· 153
그림 3-2-22 보어홀 벽면 온도 ····· 153
그림 3-2-23 에너지파일의 보어홀 열 저항 ····· 153
그림 3-2-24 유효 보어홀 열 저항 산정을 위한 매개변수연구 결과 ····· 155
그림 3-2-25 해석모델에 따른 열원 주위 온도 변화 (2 m/year) ····· 161
그림 3-2-26 해석모델에 따른 열원 주위 온도 변화 (50m/year) ····· 162
그림 3-2-27 해석모델에 따른 열원 주위 온도 변화 (100m/year) ····· 163
그림 3-2-28 해석모델에 따른 열원 주위 온도 변화 (200m/year) ····· 164
그림 3-2-29 해석 모델에 따른 중기, 단기 지중 열 저항 변화 ····· 165
그림 3-2-30 해석 모델에 따른 장기 지중 열 저항 변화 ····· 166
그림 3-2-31 해석 모델, 보어홀 배치에 따른 지반 온도 변화 ····· 167
그림 3-2-32 열원 주위 온도 변화 (이동 나선형 코일 열원 모델) ····· 171
그림 3-2-33 수치해석 모델 ····· 172
그림 3-2-34 수치해석과의 비교 검증 ····· 175
그림 3-2-35 지반조사 결과 지층 구성도 ····· 176
그림 3-2-36 열교환기 형태 및 결속 평면도 ····· 177
그림 3-2-37 지중 열교환기 시공 과정 ····· 177
그림 3-2-38 U, W, 2U자형 지중 열교환기의 시간에 따른 순환수 온도 변화 ····· 180
그림 3-2-39 코일형 지중 열교환기의 시간에 따른 순환수 온도 변화(48시간) ····· 182
그림 3-2-40 코일형 지중 열교환기의 시간에 따른 순환수 온도 변화(60시간) ····· 182
그림 3-2-41 코일형 열교환기 열응답시험 시뮬레이션을 위한 유한요소모델 ····· 183
그림 3-2-42 시간에 따른 온도변화 ····· 184
그림 3-2-43 100시간 연속 운전 시 열교환율 ····· 187
그림 3-2-44 5일간 부분 운전 시 열교환율 ····· 188
그림 3-2-45 6개월 연속 운전 시 열교환율 ····· 188

그림 3-2-46 6개월 부분 운전 시 열교환율 ····· 189
그림 3-2-47 6개월 부분 운전 시 열교환율 ····· 192
그림 3-2-48 모형토조 ····· 193
그림 3-2-49 W자형 지중 열교환기 ····· 194
그림 3-2-50 보어홀 벽면온도 배치도 ····· 194
그림 3-2-51 입구 순환수 온도 변화 및 회귀식 ····· 195
그림 3-2-52 실험 및 수치해석의 온도분포 양상 ····· 195
그림 3-2-53 U(40 mm), W자형(20 mm) 파이프 관경별 GLD 해석 결과 ····· 202
그림 3-2-54 W자형(25 mm) ····· 203
그림 3-2-55 W자형(32 mm) ····· 203
그림 3-2-56 U자형(40 mm) 설치 작업 ····· 204
그림 3-2-57 W자형(20 mm) 설치 작업 ····· 204
그림 3-2-58 코일 타입(20 mm) 설치 작업 ····· 205
그림 3-2-59 AirPocket ····· 206
그림 3-2-60 W자형 파이프(25 mm) 설치 Plane view ····· 206
그림 3-2-61 W자형 파이프(25 mm) 설치 Plane view ····· 207
그림 3-2-62 U자형 파이프(40 mm) 트리미관 삽입 모습 ····· 207
그림 3-2-63 W자형 파이프(25 mm) 배치 도면 ····· 208
그림 3-2-64 간격재를 사용한 W자형 설치 ····· 208
그림 3-2-65 에너지파일 열응답 실험 과정 ····· 210
그림 3-2-66 시간에 따른 순환수 온도 분포 ····· 210
그림 3-2-67 탐침 실험 과정 ····· 211
그림 3-2-68 화강풍화토 열전도도 실험결과 ····· 213
그림 3-2-69 등가 열물성 모식도 ····· 214
그림 3-3-1 실내모형실험에서 지하수 유동 속도에 따른 유효 열전도도의 변화 ····· 215
그림 3-3-2 지하수 흐름(왼쪽→오른쪽)의 열원 확산에 대한 영향 수치예적 ····· 216
그림 3-3-3 지하수 흐름(왼쪽→오른쪽)의 이차원 무한열원 확산에 대한 비교 ····· 217
그림 3-3-4 지하수 흐름(왼쪽→오른쪽)의 삼차원 유한 U형 열원 확산에 대한 비교 ····· 218
그림 3-3-5 지하수 흐름(왼쪽→오른쪽)의 삼차원 유한 coil형 열원 확산에 대한 비교 ····· 219
그림 3-3-6 열응답 시험에 대한 수치해석(지하수 흐름 속도=0m/yr) ····· 221
그림 3-3-7 열응답 시험에 대한 수치해석(지하수 흐름 속도=20m/yr) ····· 221
그림 3-3-8 열응답 시험에 대한 수치해석(지하수 흐름 속도=100m/yr) ····· 222
그림 3-3-9 시간경과에 따른 파이프내 유체의 온도와 이론식에 의한 등가 열전도도의 평가 (지하수 흐름 속도=0m/yr) ····· 223
그림 3-3-10 시간경과에 따른 파이프내 유체의 온도와 이론식에 의한 등가 열전도도의 평가 (지하수 흐름 속도=20m/yr) ····· 223
그림 3-3-11 시간경과에 따른 파이프내 유체의 온도와 이론식에 의한 등가 열전도도의 평가 (지하수 흐름 속도=50m/yr) ····· 224
그림 3-3-12 지하수 흐름에 의한 Peclet number에 따른 선형 모델식을 이용한 지반의 유효 열전도도의 예측 ····· 225
그림 3-3-13 지하수 흐름에 의한 열전달율의 변화 ····· 225

그림 3-3-14 단일 열교환 시스템의 TPT 실험에서 시간경과에 따른 파이프내 유체 온도와 열전달율의 변화 ····· 226
그림 3-3-15 단일 열교환 시스템에서 지하수의 흐름속도에 따른 열전달율의 변화 ····· 227
그림 3-3-16 단일 열교환 시스템에서 지하수 흐름에 의한 Pe 변화에 따른 지중의 열전달율의 변화 ····· 227
그림 3-3-17 그룹 열교환 시스템에서 지하수의 영향 ····· 228
그림 3-3-18 그룹 열교환 시스템에서 지하수의 영향(TPT 시험, 지하수의 흐름속도 = 100m/yr) ····· 228
그림 3-3-19 그룹으로 설치된 열교환시스템의 지하수에 의한 열성능의 변화 ····· 229
그림 3-4-1 Fiber Bragg Grating의 구조 ····· 232
그림 3-4-2 FBG 광섬유 센서의 멀티플렉싱 ····· 234
그림 3-4-3 모형 토조 ····· 234
그림 3-4-4 모형 토조의 단면 모양 ····· 235
그림 3-4-5 파이프 외벽 온도센서 부착과정 ····· 236
그림 3-4-6 시간(분 단위)에 따른 온도분포 ····· 237
그림 3-4-7 ln시간에 따른 온도분포 ····· 238
그림 3-4-8 파이프로부터 10cm 및 20cm 거리에서의 온도분포(FBG 센서) ····· 238
그림 3-4-9 파이프 외부 변위센서 ····· 239
그림 3-4-10 구형 압력 용기의 단면 ····· 240
그림 3-4-11 시간에 따른 파이프 변위 ····· 241
그림 3-5-1 BLCC Interface ····· 249
그림 3-5-2 RETScreen Interface ····· 250
그림 3-5-3 Energy economic analysis screen ····· 251
그림 3-5-4 The CDM economic analysis tool screen ····· 251
그림 3-5-5 수직밀폐형(Single U-Type) 채움재별 시공 단면 ····· 259
그림 3-5-6 수직밀폐형(D-U Type) 시공시 고려 사항 ····· 260
그림 3-5-7 함몰 방지 개방형 시공 단면 ····· 261
그림 3-5-8 시험시공 위치 ····· 261
그림 3-5-9 수직밀폐형(Single U-Type) 시험시공 ····· 262
그림 3-5-10 수직밀폐형(Double U-Type) 시험시공 ····· 263
그림 3-5-11 함몰 방지 개방형 시험시공 ····· 263
그림 3-5-12 생애주기비용 분석의 구성 요소 ····· 277
그림 3-5-13 기본 정보 Sheet ····· 283
그림 3-5-14 기본 정보 Sheet ····· 286
그림 3-5-15 초기 비용 산정 Sheet ····· 295
그림 3-5-16 대안별 운영비용 및 잔존가치 Sheet ····· 296
그림 3-5-17 분석결과 Sheet ····· 297
그림 3-6-1 최대부하일 냉방 운전 예시 ····· 301
그림 3-6-2 지열히트펌프 및 지중열교환기의 Zoning 예시 ····· 301
그림 3-6-3 시공 위치 ····· 302
그림 3-6-4 에너지 파일 시공 도면(개략도) ····· 303
그림 3-6-5 에너지 파일 시공 도면(상세) ····· 303

그림 3-6-6 Mockup2 축열조(Buffer-Tank) 운영 시스템 ····· 304
그림 3-6-7 직류 연결 운영 시스템 ····· 304
그림 3-6-8 에너지 파일 공사 공정 ····· 305
그림 3-6-9 PHC 파일 항타 ····· 306
그림 3-6-10 열교환기 설치 ····· 307
그림 3-6-11 Grouting ····· 308
그림 3-6-12 에너지 파일 열교환기 설치 상세 단면도 ····· 308
그림 3-6-13 트렌치 배관 ····· 308
그림 3-6-14 기계실 내부 장비 설치 ····· 309
그림 3-6-15 배관 보온처리 및 제어판넬 설치 ····· 309
그림 3-6-16 FCU 설치 및 기계실 설치 마무리 ····· 309
그림 3-6-17 자동제어 및 모니터링 프로그램 ····· 310
그림 3-6-18 에너지 파일형 지열시스템 흐름도 ····· 310
그림 3-6-19 에너지 파일형 지열시스템 시운전 Data 예시(2014년 2월 11일) ····· 311
그림 3-6-20 시간대별 외기온도 변화 ····· 312
그림 3-6-21 시간대별 실내온도 변화 ····· 312
그림 3-6-22 시간대별 시스템 COP 변화 ····· 312
그림 3-6-23 PS matching에 따른 PS 분포 ····· 315

제 5 장

그림 5-2-1 본 연구 과제의 학문적, 인력양성 측면 기대성과 및 파급효과 ····· 351
그림 5-2-2 본 연구 과제의 기술적, 경제·산업적 측면 기대성과 및 파급효과 ····· 352
그림 5-2-3 본 연구 과제의 국가이미지 제고 및 해외 시장 진출 관련성 ····· 353

표 차례

제 1 장

표 1-2-1 연차별 연구 목표 및 내용 ····· 43
표 1-2-2 참여기업 연차별 세부 추진계획 및 방법 ····· 46
표 1-2-3 연차별 세부 추진계획 및 방법 ····· 50
표 1-2-4 당해 연구개발 인적 구성 내역 ····· 53
표 1-2-5 지반 재료의 열 물성 측정 및 모형 시험 관련 시험 기기·장비 구축 내역 ····· 55
표 1-2-6 해석 및 설계 관련 인프라 ····· 56
표 1-2-7 모니터링 관련 시험 기기·장비 구축 내역 ····· 56

제 2 장

표 2-1-1 국내 저심도 지열관련 연구 기관 및 연구 실적 ····· 67
표 2-3-1 국외 협력 계획 ····· 73

제 3 장

표 3-1-1 광물 종류에 따른 입자의 밀도 및 열전도도 ····· 79
표 3-1-2 흙의 구성성분에 따른 아래첨자와 형상계수 ····· 84
표 3-1-3 흙의 열 특성 ····· 85
표 3-1-4 모래와 점토의 열전도도 및 열 확산율 ····· 86
표 3-1-5 TP08 제원 ····· 90
표 3-1-6 장비 별 열전도도 (주문진 규사) ····· 90
표 3-1-7 권역별 국내 화강 풍화토 기본 물성치 ····· 91
표 3-1-8 광물정량분석(XRD) 결과 ····· 92
표 3-1-9 석영질 흙의 함수비 변화에 따른 열전도도의 변화 ····· 94
표 3-1-10 S1의 모관흡수력에 따른 열전도도 ····· 98
표 3-1-11 W2의 모관흡수력에 따른 열전도도 ····· 100
표 3-1-12 인공신경망 학습 및 검증에 사용된 화강풍화토의 특성 ····· 115
표 3-1-13 전달함수 조합 및 모델 별 R^2 비교 ····· 116
표 3-2-1 다양한 지중 열교환기 설계 프로그램들의 설계 특성 ····· 123
표 3-2-2 다양한 열 저항 산정 방법과 해당하는 지중 열교환기 ····· 130
표 3-2-3 파이프 배치에 따른 Shape factor (Remund, 1999) ····· 132
표 3-2-4 해석 모델의 중기(R_{gm}), 단기(R_{gd}) 열 저항 ····· 137
표 3-2-5 해석 모델의 장기(R_{ga}) 열 저항 ····· 138
표 3-2-6 각 해석 모델별 설계 깊이(m) 분석 ····· 138
표 3-2-7 시뮬레이션에 적용된 재료의 열물성 ····· 148
표 3-2-8 보어홀 열저항 값 ····· 149
표 3-2-9 에너지파일의 제원 ····· 152

표 3-2-10 다중 선형 회귀분석을 위해 선정된 독립변수 및 종속변수 ····· 156
표 3-2-11 다중 선형 회귀분석 결과 ····· 156
표 3-2-12 다중 선형 회귀분석 결과 ····· 157
표 3-2-13 해석에 사용된 지하수 및 지반 물성치 ····· 160
표 3-2-14 다층 지반 열전도도 분석 ····· 179
표 3-2-15 시뮬레이션에 적용된 재료의 열물성 ····· 183
표 3-2-16 열성능 실험 기기 상세 제원 ····· 186
표 3-2-17 열성능 실험 결과 요약 ····· 189
표 3-2-18 실증 실험과 해석 모델 결과 ····· 191
표 3-2-19 실증 실험과 해석 모델 비교 ····· 191
표 3-2-20 주문진 표준사의 기본 물성 ····· 193
표 3-2-21 모형토조 실험과 해석 모델 비교 ····· 196
표 3-2-22 열교환기 파이프 Type 별 설치 현황 ····· 197
표 3-2-23 1차 Mockup Test 시공비 ····· 198
표 3-2-24 열교환기 형태별 열성능 평가 ····· 199
표 3-2-25 GLD Program 기본 입력 변수 ····· 200
표 3-2-26 U자형, W자형 1 공당 비용 분석 ····· 200
표 3-2-27 파이프 Type별 GLD Program 입력변수 ····· 201
표 3-2-28 GLD Program 열교환기 유형별 해석결과 ····· 202
표 3-2-29 파이프 유형별 작업성 평가 ····· 205
표 3-2-30 지반 시추 주상도 ····· 209
표 3-2-31 KD2 Pro 센서 제원 ····· 211
표 3-2-32 함수비에 따른 퇴적토(Ⅱ층) 열전도도 측정값 ····· 212
표 3-2-33 함수비에 따른 화강풍화토(Ⅳ층) 열물성 측정값 ····· 212
표 3-2-34 지층별 열물성 실험값 ····· 214
표 3-4-1 계측설비별 요구사항 ····· 230
표 3-4-2 측정 및 모니터링 항목 ····· 231
표 3-4-3 열응답 시험기의 제원 및 사진 ····· 236
표 3-4-4 PB 파이프 물성치 ····· 240
표 3-5-1 지하 열 자원 이용 열펌프와 석유보일러의 비용 효과 비교(Rybach and Gorhan, 2005) ····· 247
표 3-5-2 미국의 지열방전 지원 프로그램에 의한 연간 예상되는 편익(NREL, 2004) ····· 247
표 3-5-3 IGSHP의 가정용 지하 열자원 이용 열펌프의 경제성(한정상 등, 2004) ····· 248
표 3-5-4 대상건물의 개요 ····· 253
표 3-5-5 경제성 분석을 위한 재무 지표 ····· 253
표 3-5-6 LCC 분석 총 현가 ····· 254
표 3-5-7 시험시공 공법별 비교 ····· 256
표 3-5-8 열교환기 공법별 적용 설계 프로그램 ····· 257
표 3-5-9 제2여객터미널 지열 담당 월별부하(냉난방+급탕) ····· 265
표 3-5-10 제2여객터미널 지열 설계 heat pump ····· 265
표 3-5-11 설계프로그램 해석 결과 비교 ····· 266
표 3-5-12 경제성 검토 항목 ····· 267

표 3-5-13 열교환기 1개당 시공 단가 ····· 268
표 3-5-14 지열시스템 설비(열교환기 제외)비용(제2여객터미널 지열 담당 부하 기준) ····· 270
표 3-5-15 열교환기 총 시공비용 ····· 271
표 3-5-16 신·재생에너지 설비 설치비용의 국가 지원 비율 ····· 273
표 3-5-17 국내 전기 요금 체계 ····· 274
표 3-5-18 한국지역난방공사 열요금표(2013.7.1. 시행) ····· 275
표 3-5-19 경제성 program 기본 module ····· 281
표 3-5-20 프로그램 상 냉방 기술 세부 분류 ····· 287
표 3-5-21 프로그램 상 냉방 기술 세부 분류 ····· 288
표 3-5-22 에너지원 세부 분류 ····· 291
표 3-5-23 시스템에 따른 운영비용 산정 방안 - 예시(1월, 난방, 전기에너지 사용) ····· 292
표 3-5-24 감가 상각률표(법인세법 시행규칙,별표-4) ····· 296
표 3-6-1 최대부하일 냉방 운전 예시 ····· 300
표 3-6-2 지열히트펌프 운영에 따른 사용 전력 비교 예시 ····· 302
표 3-6-3 운영방안 평가를 위한 시스템 구분 ····· 305
표 3-6-4 PHC 파일 규격 ····· 306
표 3-6-5 Coil형 열교환기 파일 규격 ····· 307
표 3-6-6 무수축 mortar 배합비 ····· 307
표 3-6-7 PS matching을 위한 입력인자 ····· 314
표 3-6-8 불균형 검정 통계량 (PS mathing 전) ····· 314
표 3-6-9 불균형 검정 통계량 (PS mathing 후) ····· 314
표 3-6-10 PS matching에 따른 통계량 ····· 315

제 5 장

표 5-1-1 인천국제공항공사의 지열 활용 및 투자 검토 (안) ····· 349
표 5-3-1 참여기업(인천국제공항공사) 현황 ····· 354
표 5-3-2 참여기업 인천국제공항공사의 해외 개발 사업 추진 계획 ····· 355
표 5-3-3 참여기업과의 연계방안 ····· 356

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구 배경 및 필요성

1. 연구개발 개요

가. 저심도 지열 에너지의 활용 배경

(1) 20세기는 화석연료를 기반으로 한 고속 성장 시대였으며 산업 발전에 따른 화석연료 소비의 증가는 부존량 감소로 인한 지속적인 채굴비용 증가 및 가격 상승을 초래함. 그 결과 '에너지 안보'라는 새로운 화두가 등장하였고 특히 화석연료 사용은 과도한 CO2의 발생을 초래하여 온실가스 효과로 인한 지구온난화가 발생함.

(2) 지구온난화로 인한 전 지구적 온도 상승 및 겨울철 이상 기후(북극 빙하 이상으로 인한 초저온현상)는 인류의 냉·난방 전력 수요를 급증시켰으며 이로 인해 지속가능한 대체 냉·난방 에너지원 확보가 절실해짐.

(3) 현재의 에너지 소비 추세와 기존 화석연료 기반 발전에 의지한 에너지 사용은 탄소 배출 감축이라는 세계적 추세에 역행하는 것일 뿐만 아니라 전량 에너지 수입이라는 측면에서 국가 에너지 안보에 악영향을 미치게 됨.

(4) 화석연료의 대안으로 원자력에너지에 대한 투자가 미국, 중국 등을 중심으로 다시 급증하는 추세였으나 최근 후쿠시마 원전 사태로 인하여 모든 투자 및 기획이 보류된 상태임.

(5) 21세기 들어 대체 에너지원 및 에너지의 새로운 활용방안에 대한 연구가 폭발적으로 증가하였으며 풍력, 태양광, 지열, 바이오, 소수력 등의 신재생 에너지 개발에 대한 투자가 급증함.

(6) 삶의 질 향상 및 에너지 자립이라는 측면에서 냉/난방에 대한 탄소 중립적이며 친환경적인 대체 에너지원 개발이 요구되었으며 다양한 신재생 에너지원 중 접근성 및 경제성에서 저심도 지열 에너지(geothermal energy)가 가장 효율적으로 평가되고 있음(DOE, 2001). 그러나 현재까지 지중 열 교환기, 구조물 매입형 지중 열 교환 기술, 지열 히트펌프, 열 교환 설비 설계 등과 같이 지열 교환 및 활용이 주 연구 개발 대상으로 고려되어 왔음.

(7) 저심도 지열 에너지 기술은 연중 약 10~15℃의 온도를 유지하는 저심도 지반(50m~200 m 심도 이내의 토사 및 암반)을 여름철에는 냉방원(cooling source)으로 겨울철에는 열원(heating source)으로 활용하는 에너지 전환기술로써 우리나라와 같이 여름과 겨울의 계절 특성이 뚜렷한 기후에 가장 적합함(그림 1-1-1). 국내의 경우 서울시 청사를 시작으로 지열을 이용한 냉/난방 시스템을 관공서에 적용하고자 하는 정책이 추진되고 있는 상황임.

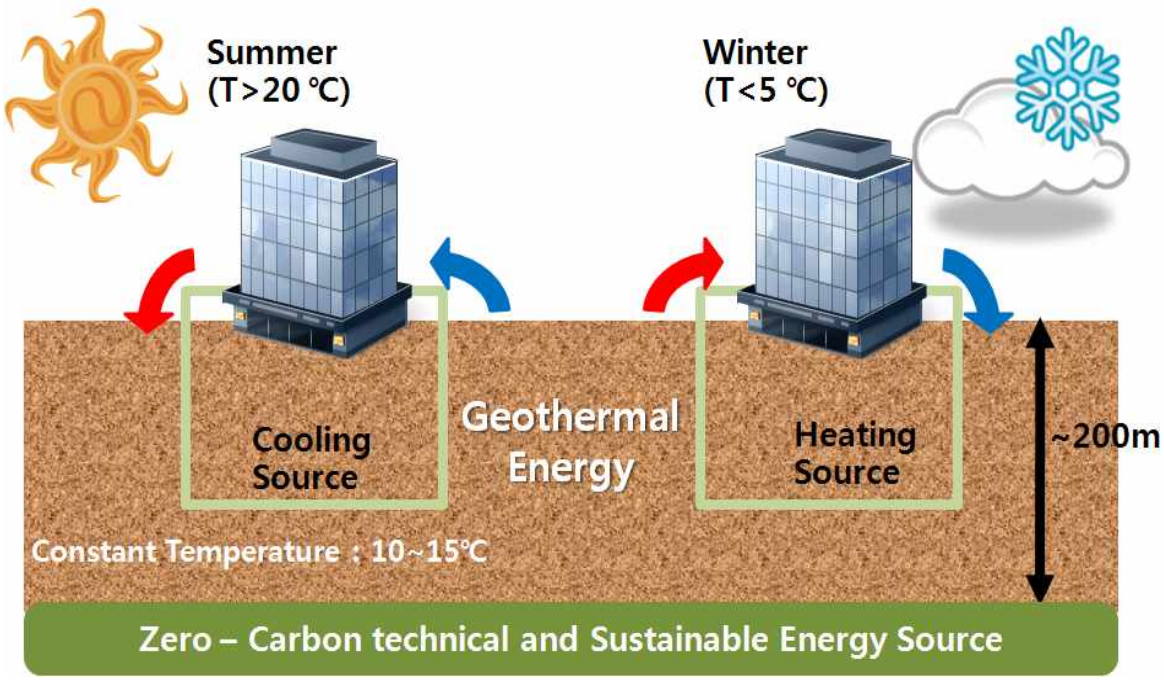


그림 1-1-1 저심도 지열 에너지의 활용

나. 열 에너지의 저심도 지중 저장 기술

(1) 기존 신재생 에너지 관련 연구가 에너지의 생산, 전달, 분산화, 소비에 관련된 연구가 주관심사였던 반면 최근 연구 개발 동향은 에너지의 생산과 소비 간 불균형을 완화하는 것에 대해 집중되고 있으며 이를 위한 에너지 저장(energy storage)이 주요 이슈로 떠오르고 있음. 특히 충전이 가능한 전력과 달리 열에너지의 저장 및 재이용에 대한 IEA (International Energy Agency)의 ECES(Energy Conservation through Energy Storage) 프로그램에 따라 지중에 높은 온도로 열 에너지를 저장하는 국제 협력이 진행 중임.

(2) 지중 열에너지 저장 기술 (Underground Thermal Energy Storage)은 기본적으로 크게 대수층 지하수에 열에너지를 저장하는 대수층 열 에너지 저장 (Aquifer

Thermal Energy Storage; ATES)기술과 다수의 지중 열 교환기를 배열식(array-type)으로 저장하는 시추공 열에너지 저장(Borehole Thermal Energy Storage; BTES)기술로 나뉨.

(3) ATES의 경우 적은 수의 연직 시추공을 필요로 하고 지하수의 열 특성이 주 고려 대상이기 때문에 시공 및 설계 관점에서 용이한 특성을 갖고 있어 좋은 저장 수단으로 인정받고 있으나, 지층 내에 대수층이 존재해야하고 대규모 영역을 고려해야 되는 점에서 지질 및 공간 제약이 있으며 특히 도심지와 같은 경우 그 적용이 더욱 제한적일 수 있음. 또한 상대적으로 저온 상태로 열에너지가 저장된다는 문제점이 있음.

(4) BTES의 경우 ATES와 달리 지질 및 공간 제약이 적은 반면, 다수의 연직 시추공의 시공이 요구되고 지반의 열-수리 연동 거동이 열 저장에 중요한 역할을 담당하고 있어 실제 지반의 다공질 재료의 구성 특성, 지하수위 변동 및 지표면의 온도 변화 등 지반공학적 특성이 열 저장 및 전환 특성에 중요한 영향을 미치게 됨(Bauer 등, 2009). 기존 지열 교환기를 이용한 열 전환 기술의 열 성능계수 CoP(Coefficient of Performance)가 3.5 정도인데 비해 BTES 기술은 4에서 8정도의 CoP를 갖고 있는 것으로 알려져 있음. 또한 상대적으로 높은 온도의 열에너지 저장이 가능하고 비교적 작은 부지 면적에 대해서도 설치가 가능하여 중대형 구조물의 기초 부지에 설치될 수 있다는 장점을 가지고 있음.

(5) 저심도 지열에너지에 대해 선진국 (독일, 오스트리아, 미국, 일본 등)을 중심으로 계절 특성을 고려하여 열 에너지를 지중에 저장한 후 활용하는 방안에 관한 다양한 연구개발이 이루어지고 있음. 기본적인 메커니즘은 그림 1-2에 도시한 바와 같이 여름의 높은 외부 열에너지를 지중에 저장하여 겨울에 열원으로 활용하고 겨울의 낮은 외부 열에너지를 저장하여 여름에 냉방원으로 활용하는 것임.

(6) 에너지 중립형 무탄소 도시(zero-carbon city)에 대한 전 세계의 이목이 집중되면서 풍력, 태양광 등에 의해 생산된 에너지를 저장하는 시스템(이하 하이브리드 저장 시스템)에 대한 연구개발이 활발해지고 있으며 이 중에서도 저심도 지반을 열 저장 공간으로 한 하이브리드 에너지 저장 기술 개발이 독일, 영국, 스웨덴, 미국, 캐나다 등의 선진국을 중심으로 진행 중임.

(7) 특히 태양열 전환 기술의 획기적인 발전으로 인해 단독 가옥 및 중대형 상업 건물의 에너지 효율을 높이기 위해 태양열 에너지의 지중 저장을 통한 냉난방 효율 개선 대한 연구가 활발히 진행 중이며 도로 및 노반의 폐 복사열을 저장한 후 재이용하는 시스템의 설계 방안이 제시되고 있음.

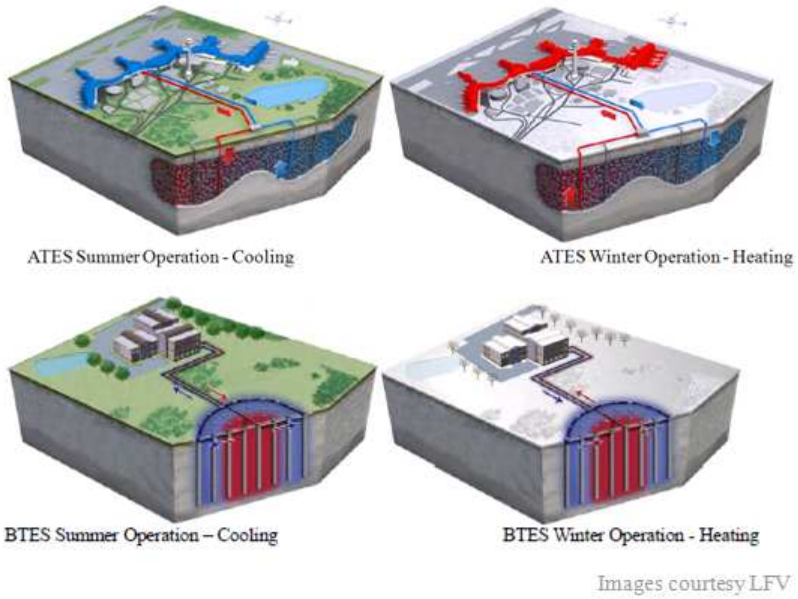


그림 1-1-2 ATES와 BTES 기반 저심도 지중 열 에너지 저장 기술

다. 저심도 지중 열 에너지 전환/저장/활용을 위한 당해 연구 개발 개요

(1) 상대적으로 기술 완성도가 높은 ATES에 비해 BTES에 기반한 지중 열에너지 전환/활용/저장 기술은 설계 및 시공에 대한 구체적인 가이드라인 마련이 쉽지 않은 상황으로써 향후 실제 적용 및 사업화를 위해서는 많은 연구 개발이 요구됨. 당해 연구 개발 과제에서는 BTES 형태의 지중 열에너지 전환/활용/저장 시스템의 설계 및 성능평가와 관련하여 아래와 같은 사항의 개선을 위한 연구개발을 수행하고자 함 (그림 1-1-2).

(가) 지반의 열 특성, 지반의 포화도, 지하수위 변동, 지반의 포화도, 지표면 온도변화, 상재하중 등에 의한 외부 환경 요인이 전체 시스템의 열효율에 중요한 영향을 미치고 있음에도 불구하고 지반 열 특성에 대한 연구는 물론 열 특성이 열 저장 및 교환 특성에 미치는 영향에 대한 선행 연구가 미비하므로 이에 대한 연구개발이 요구됨.

(나) BTES 시스템은 다수의 지중 열 교환기를 요구하기 때문에 상대적으로 높은 초기 시공비를 요구함. 따라서 요구되는 열 저장·전환량을 충족시키기 위해 최적 지중 열 교환기 설계 및 초기 시공비 회수를 위한 최소 운용 기간에 대한 비용-편익 평가가 수반되어야 함. 이를 위해서는 지중 열 교환기의 형식(U형 또는 코일형), 길이, 공간 배치 및 토사와 암반 영역의 연중 열 특성 변화를 고려한 열성능 계수 (CoP)의 결정 및 장기 지반 열 거동 평가 등을 포함하는 합리적 설계 기법이 요구되나 현재까지 제안된 방안들은 다양한 가정과 지나치게 단순화된

이론식에 기초한 설계 사례가 대부분이며 이는 장기 거동 평가에 적합지 않은 것으로 판단됨.

(다) 지열 에너지 저장을 위해 적용되는 지열 교환기는 장기간(평균 30년 이상, 최대 50년)에 걸친 사용성이 확보되어야 경제성을 갖게 됨. 따라서 지반의 장기 변형, 상부 구조물의 하중, 기후 변화, 시멘트 수화열 등의 원인으로 인한 기계적, 열적 손상을 고려한 성능 저하 평가 모니터링 기술에 대한 연구개발이 요구되며 이를 위해서는 광범위한 지반 영역과 다수의 지열 교환기에서의 열 저장 및 전환 효율의 평가를 위한 광대역 센싱 및 모니터링 기술이 요구됨. 현재까지 단일 지열 교환기에 대한 열 응답 특성 모니터링 기술은 개발 되고 있으나 본 연구개발 대상인 BTES 시스템과 같이 광대역 지열 저장 및 교환 시스템에 적합한 센싱 기술의 선정 및 열 특성의 역추정에 대한 연구개발이 이루어지지 않아 측정 자료를 기반으로 하는 시스템 성능 평가에 어려움이 있음.

(라) BTES의 적용성 확대에 있어 가장 개선이 시급한 부분은 구조물 기초 이외에 지열 교환기를 추가로 설치해야 한다는 점이며 이는 상당한 추가 시공 비용을 초래하고 상부구조물의 규모가 커질 경우 기초 안정성에도 영향을 미칠 수 있음. 따라서 말뚝 등의 기초 구조물을 활용하여 시공비를 낮추고 기초 안정성에 영향을 미치지 않을 수 있는 일체형 지열 전환 구조물 등의 다양한 형태의 지열 교환 기초 구조물에 대한 지중 열 저장에 대한 연구 개발이 요구됨.



그림 1-1-3 본 연구개발 과제의 개요

2. 연구개발의 중요성

가. 기술적 중요성

저심도 지반의 열 특성에 대한 데이터베이스 구축 및 열전도도 예측 모델 개발의 중요성

(1) 열에너지의 지중 저장과 지중 열 에너지의 전환 및 활용에 있어서 가장 중요한 공학적 요소는 지반과 열 교환 구조물 간의 상호 열 전달임. 따라서 합리적인 열 효율 평가를 위해서는 지반 재료의 열 전달 특성, 특히 열 전도도에 대한 정량적인 평가가 요구됨.

(2) 지반의 열 전달 특성은 지반 재료에 따라 고유의 특성을 갖고 있으며 동일한 지반 재료라고 하더라도 외부적 요인(포화도, 간극비, 온도, 지하수위, 상재하중 등)에 따라 다름. 특히 연중 기후 변화가 지반 열특성에 미치는 영향 또한 상당한 것으로 알려져 있음(Bauer 등, 2009).

(3) 기존의 지열 교환 구조물의 설계 시 적용되는 다양한 설계지침(스위스 SIA Norm 382/384, 독일 VDI-4640)에서는 위에 언급 된 외부적 요인에 대한 열물성의 변화를 고려하지 못하고 있으며 대신 현장 열 응답 시험에서 얻어지는 열 교환 거동으로부터 추정된 지반의 열 전도도를 실무에 반영하고 있는 실정임. 일반적인 지열 교환 구조물은 적게는 30년 길게는 50년 간 작동을 하는 반면 현장 열 응답 시험은 48시간 정도의 단기간에 대한 현장의 열 전달 거동에 대해서만 수행되는 것이므로 장기적인 지반 내·외부적 환경 변화에 따른 열 전달 변화 특성을 나타내는데 무리가 있음.

(4) 합리적인 지열 전환·저장·활용 시스템의 설계를 위해서는 주요 토사 및 암반 재료에 대하여 앞서 언급한 다양한 환경 변화요인이 고려된 열 특성 평가를 위한 실험 방법(예: 탐침법, 열판법, 섬광법)의 적용성에 대한 평가가 요구되며 이를 바탕으로 한 데이터 베이스화가 이루어져야 함. 더 나아가 정량적인 지반 지수 (입도분포, 함수비, 간극비 등)를 활용한 열 특성 예측 모델의 개발은 실무적인 활용성을 높여줌. 특히, 기존 외국의 열 특성 예측 모델의 경우 대부분 모래 또는 점토와 같은 균질 재료에 대해 제안된 반면 국내의 풍화토 및 풍화암 등과 같은 지반 재료에 대한 열 특성에 대한 연구는 미비하므로 이에 대한 개선이 필요함 (그림 1-1-4).



그림 1-1-4 지반의 열 특성에 대한 데이터베이스 구축 및 예측 모델 개발

복잡한 지반 거동 특성을 고려한 지반 내 열전달 해석 기술의 중요성

(1) 지반 재료의 열 거동 및 지반-열 교환기 열 전달 모델링 기술 개발의 중요성

(가) 지중 열 에너지 저장 시스템의 에너지 효율 평가를 위해서는 지반의 열 전달 특성 및 다중 지열 교환기가 설치된 3차원적 공간 특성을 고려한 지반 내 열 전달 해석 기술이 필요하나 현재까지는 실제 지열 교환기 설치 조건을 단순화한 선형열원이론, 실린더 열원 모델 등의 이론적 방식의 적용을 통한 해석 또는 개별 실험 사례에 대한 복잡한 수치해석 모델에 기반한 해석이 주를 이루고 있음.

(나) 열 전환/활용/저장 시스템의 사실적 거동 평가를 위해서는 실제 지반의 수리 및 역학적 특성 (특히 지하수위 변동)이 지반의 열적 특성에 미치는 영향을 고려한 지반의 열전달 모델의 개발과 지중 열 전환/저장/활용 시스템의 공간적인 복잡성을 단순화시킨 실용적인 등가의 해석 모델 개발이 요구됨. 지열 교환기의 형상 (U형 또는 코일형) 및 지열교환기의 격자형 배치와 같은 복잡한 기하학적 형상에 대한 지반-지열 교환기 간 열 교환 거동을 합리적으로 나타낼 수 있는 등가의 모델링이 필수적으로 요구됨 (그림 1-1-5).

(다) 실제 지반의 열전달 거동은 열교환기에서의 열평형뿐만 아니라 지표 및 지중의 열 흐름과 지하수의 흐름 등을 포함한 매우 복잡한 현상(Brandl, 2006)임. 정확한 지중 열거동 시뮬레이션을 위한 다공질 재료(porous material)에서의 다상의 흐름(multiphase flow)과 열의 흐름(heat flow)에 대한 연구는 열 저장 시 지반 및 암반 재료의 역학적 거동 변화까지 표현할 수 있는 열-수리-역학적 연동 구성모델의 개발이 요구됨 (그림 1-1-5).

(2) 실용적 설계 알고리즘 및 프로그램의 개발

(가) 앞서 언급한 흙의 열-수리-역학 구성 모델의 개선이 이루어지더라도 해당 모델을 실제 설계 문제에 직접 적용하는 것은 해석량의 방대함으로 인해 비경제적일 수 있음. 따라서 합리적인 설계 방법의 도출을 위해서는 해석 기반 시뮬레이션으로부터 실제 거동에 중요한 영향을 미치는 주요 설계 인자 및 영향 정도를 평가하고, 이를 바탕으로 기존의 선형 열원이론 또는 실린더 열원 모델을 실제 지반의 열교환 거동을 고려하여 보완하는 것이 요구됨.

(나) 지하수위 변동 및 흐름에 따른 지중 열전달 거동의 변화, 각각 다른 열전달 특성을 갖는 다층지반에서의 열 저장-교환 거동에 대한 고려 또한 요구되며 최종적으로는 간편하면서도 정확성을 제공할 수 있는 실무적인 프로그램 개발이 이루어져야 함.

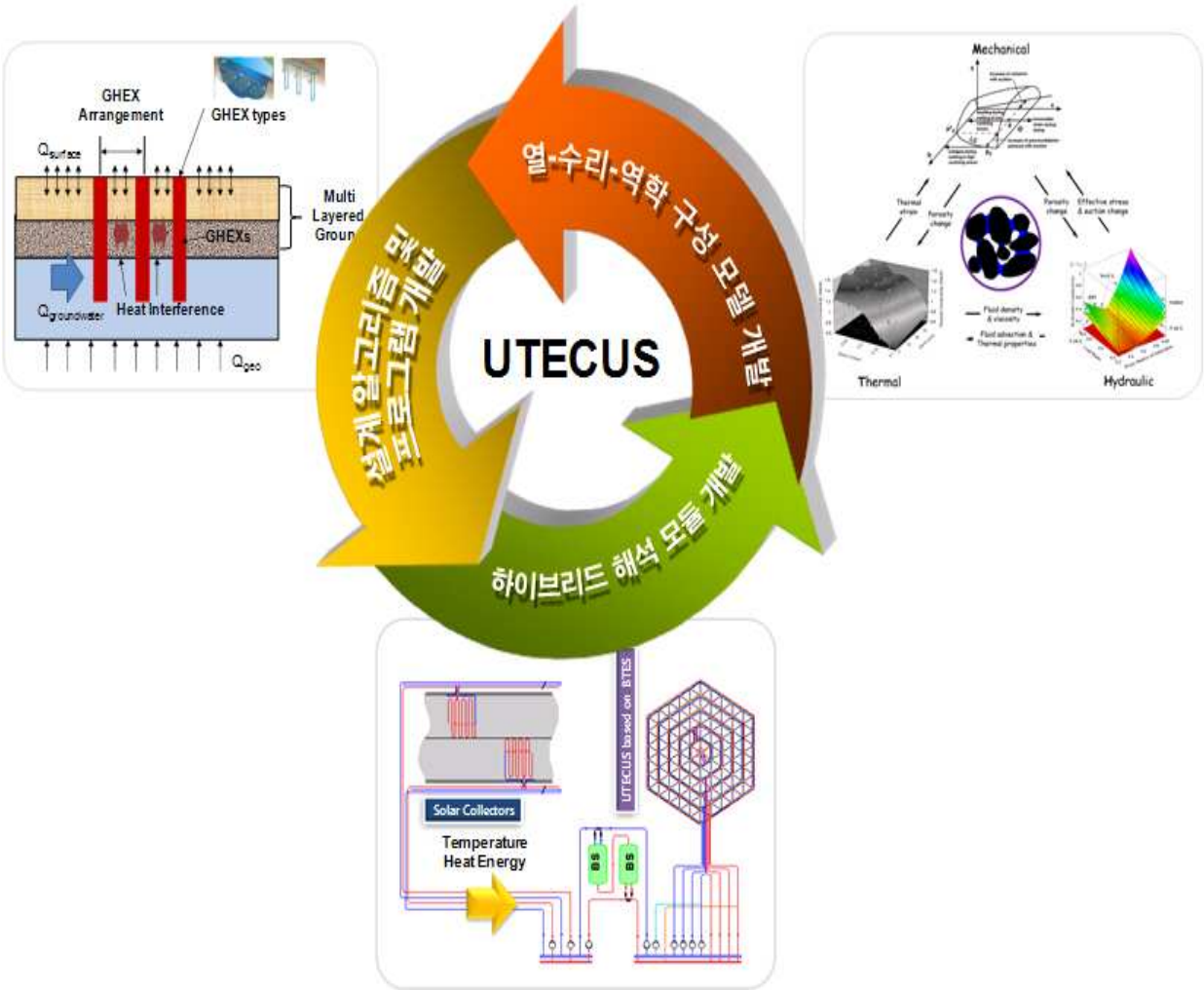


그림 1-1-5 지반 내 열전달 해석 기술의 개선

(3) 하이브리드 시스템 모사를 위한 해석 모듈 개발

(가) 하이브리드 지열 냉난방 시스템의 장점은 지중의 안정적인 에너지를 활용할 수 있기 때문에 기존의 지열 히트펌트보다 연간 에너지 소비량을 30~50%절감할 수 있는 것으로 알려져 있으며, 특히 UTECUS와 같은 계절적 열 저장 특성을 갖는 시스템의 경우 하/동절기 온열 및 냉열을 지중에 저장하여 더 좋은 열효율을 얻을 수 있음.

(나) 하이브리드 지열 냉난방 시스템은 크게 두 가지로 나뉠 수 있음. 첫째는 풍력 및 태양전지판으로부터 얻어지는 전기를 히트펌프에 직접 공급하여 성능 계수 CoP를 향상시키는 방법이고 다른 하나는 태양열 패널 또는 아스팔트 등의 하부에 열 교환기를 설치하여 열을 회수하고 지중에 저장하는 방법임.

(다) 따라서 태양, 풍력 등과 같은 전력원을 이용한 성능계수 개선을 평가하기 위해서나 태양열, 도심지 폐열(waste heat)의 직접적인 회수 및 저장 시스템을 설계하기 위해서는 외부 열 공급 및 열 경계 모델과 같은 추가적인 사항을 고려한 해석 모듈 개발이 시급하다고 할 수 있음.

UTECUS 시스템의 광대역 모니터링 및 성능평가 기술 개발의 중요성

(1) 기존의 지열 에너지 관련 모니터링은 유입구(inlet)와 유출구(outlet)에서의 온도와 유입/유출 열량에 대한 계측이 주를 이루어져 왔으며 최근 연구자들에 의해 지열 교환기 길이방향에서의 연속적인 온도 분포 프로파일을 측정하는 연구가 수행되어왔음.

(2) 기존 방법은 지열 교환기의 열 교환 성능을 평가하는 것은 물론 지반의 열 전달 특성(특히 열 전도도)에 대한 등가 값 또는 깊이별 분포를 파악하는 것을 목적으로 하고 있음.

(3) 현재까지 BTES와 같은 광대역 시스템 계측에 대한 사례 및 열에너지의 저장/전환/활용 시스템의 열적 안정성 평가에 대한 연구는 거의 보고되지 않고 있으므로 이에 대한 선행 연구 개발이 필요함.

(4) 전체적인 거동 및 국부적인 거동을 합리적으로 평가할 수 있는 스마트 계측 시스템의 개발이 요구되며 더 나아가 3차원 공간에서의 열 저장/전환 특성은 물론 개별 지열 교환기에서의 상세 열 거동 특성을 평가할 수 있는 역산 기법 개발 또한 필요함 (그림 1-6).

(5) 또한 실시간 열적 안정성 평가를 위해서는 계측된 데이터를 취합 및 분석할 수 있고 시스템 관리자에게 위험도를 통보할 수 있는 IT 기반의 모니터링 플랫폼 개발이 요구됨.

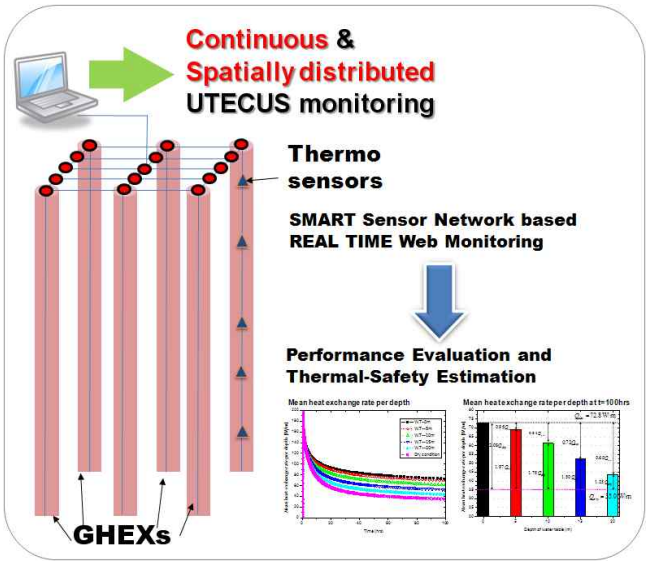


그림 1-1-6 UTECUS 성능평가를 위한 스마트 모니터링 네트워크

나. 경제산업적 중요성

지열 전환/활용/전환 시스템의 비용-편익 분석 모델 제공을 통한 사업화 유도

(1) 지중 열 전환/저장/활용 기술의 적용은 기본적으로 화석 연료 및 여타 신재생 에너지군에 비해 냉/난방 등에 있어 좋은 효율성을 나타내는 것에 기인함. 그러나 설계 단계에서의 적절하지 못한 열 전환 및 저장 성능 평가는 지열 교환기의 개수, 길이 및 분포 형태의 부적절한 예측을 통한 초기 시공비의 추가 부담으로 작용하여 냉난방 에너지 절감 목표와 동떨어진 성능을 야기할 수 있음.

(2) 지반공학적 관점에서 살펴볼 때, 위와 같은 문제에 대해 설계 단계에서 문제가 될 수 있는 지반의 열 전달 특성, 기후 변화, 지하수위 변동 및 열 전환 메커니즘에 대한 이해를 통해 올바른 시스템의 성능 예측이 요구됨. 따라서 보다 합리적인 설계방법에 기초한 지중 열 전환/저장/활용 시스템의 성능 계수 산정은 UTECUS 시스템의 경제적 비용-편익 분석에 있어 중요한 요인이 될 것으로 사료됨.

(3) 현재 경제적 타당성 분석기술의 부재 및 미비한 설계 방안과 같은 문제를 겪고 있는 저심도 지열 관련 기술 보유 업체와 함께 당해 연구개발 과제로부터 도출되는 설계

및 성능 평가기술을 사업화하게 된다면 설계-시공-유지관리 분야를 통합적으로 수행하는 시너지효과를 얻을 수 있고 현재 정부에서 점차적으로 의무화하는 신재생 에너지 설비 구축 시장에서 높은 부가가치를 획득할 수 있을 것으로 사료됨.

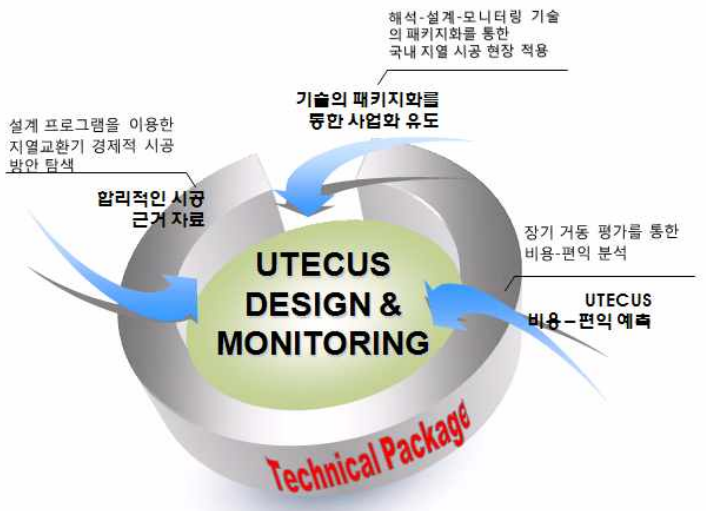


그림 1-1-7 설계프로그램 및 경제성 평가 모델 개발을 통한 사업화 유도

무탄소 도시 구축을 위한 필수 기술로써의 중요성 및 다양한 활용 방안

(1) 정부는 녹색 국가 성장전략(녹색성장위원회, 2009) 및 신재생에너지 산업발전전략(지식경제부, 2010)을 통해 향후 탈석유·에너지 자립강화, 녹색 건축물 확대 및 신재생에너지 설비의 확대를 목표로 에너지 정책을 수행하고 있으며 당장 2011년 신재생에너지 시범도시 사업부터 이를 구체화할 방침임.

(2) 지중 열 전환/저장/회수 시스템은 냉/난방에 대해 현존하는 기술 중 가장 좋은 에너지 효율을 나타낼 뿐만 아니라 향후 탄소 배출권 확보와 직결된 CO2 발생을 획기적으로 감소시키는 녹색 재생 에너지로 평가받고 있기 때문에 국가적으로 추진되고 있는 '에너지 중립적 무탄소 도시'의 성공적인 열 에너지 기반 기술로써 성장 요인을 가지고 있음.

(3) 해외의 사례에 비추어 볼 때 도심지에 적용되는 지중 열 전환/저장/회수 시스템은 중대규모 빌딩에서 얻어지는 태양열 에너지를 저장하는 하이브리드 에너지 저장소 시스템으로 활용되는 것과 동시에 하·동절기의 열섬현상 및 도로 결빙 등에 의한 피해를 저감할 수 있는 좋은 기술적 솔루션을 제공하는 것으로 알려져 있기 때문에 냉/난방 이외에도 보다 광범위한 적용 기술의 개발은 경제적 효과를 제공할 수 있을 것으로 판단됨(그림 1-8).

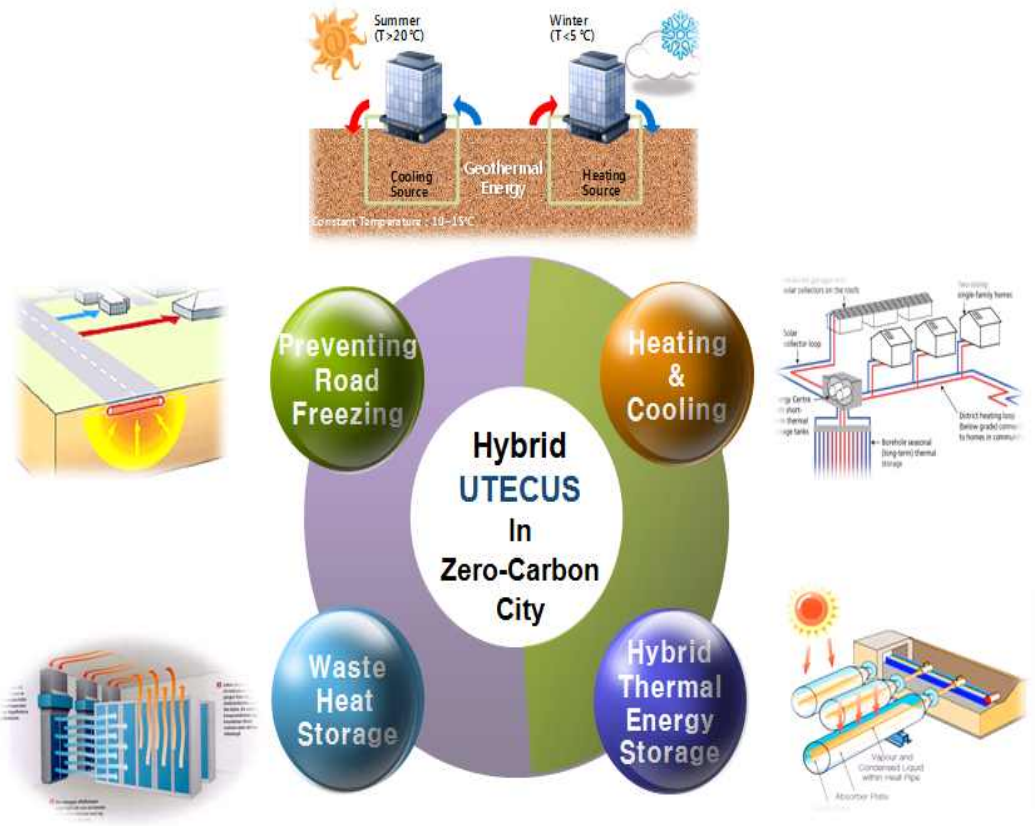


그림 1-1-8 무탄소 도시 내 UTECUS의 적용

고부가가치 토목 지반기술 시장의 형성

(1) 전세계적인 신재생 에너지 개발 및 활용에 대한 산업 구도의 재편으로 인해 토목 산업도 단순한 역학적 엔지니어링에서 벗어나 풍력, 바이오 매스, 가스 하이드레이트, CO2 저장 등과 같은 다학제적 연구 개발 및 산업 투자에 대한 붐이 일고 있음.

(2) 지열의 경우 3km 정도 깊이 이하 영역 대에 대한 심부 지열 또는 저심도 지반에 설치한 지열 교환기를 이용한 냉/난방 공조 시스템에 대한 연구가 지질 및 기계 공조 시스템 분야를 중심으로 다루어지다가 최근 들어 한국지반공학회 등의 학계를 중심으로 지반공학적인 접목이 이루어지고 있음.

(3) 해외의 경우 이미 20여년 전부터 오스트리아, 독일, 노르웨이 등의 EU 선진 국가를 중심으로 Energy Geotechnical Engineering에 대한 연구개발이 수행되어 왔으며 스위스 및 독일의 경우와 같이 SIA Norm 382/384, VDI-4648와 같은 시방서가 나올 정도로 수준 높은 기술 개발이 이루어져 왔음(Sanner et al, 2005).

(4) 저심도 지열 전환/저장/활용 시스템은 지반의 열적 거동이라는 지반공학만이 고려할 수 있는 연구 독창성은 물론 시공과 활용에 있어서 기초 구조물 및 포장 분야와의 접목을 통해 토목 분야 내에 고부가가치 연결 고리를 마련하고 공항, 플랜트, 물류 부지에 접목하는 등 다양한 사업화를 꾀할 수 있다는 장점을 가지고 있음. 따라서 당해 연구과제에서 개발하고자 하는 사항은 향후 UTECUS의 다양한 활용에 있어서 중추적인 역할을 담당할 수 있을 것으로 사료됨 (그림 1-1-9).

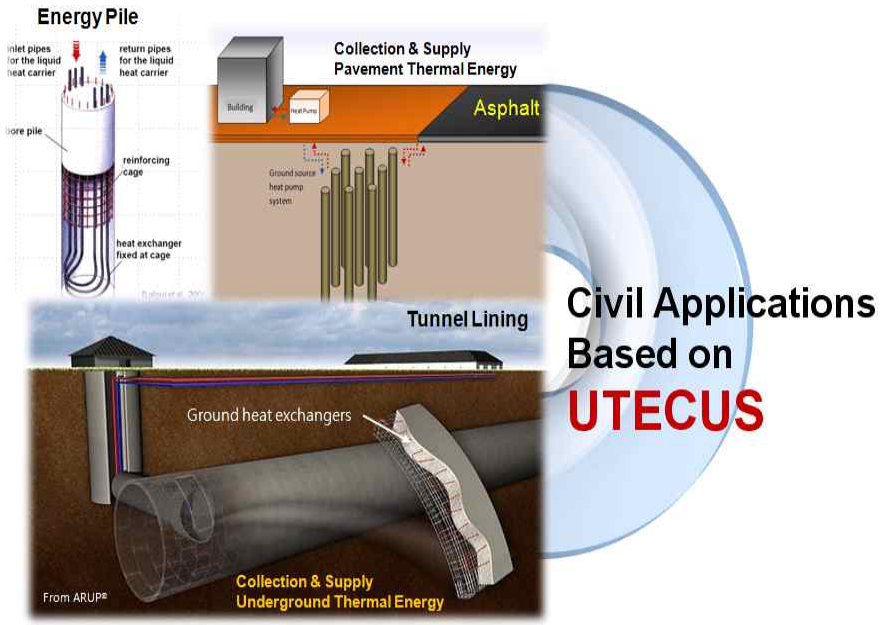


그림 1-1-9 UTECUS를 활용한 고부가가치 토목 지반 지열 기술 시장 발굴

다. 사회문화적 중요성

(1) 친환경 그린 기술
(2) 토목 산업의 인식 제고
(3) 지열에 대한 관심 증대를 통한 다학제적 융합 연구의 추진

제 2 절 연구 목표 및 내용

1. 연구 최종 목표

본 연구개발의 최종 목표는 **“다양한 신재생에너지원의 효율적이고 경제적 활용을 위한 지반 조건을 고려한 지중 열에너지 전환·활용·저장 (Underground Thermal Energy Conversion, Utilization, and Storage; UTECUS) 시스템의 설계 및 성능평가 기술 개발”**로써 이를 위하여 아래와 같은 세부 및 세세부 목표를 설정하였음.

가. 지중 열에너지 전환·활용·저장 기반 기술 개발

(1) 국내 저심도 지반의 열전달 특성 데이터베이스 구축 및 인공신경망 기반 물성 추정 프로그램의 개발

(2) 국내의 불포화 다공질 재료에 대한 열-수리-역학적 구성 모델 개발 및 완전 결합된 열-수리-역학적 유한요소프로그램 개발을 통한 UTECUS 시뮬레이션

(3) 하이브리드 열 에너지 지중 저장 능력 및 경제성 평가 모델 개발

나. 지열에너지 지중 저장 시스템 설계 기술 개발

(1) 지중 열안정성 및 열환경 평가 기술 개발

(2) 합리적 시공 방안 마련을 위한 지중 열교환기(GHE) 최적 배치 제시

(3) 지중 열에너지 저장시스템 설계 알고리즘 및 프로그램 개발

(4) 하이브리드 에너지 저장 해석을 위한 열원모델 모듈의 개발

다. UTECUS 스마트 모니터링 기술 개발

(1) 스마트 센서 네트워크 기반 광대역 UTECUS 모니터링 기술 개발

(2) 손상부위 탐색 및 에너지 플럭스 위험 통보 기술

(3) 모니터링 기반 성능평가 기술 개발

2. 연구 목표 및 내용

표 1-2-1 연차별 연구 목표 및 내용

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	▪ 지반 조건을 고려한 지중 열 물성 D/B 구축 및 평가 기술 개발 (I)	▪ 국내 주요 화강 풍화토 및 암반의 열 물성 변화 특성 실험 수행과 데이터베이스 구축
	▪ 지반의 열전달 거동 모델 개발 (I)	▪ 포화/불포화 다공질 지반에 대한 열-수리-역학적 구성 모델의 개발 ▪ 다공질 재료의 열-수리-역학적 지배 방정식에 의한 유한요소 프로그램 개발
	▪ 지열 전환 및 저장 해석 모델 개발 (I)	▪ 기초 구조물 매입형 지열 교환기와 주변 지반 간 열적 상호 거동 해석 기법 개발 ▪ 지열 교환 파이프의 배치 형태 (U 또는 코일형)를 고려한 해석 기법 개발
	▪ 경제성 분석 및 예측 기법 연구	▪ 기존 경제성 분석 사례 조사 및 합리적 예측 기법 도출
2차년도	▪ 지반 열 물성 추정 프로그램 개발	▪ 광물 특성, 지반 함수비, 간극비 등의 지반의 기본 물성치를 활용한 인공신경망 이론 기반 열특성 추정 모델의 개발 ▪ 사용자 친화적 인터페이스를 갖춘 열특성 추정모델 프로그램 개발
	▪ 지반의 열전달 거동 해석 모델 개발 (II)	▪ 개발된 열-수리-역학 유한요소 프로그램을 이용한 UTECUS 지열 저장거동 매개변수 해석 ▪ 하이브리드 지중 열 저장 능력 및 지하수위, 지표면 온도 변화 등에 의한 장기적인 효율성 및 지중 열환경 평가
	▪ 지열 전환 및 저장 해석 모델 개발 (II)	▪ 불균질한 지반의 열전달 특성을 고려한 지열교환기-지반 열 교환/저장 거동 해석 기법 개발 ▪ 다층 지반 및 지반의 불균질성을 고려한 등가 열 물성계수 역해석 기법 개발
	▪ 시공 경제성 평가 및 운영 중 지반 열 환경 평가 연구	▪ 지열교환기 배치 간격으로 인한 열간섭 효과에 대한 연구 ▪ 열교환 파이프 배치 형태 및 간격별 열효율 평가 ▪ 광대역 지반의 장기 열 저장/전환 거동 평가
	▪ UTECUS 스마트 모니터링 네트워크 개발	▪ 핵심 계측 인자 및 계측 지점 도출 ▪ 다중 계측 센서 배치를 통한 스마트 모니터링 네트워크 시스템 개발
	▪ 1차 Mockup 시험 수행	▪ 설계, 모니터링 기술 및 경제성 평가 모델 검증을 위한 Mockup 시험 수행
3차년도	▪ 하이브리드 UTECUS 설계 프로그램 개발	▪ 하이브리드 에너지 및 에너지 피크부하를 고려한 지열에너지 전환/활용/저장 시스템 해석 프로그램의 개발 ▪ 경제성 분석 보고서 작성
	▪ UTECUS 스마트 모니터링 유닛 개발	▪ 계측된 열/온도 데이터 수집/분석 시스템 개발 및 단일 유닛화 ▪ 온도/열 흐름 분석을 통한 손상 위치 추정 기술 개발 ▪ 실시간 열효율 및 손상 위험도 대한 통보 시스템 개발
	▪ 2차 Mockup 시험 수행을 통한 기술 패키지 구축	▪ 설계 및 평가 기술의 적용성 검증 ▪ 실증 실험을 통한 경제성 검증 ▪ 모니터링 시스템 및 프로그램의 보완 및 수정을 통한 통합화

3. 연구개발 추진 전략 및 방법

가. 연구개발 추진전략

(1) 연구개발 추진체계

(가) 추진 체계

① 본 연구에서의 연구 추진 전략 및 방법은 연구 내용을 연구 목표에 따라 전략적으로 **Ⓐ 지중 열에너지 전환·활용·저장 기반 기술 개발, Ⓑ 지열에너지 지중 저장 시스템 설계 기술 개발, Ⓒ UTECUS 스마트 모니터링 기술 개발** 이라는 3개 분야로 나누어 주관 연구 기관인 KAIST (울산대학교 신호성 교수 연구실 참여)와 참여 기업인 '인천국제공항공사 연구개발단'이 효과적인 연구를 위하여 협력 진행하며, 업무의 분담은 각 기관의 인프라, 기존 연구 개발 실적, 기관 성격에 따른 달성 성과의 부합 여부에 따라 결정.

② 국내 저심도 지반의 열전달 특성 데이터베이스 구축 및 인공신경망 기반 물성 추정 프로그램의 개발은 기존 토사 열 전도도 실험 시설 및 전문 열 전달 분석 인프라를 구축하고 있고 지반 물성 추정에 대한 인공신경망 이론에서 연구 성과를 나타낸 KAIST 연구팀에서 담당하며 Soil Vision을 벤치마킹한 사용자 친화적인 프로그램을 개발하고자 함. 인천국제공항공사는 실험을 위한 시료 채취 및 현장 제공.

③ 열-수리-역학적 거동에 대한 구성모델과 유한요소 프로그램의 개발은 기존 KAIST 연구팀의 불포화 수리-역학 거동 연구와 더불어 지반의 열-수리-역학 연관 거동 해석에 있어 세계적인 신진연구인력으로 평가받고 있는 울산대학교의 신호성 교수 연구팀을 참여연구원 방식으로 협력하여 완전 연관(fully- coupled)된 지반의 구성 모델과 수치 해석 기법을 공동 개발하고 실내 실험 (KOCED 지오센트리퓨지 실험 센터 장비 활용)을 통한 모델의 검증을 수행함. 이를 바탕으로 하이브리드 지중 열 저장 능력 및 경제성 평가 모델 개발을 위한 다양한 수치해석을 수행하게 됨.

④ 현장지반 조건을 고려한 지중 열에너지 전환/활용/저장 해석 기법 개발에 있어서는 지반의 거동 특성에 대한 수치해석적인연구 및 해석 프로그램에 많은 경험과 연구 성과를 기반으로 한 KAIST 연구팀이 담당하여 해석 모델 개발과 프로그램화를 진행함.

⑤ UTECUS 모니터링 기술 개발에 있어서는 스마트 센서 네트워크를 활용한 현장 지반의 거동 계측 및 실시간 모니터링과 이를 통한 성능 평가에 많은 경험과 연구 성과가 있고 국가지정 우수 연구센터인 스마트 사회기반시설 연구센터(SISTeC)와 협력 체계가 구축되어 있는 KAIST 연구팀이 담당함.

⑥ 지중 열 에너지의 전환・활용・저장과 관련된 히트펌프 거동, 부하 패턴 분석, 최적 운영모드 산정, 열손상 평가 등의 기계 및 열 에너지시스템 설계와 성능 분석에 관한 연구는 열전달 및 흐름에 있어 세계적 연구자인 KAIST 기계공학과 김성진 교수 연구팀이 참여하여 담당함.

⑦ 본 연구개발의 궁극적인 달성 목표인 UTECUS 시스템의 설계 및 성능평가 기술은 경제적 시공 및 운영과 밀접하게 관련됨. 본 연구개발에서는 인천국제공항공사 연구개발단이 참여기업으로서 시공 및 운영에 대한 경제성 평가 모델 사례조사 및 운영 시 성능평가에 대한 협력 연구를 수행함. 또한 2차년도부터 참여기업인 인천공항공사 연구개발단에서 관심을 갖고 있는 UTECUS 활용 시나리오를 참고하여 해당 참여기업이 제공하는 Mock-up test (2차년도 1회, 3차년도 1회) 현장을 중심으로 실증 연구를 수행하며 이로부터 도출된 연구 결과를 본 연구 개발에 적용·개선하여 개발 기술의 완성도 및 총괄적인 기술 패키지화를 이루도록 함(표 1-2-2).

⑧ 또한 연구 개발의 시너지 효과를 위하여 국내 외부 연구 기관 및 산업체와 연계된 연구를 수행할 예정임. 보다 효율적인 스마트 모니터링 기술의 개발을 위하여 사회 기반 시설물의 스마트 모니터링 연구 분야에서 많은 성과를 내고 있는 과학재단 선도연구센터인 SISTEC의 연구 인프라 활용 및 기술 협력을 수행할 예정임. 또한 기술 개발의 실용화를 위하여 국내 최고의 에너지 기업인 한국전력과 협의하여 연구 성과의 실질적 활용도를 최대화하기 위한 노력을 수행할 예정임.

⑨ 현재 저심도 지반 지열 에너지 활용에 있어 최고 수준의 기술력을 보유한 것으로 평가되는 오스트리아의 비엔나 공대 (vienna university of technology) 및 스위스의 로잔 공대(EPFL)와 인적-물적 교류를 위한 협력 논의를 진행 중이며 특히 세계적 지반 연구 개발 기관인 NGI (Norwegian Geotechnical Institute)와 KAIST 연구팀의 박사후 연수원 1인을 파견하기로 협약을 맺은 상태이며 당해 과제 선정 시 국제 협력 연구를 진행할 예정임.

표 1-2-2 참여기업 연차별 세부 추진계획 및 방법

연차	연구내용	세부추진 계획 및 방법	수행기간 (개월)	해당 기관
1차 년도	경제성 분석 및 예측 기법 사례 연구	기존 경제성 모델 조사 및 사례 분석	3	참여 (IIAC)
		UTECUS에 적합한 분석 기법 선정	5	
2차 년도	1차 Mockup 시험 수행	Mockup 시험 부지조사	2	참여 (IIAC) & 주관공통
		Mockup 시험 용 Pilot UTECUS 설계	2	
		설계, 모니터링 기술 및 경제성 평가 모델 검증을 위한 1차 Mockup 시험 수행	5	
3차 년도	2차 Mockup 시험 수행을 통한 기술 패키지 구축	Mockup 시험 부지조사	2	참여 (IIAC) & 주관공통
		Mockup 시험 용 UTECUS 설계	2	
		설계 및 평가 기술의 적용성 검증	5	
		실증 실험을 통한 경제성 검증	5	
		모니터링 시스템 및 프로그램의 보완 및 수정을 통한 통합화	8	



그림 1-2-1 총괄 추진 체계

(나) 추진 전략

① 총괄 추진 전략

Ⓐ 해석 방법의 현실성 및 완성도 확보: UTECUS 시스템의 운영 시 성능에 영향을 미치는 열-수리-역학적 지반 거동을 모사할 수 있는 해석 모델 개발.

- 국내외 문헌 분석을 통한 주요 영향 요인 선정과 실무자 공청회 및 미니학술회 개최 등을 통한 기존 해석 모델의 SWOT 분석을 토대로 하여 문제 해결 대상의 결정 및 연구 프로세스의 합리적 조정을 수행
- 해석 모델의 개발과 동시에 보고된 실험 자료에 대한 해석을 수행하여 지속적인 보완 및 개선의 수행과 학술 교류 업무 수행
- 지오센트리퓨지 실험에 대한 해석 방법의 적용성 검증을 통하여 해석 기술의 완성도 향상 및 학술 논문 투고를 통한 대외 검증을 수행

Ⓑ 세계적 수준의 설계 및 스마트 모니터링 기술 개발 및 국내 특성화: 국제 기준에 부합하는 UTECUS 시스템의 설계 프로그램 및 성능 평가기술을 제안하고 이와 동시에 국내 특성에 맞는 지반 물성치와 설계 변수가 포함된 설계 프로그램의 개발을 통한 국내 저변을 확대함.

- 국제적 지열 연구 개발 선도 기관(NGI)과 연구 인력 교류 및 지열분야 유럽 선도 대학 (오스트리아 비엔나공대, 스위스 로잔공대 및 SUPRI 등)과의 협력을 통한 세계적 기준의 설계 방안에 대한 자료 수집 및 본 연구개발로부터 제안된 설계 및 모니터링 방법의 평가/피드백 채널 확보
- 지반공학 및 지열에너지 연구 단체와의 협력을 통한 국내에 특화된 설계 프로그램 입력 자료 산정에 대한 협력 루트 확보
- 교육과학기술부 우수 연구센터인 스마트 사회기반시설 연구센터와의 협력을 통한 세계적 수준의 스마트 모니터링 기술 자문 네트워크 ANCRiSST와의 교류 채널 확보

Ⓒ 효율적이면서 유기적인 연구 시스템 구축: 연구 분야의 세분화를 통한 연구 효율의 집약과 목적 지향적인 협력 시스템 구축을 통한 연구 완성도 증진 및 연구 관리와 지원 담당 인력 배치를 통한 통합적인 연구 관리를 수행.

- 연구 내용에 따라 지반 열특성-거동 평가팀 / UTECUS 설계팀 / UTECUS 모니터링-성능평가의 3팀으로 나누어 집약적인 연구를 수행함
- 과제 2 차년도부터 각 연구팀의 개발 기술을 지오센트리퓨지 시험 및 Mockup

시험에 공동 적용하여 기술의 보완 및 상호 연계성 확보를 위한 미니 심포지움을 개최하여 연구의 일관성 및 통합적 완성도를 높임. 또한 참여기업인 인천국제공항공사의 공동연구 수행여부를 검토하여 연구의 완성도를 높일 예정임

- 연구 행정, 성과 관리, 대외 협력 업무를 통합적으로 담당할 수 있는 지원 전문 인력 1인을 고용(주관기관)하는 것을 통해 연구팀의 행정 업무 부담을 완화하고 전문적인 행정 및 대외 협력 업무 지원이 되도록 함

Ⓓ 연구비의 합리적 배분 및 사용: 기존 국내 연구 개발 과제의 성과에 대한 조사를 통해 지반 열물성 D/B 구축 및 설계 프로그램 개발 시 중복되는 연구개발을 지양하여 합리적 연구비 배분을 수행하고, 본 연구팀이 현재 보유하고 있는 열물성 실험 장비 및 모니터링 관련 장비를 최대한 활용함과 동시에 본 연구팀과 협력관계를 맺고 있는 지오센트리퓨지 실험센터, 원내 공동 시험 장비 및 스마트 사회기반 시설물 연구센터의 인프라를 적극 활용.

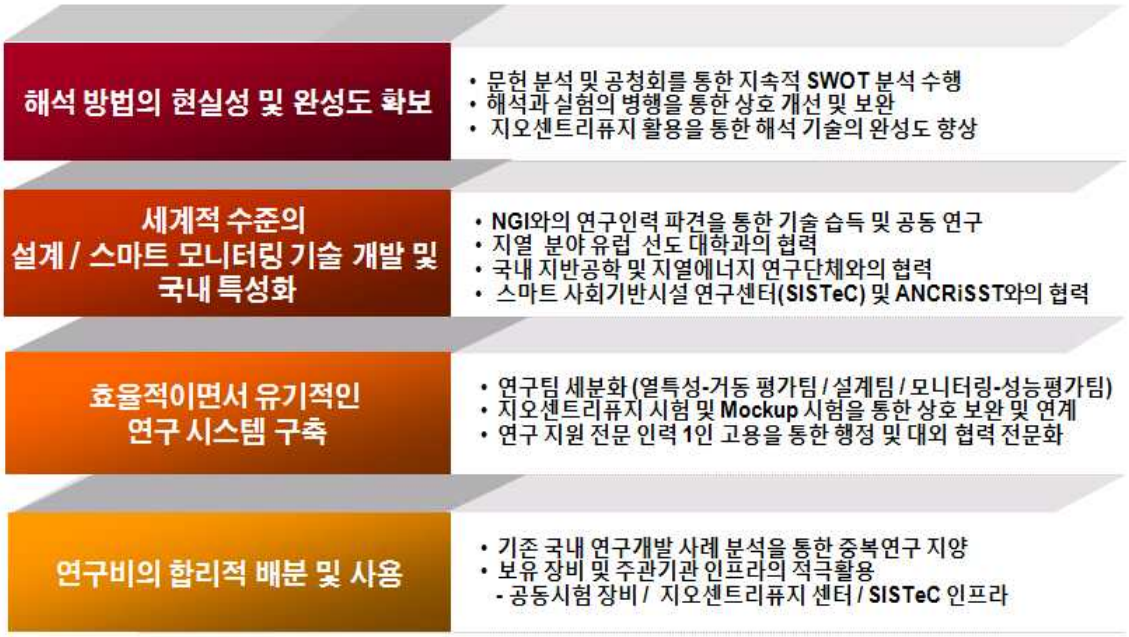


그림 1-2-2 당해 연구개발 추진전략

② 구체적 추진 전략

Ⓐ 실험/실측 데이터 확보를 통한 완성도 높은 설계 프로그램의 개발: 지중 열 전환·활용·저장 시스템 설계 프로그램의 실용성을 확보하기 위해서는 정교한 실험 및 실측을 통한 지반의 열 물성과 시스템 거동에 대한 모니터링 결과와의 비교 및 피드백이 요구됨. 본 연구팀은 현재 한국전력 전력연구원과 변전소 지열에너지 파일 구축 및 열 성능평가를 위한 모니터링 시스템을 구축하여 에너지 파일 시스템의 계측 자료를 확보하게 됨. 또한 참여기업인 인천국제공항공사가

추진 중인 제 2 여객터미널 부지에 대해 참여기업의 협조를 바탕으로 광대한 지반 조사 및 현장 열 특성 시험을 수행하고 동시에 2차례에 걸친 Mock-up 시험을 수행할 예정임. 위와 같이 확보된 실험/실측 데이터를 적극 활용하여 설계 프로그램의 완성도를 높이고 지반 열 물성에 대한 데이터베이스 및 현장 계측 기반 역추정 기법에 대한 실용도를 향상시키고자 함.

Ⓑ 기계/에너지 시스템에 대한 합리적 고려: 본 연구는 지중 열 에너지 전환·활용·저장과 관련하여 주로 지중에서 유발되는 열적 거동에 대한 연구가 주를 이룸. 그러나 최종적으로 UTECUS 시스템의 열효율 및 성능평가를 위해서는 그 외에도 부하패턴, 운영모드, 기후특성, 열 흐름 제어 등과 같은 기계/열/에너지 시스템에 대한 합리적인 고려가 요구됨. 이를 위해 본 연구에서는 기계 열 전달 관련 연구에서 세계적인 권위자인 KAIST 김성진 교수 연구팀을 통하여 국제적으로 통용되는 부하 모델, 운영 모드 평가 프로세스 및 기후 특성 모델에 대한 기술적 근거를 확보하고 국내 특성화를 위한 연구개발을 수행코자 함. 또한 운영중 UTECUS 시스템의 배관 및 열 채널 등에서의 손상 위험 평가 및 열 흐름 모니터링에 대한 완성도를 높일 것임.

③ 연차별 세부 추진계획 및 방법

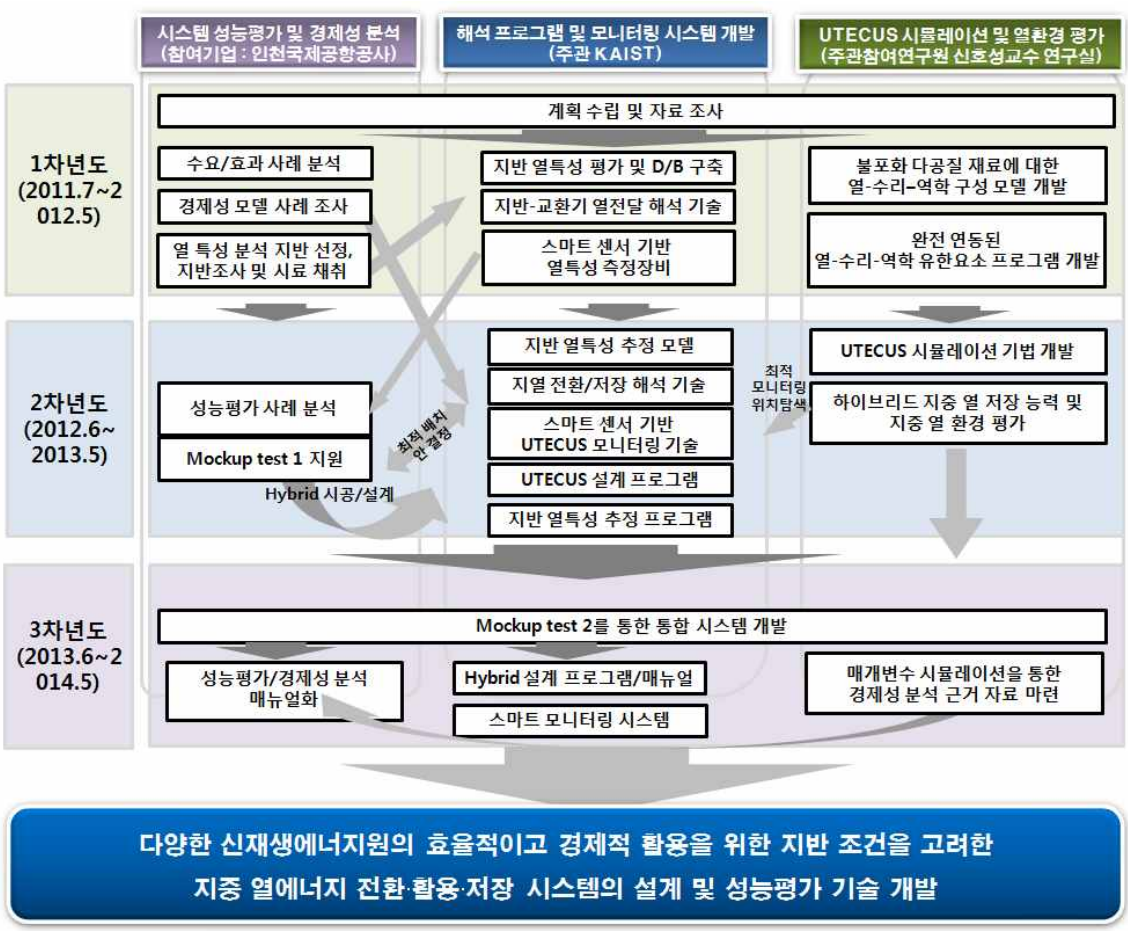


그림 1-2-3 연차별 세부 추진계획 및 방법

표 1-2-3 연차별 세부 추진계획 및 방법

연차	연구내용	세부추진 계획 및 방법	수행 기간 (개월)	해당 기관
1차년도	지반 조건을 고려한 지중 열 물성 측정 및 DB구축	국내 주요 지반 조건 분류 및 시료채취	1	주관 (KAIST)
		지반 재료의 기본 물성 시험 수행 수행	1	
		함수비 및 간극비 변화에 따른 지반 열물성 변화 측정 시험	6	
		지반 재료의 기본 물성과 열전도도 DB구축	3	
	열-수리-역학적 거동이 연관된 지반 구성 모델 개발 및 유한요소 프로그램 개발	불포화 다공질 재료에 대한 열-수리-역학 구성 모델 개발	8	주관참여 (울산대)
		열-수리-역학 연동 유한요소 프로그램 개발	8	

	지열 교환기 특성을 고려한 열 교환 거동 해석 기법 개발	기존 해석 기법 분석	1	주관 (KAIST)
		기초 구조물 매입형 지열 교환기와 주변 지반 간 열적 상호 거동 해석 기법 개발	4	
		지열 교환 파이프의 형태 (U 또는 코일형)를 고려한 해석 기법 개발	3	
	경제성 분석 및 예측 기법 사례 연구	기존 경제성 모델 조사 및 사례 분석	4	참여 기업 (IIAC)
		UTECUS에 적합한 분석 기법 선정	5	
	연차보고서 작성	자문회의개최 및 자체 과제 평가 수행	2	주관 공통
		연차보고서 작성	1	
2차 년도	지반 열 물성 추정 프로그램 개발	광물 특성, 지반 함수비, 간극비 등의 재료 지수를 활용한 인공신경망 이론 기반 열특성 추정 모델의 개발	6	주관 (KAIST)
		사용자 친화적 인터페이스를 갖춘 열특성 추정 프로그램 개발	6	
	개발된 열-수리-역학 유한요소 프로그램을 이용한 UTECUS 지열 저장 거동 매개변수 해석	열과 수리적 흐름과 역학적 거동에 대한 2차원(평면변형, 축대칭) 및 3차원 유한요소 시뮬레이션	3	주관참여 (울산대)
		기존 기법과의 비교 검증	1	
		지오센트리퓨지 모델 시험을 통한 시뮬레이션 기법 검증	3	
	하이브리드 지중 열 저장 능력 및 지중 열환경 평가	개발된 UTECUS 시뮬레이션 기법을 활용, 다양한 하이브리드 지중 열 저장 거동과 장기 거동 시뮬레이션을 수행	4	주관참여 (울산대)
		UTECUS 장기 운영에 따른 지중 열환경 영향 평가	3	
	지열 전환 및 저장 해석 모델 개발	불균질한 지반의 열전달 특성을 고려한 지열교환기-지반 열 교환/저장 거동 해석 기법 개발	8	주관 (KAIST)
		다층 지반 및 지반의 불균질성을 고려한 등가 열 물성계수 역해석 기법 개발	6	
	시공 경제성 평가 및 운영 중 지반 열 환경 평가 연구	지열교환기 배치 간격으로 인한 열간섭 효과에 대한 연구	7	주관 (KAIST)
		열교환 파이프 배치 형태 및 간격별 열효율 평가	8	
		광대역 지반의 장기 열 저장/전환 거동 평가	7	
	UTECUS 스마트 모니터링 네트워크 개발	핵심 계측 인자 및 계측 지점 도출	4	주관 (KAIST)
		다중 계측 센서 배치를 통한 스마트 모니터링 네트워크 시스템 개발	9	
	1차 Mockup 시험 수행	Mockup 시험 부지조사	2	참여 (IIAC)
		Mockup 시험 용 Pilot UTECUS 설계	2	주관

		설계, 모니터링 기술 및 경제성 평가 모델 검증을 위한 1차 Mockup 시험 수행	5	공통
	2차년도 중간보고서 작성	자문회의개최 및 자체 과제 평가 수행	1	주관 공통
		중간보고서 작성	1	
3차 년도	하이브리드 UTECUS 설계 프로그램 개발	하이브리드 에너지 및 에너지 피크 부하를 고려한 지열에너지 전환/활용/저장 시스템 해석 프로그램의 개발	2	주관 (KAIST)
		에너지 피크 부하를 고려한 해석프로그램 개발	6	
		경제성 분석 보고서 작성	6	
	UTECUS 스마트 모니터링 유닛 개발	온도/열 흐름 분석을 통한 손상 위치 추정 기술 및 통보 시스템 개발	8	주관 (KAIST)
		계측-분석 자동화 시스템 개발 및 단일 유닛화	6	
	2차 Mockup 시험 수행을 통한 기술 패키지 구축	Mockup 시험 부지조사	2	참여 (IIAC)
		Mockup 시험 용 UTECUS 설계	2	주관 공통
		설계 및 평가 기술의 적용성 검증	5	
		실증 실험을 통한 경제성 검증	5	
		모니터링 시스템 및 프로그램의 보완 및 수정을 통한 통합화	8	
	최종보고서 작성	자문회의개최 및 자체 과제 평가 수행	1	주관 공통
		최종보고서 작성 및 후속 연계 추진	5	

나. 연구 추진역량

① 연구진의 인적 능력

Ⓐ 본 연구개발 과제는 **복잡한 지반 특성 및 거동**과 **하이브리드 에너지원**을 고려한 **UTECUS 해석・설계・모니터링 기술 개발**을 목표로 하고 있기 때문에 냉난방 시스템 개발 및 실증 연구 위주로 이루어진 기존의 연구와는 달리 **지반의 열거동을 고려한 지열 교환・저장・활용 및 실시간 모니터링**에 대한 연구가 중점적으로 수행되며 이를 위해서는 지반의 열 거동에 대한 해석, 설계, 모니터링 관련 전문가는 물론 기계/열에너지 시스템 전문가가 필수적으로 요구됨.

Ⓑ 따라서 본 연구진은 △ 지반의 열 물성 및 거동 평가, △지반 조건이 고려된 지열 교환・활용・저장 시스템 시뮬레이션, 해석 및 설계, 그리고 △ UTECUS와 같은 대규모 지반 구조물의 실시간 스마트 모니터링 분야 전문가를 참여시켜 연구개발을 수행하되 연구개발의 일관성 유지 및 체계적 관리를 위하여 표 3-2와 같이 최소의 핵심 인원만을 편성하였음. 이와 동시에 해외 공동 연구 추진 및

국내외 자문 네트워크를 통한 협력을 진행하여 본 연구 개발을 효과적으로 개선하고 및 보완 하고자 함.

표 1-2-4 당해 연구개발 인적 구성 내역

관련 연구 국내 연구자 구성	**지반의 열 물성 및 거동 평가 분야**
	• 지반의 열 물성 추정 전문가는 최소 10명 이상으로 한국지질자원연구원(송윤호), 한국건설기술원(손병후) 등의 국가연구소 또는 연세대학교(윤태섭), KAIST(이승래, 조계춘), 고려대학교(최항석) 등 대학, 코오롱 기술연구소(백성권) 등의 기업체 연구소 소속 연구원이 대표적임.
	지반 조건이 고려된 지열 전환·활용·저장 시스템 시뮬레이션, 해석 및 설계 분야
	• 현재까지 UTECUS와 같은 열에너지의 지중 저장 시스템의 설계와 관련한 연구 개발은 국내에서 수행되지 않았음. 지열히트펌프의 시스템 설계 및 최적화 분야 국내 전문가는 포항산업과학기술원(박흥수), 고려대학교(김용찬) 등이며 현재까지 지반의 조건을 고려한 매입형 지열 교환 거동 해석의 경우 KAIST(이승래)의 사례가 대표적임. 한편 본 연구 개발과 관련한 핵심 기술인 다공질 재료의 열-수리-역학적 거동이 완전 연관된 수치해석 분야의 경우 지반공학 분야 울산대학교(신호성) 연구진이 있음.
	지반 구조물의 실시간 스마트 모니터링 분야
	• 토목 구조물의 스마트 모니터링 분야 국내 전문가는 최소 10여명 이상이며 KAIST(윤정방, 손훈, 정형조, 이승래), 부경대(김정태, 신성우), 성균관대(박승희), 세종대(이종재), 전남대학교(김재민, 김영상), KRIS(권일범) 등 대부분 한국연구재단 스마트 사회기반 시설물 연구센터(SISTeC)를 중심으로 연구 개발이 이루어지고 있으며 이외에도 한국건설기술연구원, 한국시설안전공단 등의 국책연구원과 한국유지관리 등의 전문 엔지니어링 업체가 전문 연구 인력을 보유하고 있음.
본 연구진의 인적 구성 및 사유	• 본 연구진에서는 상기 기술한 전문가 중 지반 구조물 및 지열 구조물 해석과 스마트 지반 구조물 모니터링 분야 전문가인 KAIST 이승래 교수와 흙의 열-수리-역학적 연동 거동 해석에서 선진 연구를 수행하고 있는 울산대학교 신호성 교수가 포함되어 있음. • 또한 기계 열 전달 및 열 흐름과 관련하여 세계적 권위자인 KAIST 기계공학과 김성진 교수 연구팀이 참여하고 있음. • 위와 같이 최소한의 인력을 배치한 것은 집중적인 연구 개발 및 연구비의 최적화된 사용을 위한 것임. 본 연구진은 현재 한국 연구 재단

	연구 개발 과제 및 한국전력 산하 전력연구원 자체 과제의 위탁연구 수행을 통해 지열 교환 설계 기법, 소프트웨어 개발, 광섬유 모니터링 기술 개발에 대해 연구 개발을 수행하고 있으며 특히 모니터링 분야의 경우 주관 연구기관 KAIST 내 SISTeC 연구센터의 일원으로써 세계적 수준의 기술/실험 인프라를 활용할 수 있음. 따라서 다양한 협력 네트워크와 자문 연구진 활용을 통하여 당해 연구과제의 목표 달성을 위한 연구 범위 및 기관 구성의 최적화를 꾀하고자 함.

② 연구기기・장비・시설 구축 수준

연구기기・장비・시설 보유 및 활용

Ⓐ 본 연구진은 당해 연구개발을 위해 소요되는 실험, 해석, 계측을 위한 주요 연구기기 및 장비를 자체적으로 확보하고 있으며 이외에도 본 연구진 소속 기관의 공동 연구 장비 및 실험 시설 등 연구개발을 위한 국내 최고 수준의 인프라를 갖추고 있음. 또한 주관 기관 내 스마트 모니터링 관련 연구 센터 및 지중 조건 재현이 가능한 KOCED 다이나믹 지오센트리퓨지 실험 센터가 있어 다양한 협력 및 활용 연구가 가능함.

Ⓑ 그림 1-2-4는 본 연구진의 연구 기기・장비・시설 활용 계획을 나타내며 표 1-2-5 , 1-2-6 및 1-2-7 는 본 연구진의 세부 연구목표와 관련된 연구 기・장비・시설 구축 내역을 나타낸 것임.



그림 1-2-4 연구기기・장비・시설 구축 및 활용 방안

표 1-2-5 지반 재료의 열 물성 측정 및 모형 시험 관련 시험 기기·장비 구축 내역

연구기자재 및 시설명	규 격	수 량	용 도	보유기관
Needle Probe	Hukse Flux TP08	2 EA	열전도도 측정용 (탐침법 시험기)	〃
Laser Flash Thermal Conductivity Instrument	LFA457, DSC404C,DIL402C	각 1 EA	열전도도 측정용 (섬광법 시험기)	〃 (공동시험장비)
Heat Flow Meter	HFM436	1 EA	열전도도 측정용 (열판법 시험기)	〃 (공동시험장비)
KOCED Geotechnical Geocentrifuge Facility	C72-2	1 EA	UTECUS 모형 시험	KOCED 다이나믹 지오센트리퓨지 실험센터 (주관기관 내)
	4-Way In-Flight Robot	1 EA	UTECUS 시공 프로세스 모사	
ELE 물성 장비 (Fall cone, Sieve)		1 EA	기본 물성 측정	주관기관
삼축실험기	-	1 EA	강도/역학 물성 측정	〃
정수위 투수시험기	-	1 EA	수리 특성 측정	〃
불포화 투수 시험기	-	1 EA	수리 특성 측정	〃
Fredlund Soil-water Characteristic cell	-	1	흙의 함수 특성 분석	〃

표 1-2-6 해석 및 설계 관련 인프라

연구기자재 및 시설명	규 격	수 량	용 도	보유기관
DIANA	-	1 EA	유한요소해석 (범용)	주관기관 (자체보유)
ABAQUS	-	1 EA	유한요소해석 (범용)	〃
MIDAS-GTS	-	1 EA	유한요소해석 (지반)	〃
PLAXIS 3-D	-	1 EA	유한요소해석 (지반)	〃
GEOSLOPE 5.0	-	1 EA	유한요소해석 사면안정해석 (지반)	〃
Matlab	-	1 EA	해석 코드 개발 (인공신경망)	〃
PFC	-	1 EA	입자-수리 연동 해석	〃

표 1-2-7 모니터링 관련 시험 기기·장비 구축 내역

연구기자재 및 시설명	규 격	수 량	용 도	보유기관
NI PXI Data Aquisition	NI PXI-1036DC NI PXI-1000B	각 1 EA	계측 데이터 수집 보드	주관기관
Data Aquisition Board	CR10X	1 EA	계측 데이터 수집 보드	〃
Signal Oscilloscope	Channel300MHzMixed	1	계측 신호 분석	〃
Enviro-SMART water content sensor	-	1	수분 계측	〃
Dynamic Strain Amplifier	-	1	변형 계측	〃

주관기관의 연구 관리 · 지원 시스템

▷ ERP 시스템의 도입

- KAIST의 연구관리 제도는 선진국 특히 미국제도와 지난 30여 년간의 정부 및 민간 산업체 연구과제를 수행하면서 얻은 연구관리의 노하우가 합축된 형태로써, 국내 타 대학이나 연구소의 기본 모델로 평가 받고 있으며, 그 특징은 중앙관리와 근접지원, 자율과 통제의 적절한 조화를 통해 효율성과 엄밀성을 동시에 추구하고 있음.

- 연구계약이후 정산 단계 전까지 연구정보, 연구비 입금·관리·집행 등 모든 연구 업무는 전산화(국내최초 대학 연구관리·지원 시스템에 대한 Oracle ERP 시스템 도입)를 통해 중앙집중 관리로 운영함으로써 연구책임자의 행정부담을 최소화하고 전산시스템을 통해 연구정보를 공개함으로써 연구비 집행의 효율성과 투명성을 제고하고 있음.

- 특히 정기적인 내부감사외 교육과학기술부, 감사원의 외부 감사를 통해 연구비 집행 적정성을 상시적으로 감사하고 있음.

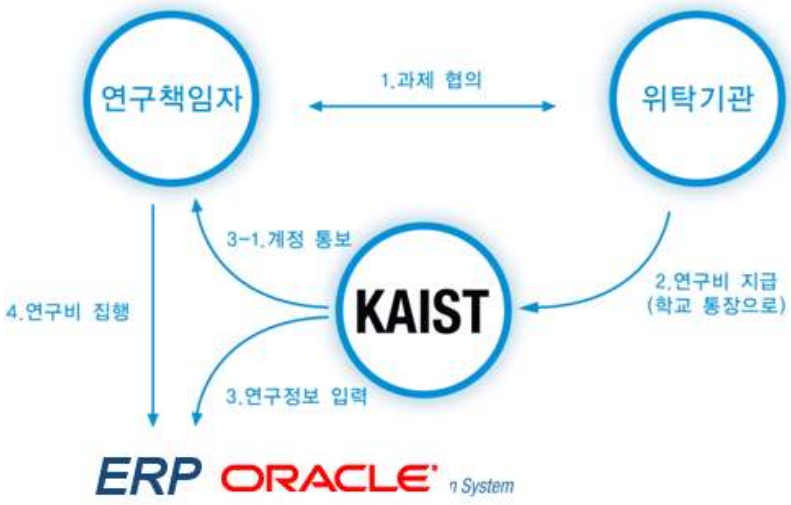


그림 1-2-5 ERP를 이용한 KAIST 연구비 관리 시스템 (1)

▷ 체계적 연구비 관리

• 연구계약 및 연구비 입금, 관리

- 모든 연구계약은 총장 명의로 체결됨.
- 연구비는 학교 통장을 통해 입금되고, 연구책임자는 대학본부를 통해 연구비 계정만을 통보받음.
- 연구비 입금후 자금관리, 연구비 집행, 기타 회계관리는 대학본부에서 일괄 처리

• 연구비 계정 통보

- 회계부서(재무팀)를 통해 연구비 입금이 확인되면 연구관리부서(연구관리팀) 전산시스템에 연구기간, 연구비 예산 세부내역, 참여연구원 등 연구수행에 필요한 모든 정보를 입력하고, 입력내용을 연구책임자에게 통보(계정 통보)

• 연구비 집행 및 관리

- 연구비 집행의 모든 권한은 연구책임자에게 위임하고, 실 집행은 전산시스템을 통해 관련 행정부서에서 직접 처리함을 원칙으로 함.
- 단, 업무의 신속성과 효율성 제고를 위해 예외적으로 본부를 경유하지 않고 학과 차원에서 직접 처리될 수 있도록 근접지원 제도를 병행하고 있음. (예, 소액구매)



그림 1-2-6 ERP를 이용한 KAIST 연구비 관리 시스템 (2)

▷ 연구비 집행 프로세스 예시(구매)

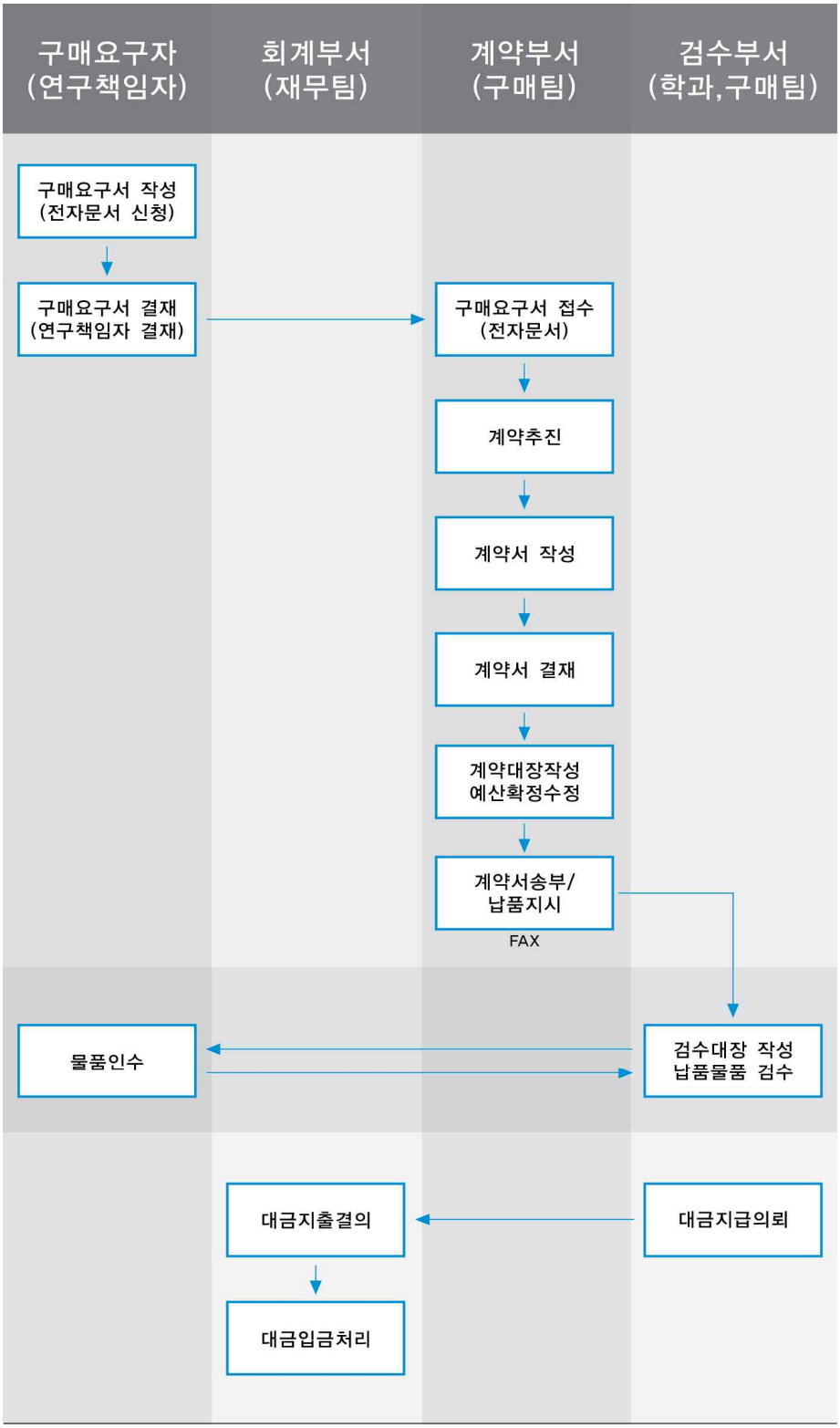


그림 1-2-7 KAIST 연구비 집행 과정.

▷ 간접비 운용

- **간접비 집행 사용 및 집행근거는 국가연구개발사업의 관리등에 관한 규정에 따름**

- **집행내역 : 상기 집행 근거에 따라 아래 비목으로 집행**
  - 당해 연구개발에 소요되는 지원인력의 인건비 및 기관 공통 지원경비
  - 연구원의 일시적 연구중단, 연구연가 등에 따른 비용에 충당할 수 있는 경비
  - 프로그램 수행과제와 직접 관련된 지적재산권의 출원 등록에 필요한 모든 비용 또는 기술가치평가 등 기술이전에 필요한 비용
  - 연구과제의 홍보를 위한 과학홍보물 및 행사 프로그램 등의 제작, 강연, 체험활동, 연구실 개방 및 홍보전문가 양성 등
  - 연구실 안전관리비

▷ 연구비 집행에 대한 내외부 감사시스템

- KAIST는 정부출연(연)으로 법적 정체성을 갖고 있어 주무부처인 교육과학기술부의 정기적인 감사와 감사원 감사를 수감받고 있음.
- 내부적인 운영체제로는 자체일상감사를 위한 감사실, 사전사후 업무조사를 위한 경영혁신팀에서 자체 감사기능을 수행하고 있음.
- 연구비 집행에 대한 업무 담당부서가 다르게 지정 운영되고 있어 상호 통제와 감사기능을 수행하고 있음.



그림 1-2-8 KAIST 감사시스템

4. 국제공동연구개발 추진계획

가. 추진 배경

(1) 세계적인 지반 공학 연구기관인 NGI (Norwegian Geotechnical Institute) 는 국제에너지기구(IEA)의 지열저장과 관련된 노르웨이 대표 연구개발 기관으로써 현재까지 지열 특성, 시공 방안, 설계와 관련된 연구를 수행하고 있으며 최근 폐열(waste heat)을 지중에 저장하여 다시 활용하는 대규모 프로젝트 “CREATIV” 를 수행 중임.
(2) 본 연구진은 지열 저장 및 활용에 대해 NGI와 공통의 관심사가 있음을 확인하였고 이에 박사후 연수연구원 1인 파견을 통해 협력연구를 수행하기로 협약하였으며 해당 연구원의 담당 업무는 지반 조건을 고려한 지열 저장 시스템의 해석 및 설계와 관련함 (2011년 9월부터 업무 시작).

나. 성공 가능성

(1) 본 연구제안이 선정될 경우, 2차년도인 2012년부터 지열 저장 시스템의 해석 및 설계에 대한 공동 연구를 추진하고자 하며 NGI 지열 연구팀과 공동으로 UTECUS 시스템의 설계 기법의 개발 연구를 수행할 예정임.
(2) 해당 연구원은 본 연구진이 기존에 수행하고 있는 에너지파일의 지열 교환 거동 시뮬레이션 및 설계에 핵심적인 인원으로써, NGI의 우수한 연구 인프라와 다양한 현장 적용 연구를 바탕으로 본 연구진과 NGI가 공동으로 목표하는 설계 기법 개발을 이룰 수 있을 것으로 사료됨.

다. 추진 계획

(1) 2차년도인 2012년 3월부터 지열 저장 시스템의 해석 및 설계에 대한 공동 연구를 추진하게 되며 파견연구원이 NGI의 프로젝트를 수행하는 것을 통해 해당 기관 인프라를 활용하게 됨. 본 연구개발에서는 NGI를 위탁연구기관으로 지정하여 약 3만불/연 정도의 지원을 수행할 예정임.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 기술 및 산업 동향

1. 기술 동향

- 국내의 경우 천층부 지열 에너지(subsurface geothermal energy)와 관련된 연구는 2000년 이후부터 수행되었으며 2007년도의 기술수준은 미국, 유럽에 비해 약 설계기술 61% 및 제작 및 생산기술 58%의 기술력을 보유하고 있음(산업자원부, 2007). 특히 당해 연구과제와 관련된 **토사/암반별 물성 D/B구축**, **지중 열거동 시뮬레이션**, **지하수/지중 환경영향 기술** 및 **지중 계측-모니터링 기술**은 각각 세계 최고 수준 대비 각각 57, 57.4, 55.8 및 62.7 %로 평가되고 있음.

- 지열 냉난방 시스템에 대한 국내의 연구개발 투자는 2002년부터 본격적으로 시작되었음. 이러한 연구개발을 통해 지열 교환형 히트 펌프의 성능 개선, 지열 교환형 냉난방 시스템 개발, 냉난방 효율 평가 설계 프로그램 개발, 고효율 냉매 기술 개발, 지열 교환기 설치용 시추공 굴착 공법 개선에 대해 연구가 중점적으로 수행되었음.

- 주요 국내 연구 성과로는 고성능 저가형 지중열교환기의 개발 및 시공 (코오롱건설), 지중열전도도 측정 장비의 개발 (한국에너지기술연구원), 전열성능 향상을 위한 뒷채움재 조성 및 재료 D/B 구성 (한국건설기술연구원), 한국형 지중열교환기 열효율 설계 프로그램 개발(RIST) 등이 대표적임.

- 국내에서 개발된 기술은 대부분 기술이 성숙기에 도달한 것으로 인식되고 있는 연직 및 수평형 지중열교환기 방식에 대한 것이 대부분임. 한편, 말뚝매입형 지중열교환기 등의 기초 구조물 결합형 지열 교환기에 대한 연구가 시작되고 있으며 2개의 정부주도 관련과제가 수행 중임.

- 지열 에너지의 활용을 위한 기반연구, 설계, 계측과 관련하여 2011년 기준으로 총 14개의 정부 주도 연구개발 과제 중, 11개 과제가 완료되었고 3개의 과제(하이브리드 시스템 및 구조물 매입형 지열 교환기 설계 기술 관련)가 진행 중임.
  - 지반 열특성 분석 및 D/B 구축 관련: 3개 과제
  - 하이브리드 지열 교환기 및 열교환 구조물 시스템의 설계: 4개 과제
  - 지열 교환기의 성능 평가: 5개 과제

- 지하수위 등의 외부 환경 영향 평가: 2개 과제

● 특히 지중 열 교환기의 시공 설계 기술의 경우 대부분 해외에서 개발된 해석 프로그램(CLGS, EED, GLHE PRO, GLD 등)을 적용하고 있어 국내 연구 개발이 시급한 것으로 평가되며 이와 관련하여 수행된 연구개발로는 포항산업과학연구원의 사례가 유일함.

● 현재까지 지중 열 저장과 관련해서 대수층 지열 저장(ATES)에 대한 연구 및 실험 연구가 수행되었으나 본 연구에서 고려하는 BTES 기반 지열 저장 시스템에 대한 연구는 미비한 실정임. 특히 당해과제에서 다루는 지중 열 저장을 위해 요구되는 복잡한 지반 특성을 고려한 열전달 해석 기술, 열효율 평가, 그리고 성능 평가를 위한 모니터링 기술 등에 대해서는 연구 개발이 미진한 실정임.

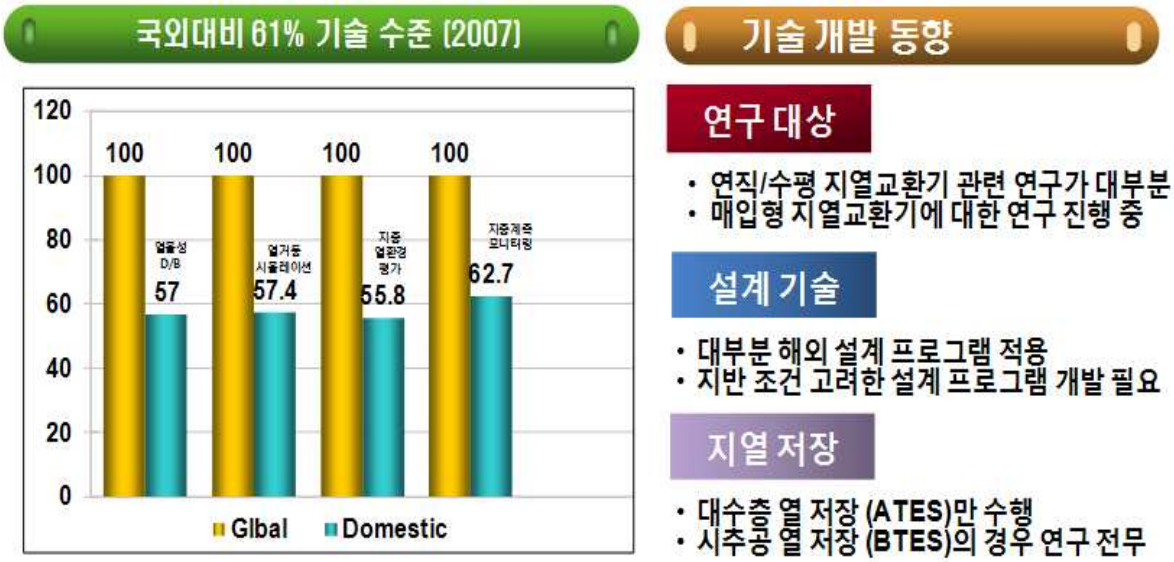


그림 2-1-1 당해과제 관련 국내 기술 동향

2. 시장동향

● 국내 개발 가능한 저심도 지열에너지는 약 800 GW (국내발전설비의 14배)로 개발가능성이 우수하고, 국내 전체 에너지 이용량의 20%가 냉난방에너지가 차지하는 소비구조를 감안할 때 무공해, 고효율인 지열 에너지원을 이용한 냉난방시스템의 경제성은 꾸준히 증가하고, “신재생에너지 3차 기본계획(지식경제부, 2008)”에 의하면, 신재생에너지중 지열 에너지의 비중이 ’08년 0.1%에서 ‘30년 3.8%까지 연평균 약 25%의 성장세를 예상함.

- 지경부의 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법” 확대시행으로 연면적 3,000 m^2 이상 공공건물의 건축비 5% 이상에 대해서 신재생에너지를 의무 적용하는 법안이 시행됨. 이에 따라 냉난방과 관련된 지열 히트 펌프 설비 중 지열 교환기 시장은 2010년 3000억(기계설비 1700억, 시공관련 1300억원), 2015년 1조 5천억, 2020년 2조 7천억, 2025년 3조 8천억, 그리고 2030년에는 5조원에 달하는 시장으로 성장할 것으로 예측됨. 이는 아파트와 같은 공동 거주 건축물 시장을 제외한 것으로 매년 50만 가구의 아파트 신축 시 연간 5조원의 추가 시장이 형성될 것으로 예측되고 있음(이투뉴스, 2010년 9월 1일자).

- 신재생에너지 원별 공급비중을 보면 지열은 0.35%에 불과한 아주 미비한 상황임. 하지만 ‘신재생에너지 이용 건축물인증제’가 본격적으로 시행되면서 건축물에서 사용되는 에너지 중 가장 많은 비중을 차지하는 냉난방 비용을 줄일 수 있는 지열에 대한 관심이 높아지고 있음.

- 에너지 관리공단에 따르면 지열의 연도 에너지생산량(Tonnage of Oil Equivalent, TOE)은 2002년 122TOE로 시작해 2009년 22,126TOE로 불과 8년만에 무려 2,000배에 육박하는 급성장을 거듭함. 용도별 보급실적(2009년)을 보면 가정용 5,024kW, 공공시설 22,172kW, 교육시설 2,056kW, 농업시설 2,515kW, 사회복지시설 3,359kW, 산업시설 2,808kW, 상업시설 1,715kW, 기타 190kW 으로 조사되었음(국내 신재생에너지통계 2011, 에너지관리공단).

- 2009년부터 에너지관리공단은 지열 열펌프 인증설비 사용을 의무화함. 2011년 4월 기준 신재생에너지센터에 등록된 인증제품 현황을 분석한 결과 물-물지열히트펌프 유니트(GT-101)는 총 95개가 등록되었고 물-공기지열열펌프유니트(GT-102)는 총 11개 모델이 등록 (주로 삼성전자와 LG전자)되었음. 물-공기멀티형열펌프유니트(GT-103)는 LG전자만이 유일하게 등록함.

- 지열산업을 국가 에너지의 일익을 담당하는 신성장산업으로 육성하기 위해서는 설계 및 시공기준을 정립하는 것이 중요하며 법규해석에서 발생하는 갈등을 최소화하기 위한 법령정비가 시급한 것으로 평가되고 있음. 특히 대규모 지열 프로젝트 현장이 지속적으로 발주되면서 지열히트펌프에 대한 신재생에너지 인증기준을 개정해야 한다는 목소리가 높음(투데이에너지, 2011년 5월 12일자).

- 주요 대형 건설사를 중심으로 무탄소 그린 공동 주택 단지 건설을 테마로 기존 지열 교환기를 활용한 냉난방에 더해 태양열/풍력에너지와 결합된 하이브리드 재생에너지 전환/저장/활용 시스템에 대한 투자가 확대되고 있음.

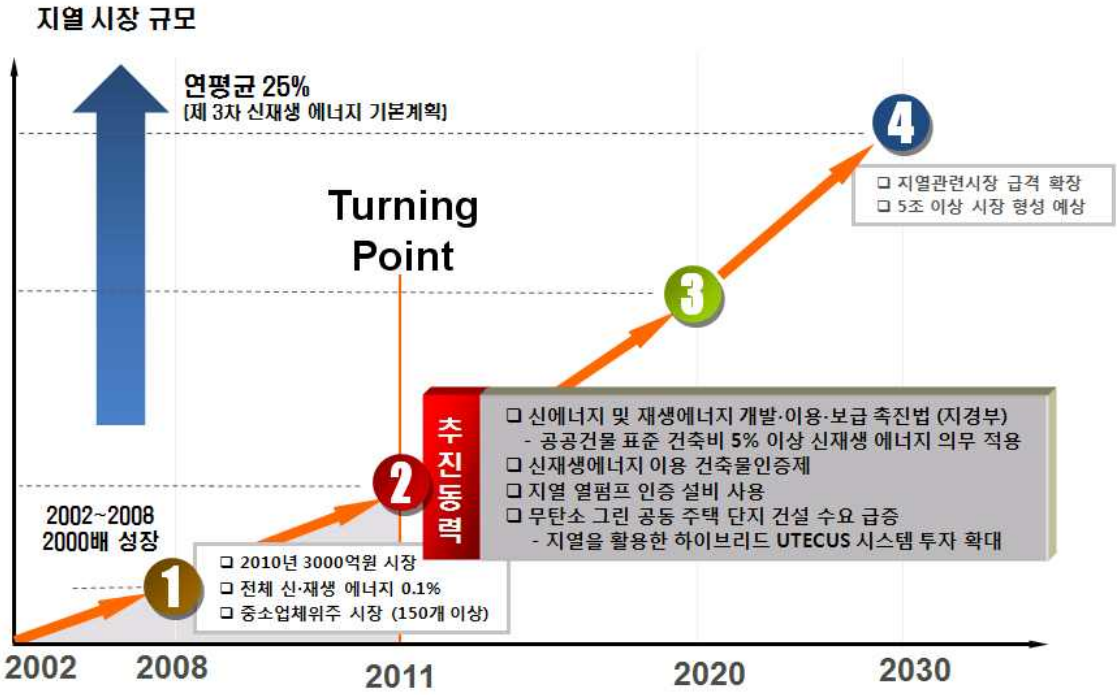


그림 2-1-2 저심도 지열 관련 국내 시장 동향

3. 국내 연구개발 인적/물적 인프라

- 표 2-1-1 는 국내 저심도 지열 관련 연구 개발을 수행하거나 수행중인 연구 개발 기관과 해당 주요 연구내용을 정리한 것으로 주로 지열자원의 탐사와 건물 냉난방의 실증 및 냉난방 시스템의 성능 평가에 대한 연구가 대부분임을 알 수 있음.

- 저심도 지열과 관련된 국내 연구 개발은 주로 냉난방 및 공조 관련 학과를 포함하는 대학 또는 제조업체의 기술연구소와 국책연구소를 중심으로 이루어져 왔으며 최근에 실제 건물에의 활용 단계에 접어든 건설 시공사의 기술 연구소에서 추가적으로 지열 관련 기술 개발이 이루어지고 있음.

- 당해 연구과제와 같이 지반 거동이 고려된 지열 전환/저장/활용 특성에 대한 연구와 관련해서는 한국건설기술연구원에서 뒤채움 지반 재료의 열 전도 특성에 대한 연구를 수행한 바가 있으며 최근 들어 본 연구기관을 중심으로 구조물을 활용한 지열 에너지 활용에 대한 연구가 이루어지고 있음.

표 2-1-1 국내 저심도 지열관련 연구 기관 및 연구 실적

연구 기관	연구 실적
자원연구소	• 마산·창원·제주 지역 지열에너지 탐사·개발· 활용방안 연구 • 중저온성 지열 에너지 개발
한국에너지 기술연구소	• 현지용 지중 열 전도도 예측기술 개발 • 지열냉난방 시스템 성능 평가 및 엔지니어링 기술 확보
코오롱 건설	• 지열냉난방 실증연구 • 고성능 저가형 지중 열교환기 개발
한국 기계 연구원	• 부하 추종형 고효율 지열 히트펌프 시스템 개발
한국건설기술연구원	• 지중열교환기 전열성능 향상을 위한 뒤채움재 조성
인천전문대학	• 스탠딩 컬럼웰(SCW)을 적용한 지열히트펌프
지오테크	• 복수정을 이용한 지열히트펌프 시스템
뉴 그린테크	• 지열이용 하이브리드 히트펌프 시스템
삼양 에코너지	• 유출지하수를 이용한 건물 냉난방 기술
포항산업 과학연구원	• 한국형 지중열교환기 최적 설계 패키지 개발
호서대학교	• 저가, 고효율 지중 열교환기 그라우팅 재료 개발 및 DB구축
넥스지오	• 지하수 축열을 고려한 대수층 냉난방 시스템
KAIST	• 지반조건을 고려한 에너지파일 해석 및 모니터링 기술
고려대학교	• 지열 에너지 기초구조물의 열적/역학적 특성 연구

● 그러나 정부연구기관 및 기업체 등을 제외하면 전문 연구인력이 부족한 실정임. 이는 대부분의 국내 지열 에너지 업체가 50인 미만의 중소기업으로 실제 설계와 시공에 대부분의 인력이 투입되고 있기 때문이며 이로 인해 지열 에너지 시스템 시공관련 기술은 외국의 기술이 그대로 도입되거나 제한적으로 개선되어 적용되고 있는 상태임. 특히 지식경제부의 제3차 신재생에너지 기본계획(2010)에 따르면 향후 시장 규모에 비추어 현재 지열 관련 국내 연구 개발인력은 턱없이 모자란 것으로 평가되고 있어 석박사급 인력 증원에 대한 정책적 지원이 마련될 전망임.

제 2 절 국외 기술 및 산업 동향

1. 기술 동향

- OCED 산하 국제에너지기구(IEA)는 ECES(Energy Conservation through Energy Storage) 프레임워크를 통해 70년대부터 UTES(Underground Thermal Energy Storage)에 대한 국제 연구를 진행하고 있으며 1998년부터 실제 UTES 시스템을 실제 환경에 적용하기 위한 설계 및 시공에 대한 연구(ANNEX VII)를 진행하고 있음 (IEA, 2009).

- 저심도 지열과 관련하여 오스트리아, 독일, 벨기에, 네덜란드, 스위스 (최초 특허 등록), 노르웨이, 스웨덴 등의 북유럽 선진국가를 중심으로 저심도 지반의 열전달 특성, 지열 히트펌프, 지중 구조물을 활용한 지열 교환기 설치 기술에 대한 이론 및 수치해석적인 연구가 수십 년 전부터 활발히 이루어져 왔음(Brandl, 2009). 지중 열저장의 경우 1970년대부터 연구개발이 수행되어 이미 중대형 건축물에 대해 태양열과 접목된 하이브리드 시스템의 실제 적용이 확대되고 있으며 EU가 신재생냉난방(renewable heating & cooling)을 위한 태양열 에너지의 저장 수단으로 지중 열 저장 시스템에 대한 R&D 지원을 확대함에 따라 스페인, 이탈리아, 덴마크, 영국 등도 태양열, 아스팔트 폐열을 지중에 저장 및 활용하는 다양한 연구개발을 진행 또는 추진 중임.

- 미국의 경우 지열 교환기 및 히트펌프에 있어서 세계 최고의 기술력과 실용화 실적을 갖고 있는 것으로 평가됨. 특히 오바마 대통령의 녹색 성장 정책과 맞물려 학교 및 관공서에 지열 냉난방 시스템을 법적으로 강제함으로써 저심도 지열 에너지에 대한 실용화 연구가 활발히 진행 중임. 2010년 미국 캘리포니아 주는 “California energy storage bill (AB 2514)” 법안을 통해 태양광, 풍력 등의 신재생 에너지의 대용량 저장 설비에 대한 목표치를 규정함. 이에 따라 태양열, 산업 폐열 등의 지중 저장 및 회수 시스템에 대한 관심이 증대 됨. 미 육군 공병단(공항 활주로 하부 지반 열 저장을 통한 활주로 열적 안정성 확보), 환경부, 에너지부 등을 중심으로 저심도 지중 열 저장 및 회수 시스템에 대한 연구개발 투자가 활발하게 진행 중임. 특히 칼 가웰 미국지열협회 이사는 미국 내에서 현재 20억~30억달러가 188개 지열 사업에 투자되고 있고 2013년까지 70억달러가 추가로 투입될 것이라고 밝혔음.

- 캐나다의 경우 알버타 주를 중심으로 대규모 주거단지에 태양열 패널 사용을 적극권장하고 그로부터 얻어지는 열 에너지를 저장하는 “Seasonal Energy Storage in Action”을 통해 실제 적용 연구가 이루어지고 있음. 그리고 Caneta Research

(2001)와 같은 민간 연구기관을 통해 지중 열 저장에 대한 가이드라인이 제시되고 있음.

● 일본은 지열 히트 펌프와 관련해서는 세계 최고의 기술력을 갖고 있는 것으로 평가됨. 특히 아시아 국가 중에는 지열을 활용한 냉난방 시장에서 가장 앞서있는 것으로 평가되며 (세계 7위, 연간 7GWth의 전력 대체) 도로 위에 쌓인 눈을 녹이는 시스템 (교토 역사)을 구축하는 등의 지열 활용 방안을 확대해나가고 있음. 1990년대부터 관공서와 학교에 저심도 지열 저장에 기반한 냉난방 시스템을 적용하였고 (Hiroshi & Kenji, 2001), 저심도 지반의 지열 특성을 분석하는 다양한 현장 시험 및 역산 기법에 대한 연구도 활발히 진행 중임.

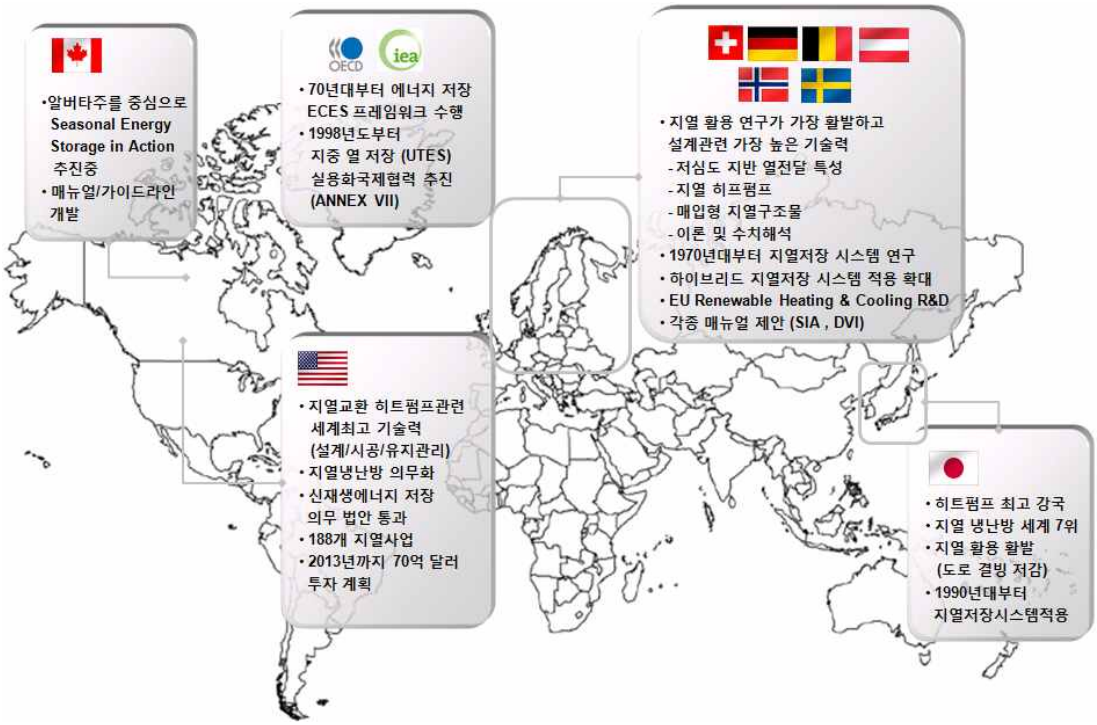


그림 2-2-1 저심도 지중 열 저장 관련 국가별 동향

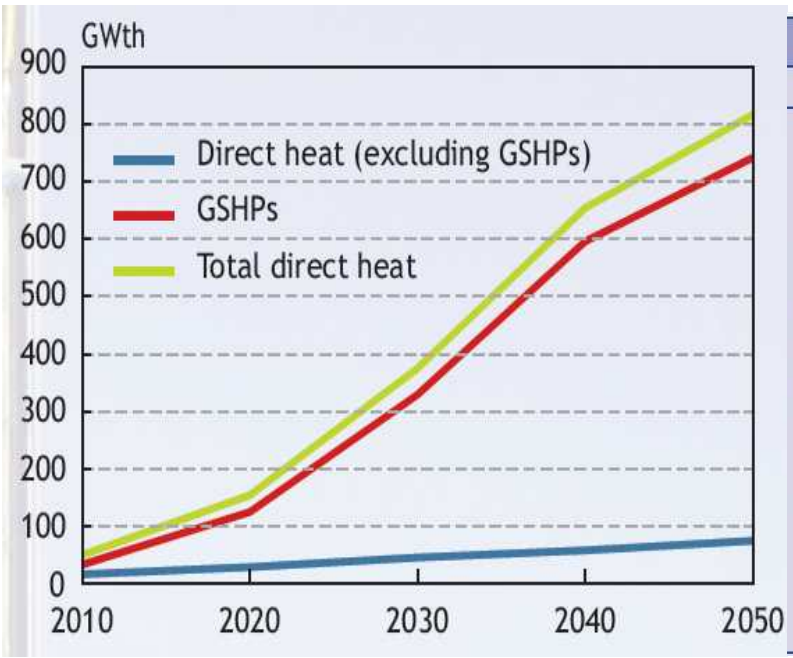
2. 시장동향

● IEA의 2010년 연례보고서에 따르면 2009년 현재 전 세계 70여개국이 저심도 지열을 직접 활용하고 있는 것으로 나타났으며 총 사용 에너지량은 약 483 페타 Joule (48.3경 Joule)로써 중국(20 GWh/년)-미국(15 GWh/년)-스웨덴(12 GWh/년)-터키(10 GWh/년)-일본(7 GWh/년) 순으로 활용하고 있음. 이 중 지열 교환기를 활용한 에너지 활용량은 21.4경 Joule로써 전체 직접 에너지의 50% 정도를 차지하며 약 260만개의 지열 교환기가 설치된 것으로 조사됨 (그림 1-13).

- 2010년 이후 저심도 지열을 활용한 기술은 지열 교환기를 응용한 전환/저장/활용이 대부분을 차지할 것으로 예측되며 환산 전력으로 2010년 30GWth에서 2050년 750GWth로 약 25배의 시장 확대가 예측됨 (Bromley 등. 2010).

- EU 국가에 대해 살펴보면, 2008년까지 이탈리아, 프랑스, 노르웨이, 핀란드, 오스트리아, 독일, 스위스 등이 연평균 15~33%의 높은 시장 확대를 보였으며 2008년까지 GHEX 기반 지열 교환 기술 유닛은 총 50만개 이상 시공됨. 향후 EU-25개국 평균 6% 이상의 Ground Source Heat Pump 시장의 성장이 예상되고 있으며 지열 저장/활용에 대해 EU Renewable Energy Framework를 제정하여 의무 도입 및 정부 지원을 수행하고 있으며 최근 거주용 주택에 대한 지열 활용이 적극적으로 도입되고 있음(Energy Watch Group, 2010).

- 미국의 경우 2008년 기준으로 연간 5만개의 GHEX 기반 지열 교환 유닛을 6:4 비율로 거주용/상업용 지열 교환 구조물을 시공. 연평균 30% 정도의 성장이 나타나고 있으며 National Energy Strategy는 지열 교환 기술을 통해 2030년 까지 1,000조 Btu 에너지를 절감할 것으로 예상하고 있음(ORNL, 2008).



Geothermal direct use	
Country	GWh/yr*
China	20 932
United States	15 710
Sweden	12 585
Turkey	10 247
Japan	7 139
Norway	7 000
Iceland	6 768
France	3 592
Germany	3 546
Netherlands	2 972
Italy	2 762
Hungary	2 713
New Zealand	2 654
Canada	2 465
Finland	2 325

그림 2-2-2 세계 및 국가별 저심도 지열 에너지 활용 규모 (IEA, 2010)

제 3 절 연구과제의 타 산업 및 국내외 연계·협력 가능성



그림 2-3-1 타산업 및 국내외 협력 가능성

그림 2-3-1은 본 연구개발과제의 타 산업 및 국내외 연계·협력 방안을 요약하여 나타낸 것임.

1. 기계 공조 및 히트 펌프 관련 산업계와의 협력

▷ 성능 계수 결정을 위한 프로그램 제공

- 기계 공조 및 히트 펌프 산업계의 지열을 활용한 냉난방 시스템에 대한 주요 관심사는 지반에 설치된 열교환기를 통과하여 다시 히트펌프로 유입되는 유체의 온도 값과 하이브리드 에너지원 특성을 고려한 성능 계수 산정임. 따라서 본 연구로부터 개발된 설계 프로그램을 활용할 경우 히트펌프로 유입되는 유체의 온도를 보다 합리적으로 산정하여 요구 성능계수에 적합한 냉난방 설계에 요구되는 히트펌프 설계와 접목될 수 있음. 특히 UTECUS와 같이 열 저장을 동반하는 경우 설계 프로그램의 중요성이 더욱 커질 것으로 예측됨.

2. 참여기업(인천국제공항공사)과의 추후 협력

▷ 개발 기술의 인천국제공항 실제 구조물에 적용 가능

- 본 연구개발의 참여기업인 인천국제공항공사는 현재 제 2 및 제 3 터미널 공사를 계획하고 있으며 정부의 공공기관 에너지 감축량 목표에 따라 2020년까지 30% 수준의 에너지 절감이 요구되며 이에 따라 넓은 부지에 설치되는 터미널, 물류창고 등에 지열 에너지를 적용하고자 함.

- 따라서 높은 냉난방 효율을 나타내는 UTECUS에 대한 경제성 평가, 설계 및 모니터링 기술 활용에 높은 관심을 가지고 있음. 따라서 본 연구개발이 수행될 경우 개발 기술을 직접 대형 Pilot test 등에 적용할 수 있다는 점과 적용 중 엔지니어링 업체들과 협력을 통해 상용화가 용이하다는 점에서 향후 연계성이 높다고 할 수 있음.

3. 지열관련 유럽 우수 대학 및 연구소와의 협력

- 지열 에너지 활용 및 지중 열 에너지 저장과 관련하여 가장 우수한 연구개발이 이루어지고 있는 유럽의 오스트리아, 스위스, 노르웨이의 우수 대학 및 연구소와 본 연구의 핵심 사항인 설계와 경제성 분석에 대한 기술 자문과 교류 방안을 논의 중이며 구체적인 협력 논의 사항은 표 1-7과 같음.

- 특히 세계적인 지반공학 연구 기관인 NGI와 지열 에너지 연구분야 협력을 위하여 본 연구팀 내 박사후 연수연구원 1인을 파견하기로 공식 협약하였으며 이를 통해 선진 연구 기술의 습득 및 국내 설계 기술의 해외 검증을 수행할 수 있을 것으로 기대됨.

표 2-3-1 국외 협력 계획

대상 기관	국가	협의 사항
비엔나 공대 (Vienna University of Technology)	오스트리아	Prof. Dietmar Adam - 도로 및 철도, 지하철 건설에서의 지열에너지 활용 연구
로잔 공대(EPFL)	스위스	Prof. Lyesse Laloui - 지열에너지와 주변 지반, 말뚝의 상호작용을 고려한 에너지파일 설계 프로그램 개발 - 열교환기를 활용한 터널 앵커의 적용에 관한 연구 논의
SUPSI (Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana)	스위스	Prof. Daniel Pahud - 에너지파일 설계 프로그램 Pilesim, Pilesim2 설명 및 적용성에 대한 자문 - 열응답 시험 수행 관련 논의 - 지열 교환기 현장 적용시 결과 분석 및 경제성 분석 논의 및 질의응답
NGI (Norwegian Geotechnical Institute)	노르웨이	NGI - NGI 지열 에너지 연구 센터 소개 - 지열에너지 관련 박사후 연구원 영년직으로 근무, 공동연구추진
AIST, NARO	일본	- 히트펌프 최적 운전 방안 관련 논의 및 공동연구 추진

제 3 장 연구 개발 수행 내용 및 결과

1절. 지반조건을 고려한 지중 열 물성 D/B 구축 및 평가기술 개발

1. 국내 화강 풍화토의 열전도도에 관한 데이터베이스 구축

가. 개요

지열 에너지는 연중 일정하게 유지되는 지중의 온도를 활용하여 건물 및 시설의 에너지 효율을 높이는데 쓰이는 친환경적 에너지원이다. 지열에너지는 주로 건물의 냉난방용으로 사용되는데, 이 냉난방시스템은 소위 지중 열 교환시스템(GSHP)라 일컬어진다. 지중 열 교환시스템(GSHP)에서 지중의 열은 heat source 로 이용되거나 heat sink 로 활용되어 계절에 따라 지반으로부터 열을 빼앗기거나 지반에 열을 전달하면서 히트펌프의 에너지 효율을 극대화 하는데 이바지 한다. 이 때 밀폐형 GSHP 시스템이 주로 사용되며 이것은 워터펌프와 연직 또는 수평으로 묻혀있는 파이프를 통하여 순환하게 된다. 일반적으로 수직형 열 교환기가 널리 이용되지만 최근 들어서는 수평형 열 교환기를 이용한 GSHP 시스템 활용이 늘어나고 있는 추세이다. 왜냐하면 시공 및 유지보수가 간편하고 수직형에 비해서 시공비가 저렴하고 넓은 부지의 현장에서 유용하게 활용되기 때문이다. 이미 선진국에서는 학교와 같은 공공시설과 산업단지시설 등에 이 수평형 열 교환기가 설치되어 지열에너지 활용에 크게 이바지하고 있다. 이러한 이유로 국내에서도 수평형 열 교환기를 이용한 밀폐형 GSHP 시스템이 점점 더 늘어나고 있다. 수평형 열 교환기는 기존의 수직형 지열 히트펌프에 비하여 지표면에서 가까운 깊이에 설치되며 이 경우 열 교환 거동은 토사층에서의 열전도도에 많은 영향을 끼친다. 수평형 열 교환기가 설치되는 지반의 깊이는 2~5m 로서 저심도 지반이며 상대적으로 지하수위의 영향과 자중으로 인한 다짐의 영향을 덜 받게 되며 낮은 함수비와 다소 느슨한 흙으로 구성되어 있다.

저심도 에너지 파일 설계에 있어서 가장 중요한 인자는 열 교환기가 설치되는 지반의 열전도도 값이다. 그 이유는 지반의 정확한 열전도도 추정이 GSHP 시스템의 효율적인 설계를 가능하게 하기 때문이다(Hart and Whiddon, 1984). 하지만 이러한 국내 저심도 지반의 특성을 반영하는 국내지반의 열 물성 데이터가 충분하지 않은 실정이고, 지반의 열전도도를 산정하는 기존의 모델들로 저심도 지반의 열전도도 값을 산정하는데에는 한계가 있다. 왜냐하면 기존 추정모델들은 자갈, 모래, 실트, 점토 등 명확히 구분된 흙의 종류를 대상으로 개발 되었거나 각 지역의 고유 특성을 지니는 지반을 대상으로 개발되었기 때문이다.

따라서 본 연구는 저심도 국내 화강 풍화토 지반의 열 특성에 초점을 맞추고 GSHP 시스템 설계에 필요한 많은 입력자료들을 얻고자 적절한 실험을 수행하였다. 또한 국내

화강 풍화토 저심도 지반의 열전도도 값을 추정할 수 있는 새로운 열전도도 추정 모델식을 제안하여 실험결과와 비교해보았다.

나. 이론적 배경

(1) 지반의 열전도도

열전도는 물질 내에 인접하는 분자들 사이의 온도경사에 의해 발생하는 열 이동 메커니즘이다(그림 3-1-1). 열전도는 항상 온도가 높은 영역에서 낮은 영역으로 이동하며 두 영역의 온도가 평형을 이룰 때까지 진행된다. 이는 고체, 액체, 기체 모든 상에서 발생하고 고체의 경우에는 격자구조의 분자의 진동과 자유전자에 의한 에너지 이동에 의해 발생한다.

열전도도는 두께가 1m 인 평판에 1 Kelvin 의 열이 가해졌을 때 전달되는 열의 양을 Watt 로 측정하여 구하고 열전도도의 SI 단위는 W/mK 이다. 지반이 열원으로부터 공급되는 열량을 얼마나 빠르게 외부로 전달하는가를 나타내는 척도라고 할 수 있다. 열전도도는 열 저항의 역수이며 전기 전도도와 유사하다.

전도법칙은 Biot 에 의한 실험적 관찰 내용에 기초를 두며 Fourier 의 법칙으로 알려져 있다. 여기서 열전도도는 온도경사와 열 유속의 직각방향 면적에 비례한다고 하였으며 다음과 같이 미분방정식 형태의 식 (1.1.1)로 표현했다.

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T \tag{1.1.1}$$

이를 균질한 물질의 두 끝 점에서 1 차원적으로 온도가 평형을 이룰 때까지 적분하면 다음과 같은 열 흐름율 식 (1.1.2)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\triangle Q}{\triangle t} = -\lambda A \frac{\triangle T}{\triangle x} \tag{1.1.2}$$

따라서 열전도도는 다음과 같은 식 (1.1.3)을 통해 구할 수 있다.

$$\lambda = \frac{\triangle Q}{\triangle t} \frac{1}{A} \frac{\triangle x}{\triangle T} \tag{1.1.3}$$

t 는 시간을 나타낸다.

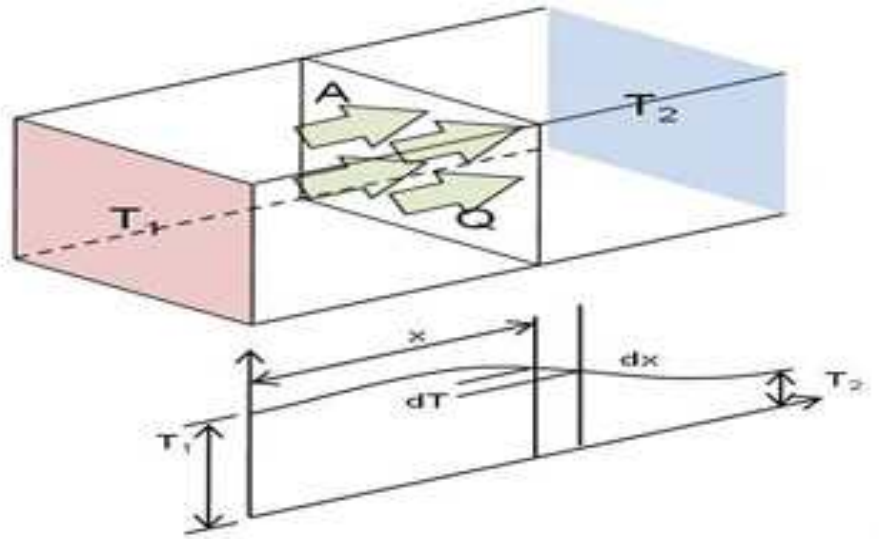


그림 3-1-1 열전도 메커니즘

(2) 열전도도에 영향을 미치는 인자들

일반적으로 흙의 함수비, 건조단위중량, 광물구성비, 입도분포, 온도, 토성 등이 흙의 열전도도에 영향을 주는 인자들이다(Kersten, 1949; Penner et al, 1975; Salomone et al, 1984; Salomone and Kovacs, 1984; Salomone and Marlowe, 1989; Brandon and Mitchell, 1989; Mitchell, 1991). 그 중에서도 흙의 열전도도에 가장 큰 영향을 주는 인자는 흙의 함수비이다. 흙의 함수비는 흙 입자 사이에서의 열 전달을 매개하는 접촉면적과 밀접한 관련이 있다. 수분이 흙의 공극(void)속으로 침투되면 입자 사이에 얇은 수분막이 생성되고, 이것이 곧 입자 사이의 water bridge가 된다. 이는 유효 접촉면적을 증가시켜서 열 흐름이 잘 일어나게 하고 결과적으로 흙의 열전도도를 증대시킨다(그림 3-1-2).

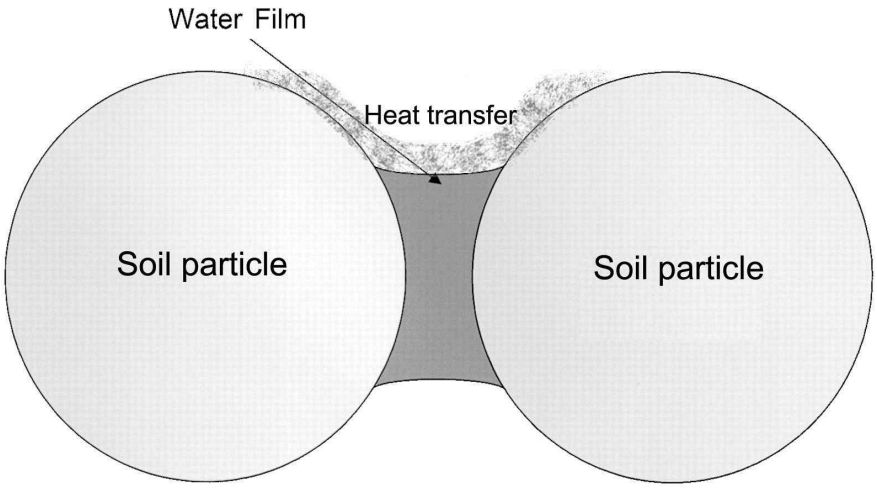


그림 3-1-2 수분이 함유된 흙 입자 사이의 열 전달

흙의 열전도도에 영향을 주는 또 다른 중요한 인자는 흙의 건조단위중량이다. 건조단위중량이 커질수록 단위부피당 더 많은 흙 입자가 들어가게 되고 그리하여 입자들 사이 접촉점이 증가한다. 접촉점의 수가 증가하면 더 많은 열 전달 경로를 제공하여, 결과적으로 더 높은 열전도도를 만들어낸다(Salomone and Marlowe, 1989).

또한 흙을 구성하고 있는 조성광물 마다 고유의 열전도도 값을 가지고, 조성광물들이 흙에서 차지하는 체적비에 따라 열전도도가 달라지게 된다. 광물의 종류별 열전도도 값을 표 3-1-1 에 나타내었다. 대부분의 광물들은 1~12 W/mK 범위의 열전도도를 가지며, 대표적 광물인 석영은 7.69W/mK 의 비교적 높은 열전도도를 갖는다. 일반적으로 석영 함유량이 높은 모래가 사장석이나 장석, 휘석 함유량이 높은 모래보다 더 큰 열전도도 값을 가진다(Kersten, 1949).

흙의 입도분포 역시 흙의 열전도에 영향을 주는 또 다른 요인이다. 입도분포가 좋으면 작은 입자들이 큰 입자들 사이의 간극을 메우게 됨에 따라 간극율이 줄어들고 접촉면이 늘어난다. 이로 인해 높은 열전도도를 가질 수 있게 된다(Esch, 2004). 즉, 양입도(well-graded)분포를 가지는 흙이 빈입도(uniformly-graded)분포를 가지는 흙보다 더 큰 열전도도를 나타낸다.

실내 온도에서 온도에 따른 열전도도 값의 변화는 아주 미미하다고 볼 수 있다(Brandon and Mitchell 1989). Kersten(1949)의 보고서에 따르면 4.4℃~21℃ 온도범위에서 흙의 열전도도 값은 4%의 평균 분산을 가진다. 낮은 함수비에서는 비동결 상태가 동결 상태보다 열전도도가 높고, 높은 함수비에서는 그 반대의 경향을 보인다(Penner et al. 1975) 흙의 토성(soil texture) 또한 흙의 열전도도에 영향을 끼친다. 일반적으로 주어진 함수비와 건조단위중량에서 거칠고 각진 조립질 토성의 흙이 세립질 토성의 흙보다 열전도도가 더 높다(Kersten, 1949; Salomone and Marlowe, 1989).

표 3-1-1 광물 종류에 따른 입자의 밀도 및 열전도도 (Horai, 1971)

Mineral	$\rho_{s\,(g/m^3)}$	$\lambda(W/mK)$	*Mineral*	$\rho_{s\,(g/m^3)}$	$\lambda(W/mK)$
1. Nesosilicates (single tetrahedron)			**6. Tectosilicates (framework)**		
Olivine			Feldspar		
Chrysolite	3.47	4.81	Celsian	3.09	1.44
Fayalite	4.36	3.16	Microline	2.56	2.49
Forsterite	3.28	5.03	Orthoclase	2.58	2.32
Hyalosiderite	3.77	3.45	Sanidine	2.57	1.65
Garnet			Feldspathoid		
Almandine	3.93	3.31	Nepheline	2.62	1.73
Andradite	3.75	3.09	Sodalite	2.33	2.51
Grossularite	3.49	5.48	Plagioclase		
Pyrope	3.75	43.18	Albite	2.63	1.96
Spessartite	3.99	3.40	Anorthite	2.77	1.68
2. Sorosilicates (double tetrahedron)			Bytownite	2.70	1.56
Epidote			Labradorite	2.70	1.53
Clinozoisite	3.36	2.40	Oligoclase	2.64	1.98
Epidote	2.19	2.83	Silica		
Zoisite	3.27	2.15	Hyalite	2.08	1.21
Idocrase	3.34	2.41	Novaculite	2.66	7.21
3. Cyclosilicates (rings of tetrahedrons)			Quartz	2.65	7.69
Beryl	2.7	3.99	Vitreous silica	2.21	1.35
Cordierite	2.56	2.72	**7. Carbonates**		
Tourmaline	3.13	5.28	Calcite	2.71	3.59
4. Inosilicates (chains of tetrahedrons)			Dolomite	2.90	5.51
Amphibole (double chanins)			Siderite	3.81	3.01
Actinolite	3.06	3.48	**8. Oxides**		
Grunerite	3.40	3.32	Hematite	5.14	11.28
Hornblende	3.18	2.81	Ilmenite	4.55	2.38
Tremolite	2.99	4.78	Magnetite	5.15	5.10
Pyroxene (single chains)			Magnesiochromite	4.23	2.54
Acmite	3.54	3.49	**9. Hydroxides**		
Augite	3.27	3.82	Brucite	2.39	8.44
Bronzite	3.36	4.16	Gibbsite	1.88	2.60
Diopside	3.33	4.93	**10. Sulphates**		
Enstatite	3.27	4.47	Anhydrite	2.98	4.76
Spodumene	3.16	5.65	Barite	4.41	1.34
5. Phyllosilicates (sheets)			Gypse	2.30	1.26
Chlorite	2.75	5.15	Selenite	2.32	1.26
Mica			**11 Halides**		
Biotite	2.98	2.02	Fluorite	3.10	9.51
Glauconite	2.85	1.63	Halite	2.10	6.11
Lepidomelane	2.86	1.57	**12. Suphides**		
Muscovite	2.85	3.48	Chalcopyrite	4.09	8.20
Phlogopite	2.85	2.13	Pyrite	5.1	19.21
Pyrophyllite	2.83	8.14	Pyrrhotite	4.6	1.89
Serpentine			Sphalerite	4.00	12.73
Antigorite	2.66	2.95	**13. phosphates**		
Chrysotile	2.60	5.30	Amblygonite	3.03	4.99
Lizardite	2.60	2.34	Chlorapatite	3.15	1.39
Talc	2.81	6.10	Fluorapatite	3.22	1.37

(3) 열전도도 예측 모델

기존에 제안된 열전도도 추정 모델들이 많이 존재하지만 대부분의 모델들이 특정한 흙의 종류나 조건 등에 한정되어 적용 가능하다. 기존에 제안되어 있는 모델들은 다음과 같다.

(가) Johansen's model

Johansen(1975)은 흙의 건조상태의 열전도도(λ_{dry})및 포화상태의 열전도도(λ_{sat}), Kersten number(K_e)로 불포화상태 흙의 열전도도 추정식을 다음과 같이 제안하였다. 건조상태와 포화상태의 값을 기준으로 보간법을 적용하여 불포화 상태 흙의 열전도도를 추정하게 된다.

$$\lambda = \left(\lambda_{sat} - \lambda_{dry}\right) K_e + \lambda_{dry} \tag{1.1.4}$$

단위는 W/mK 이다.

Kersten number, K_e는 종류에 따라 달리 추정되는데, 포화도(S_r) 0.05 이상의 조립질 비동결토에서

$$K_e = 0.7 \log S_r + 1.0 \tag{1.1.5}$$

포화도 0.1 이상의 세립질 비동결토에서

$$K_e = \log S_r + 1.0 \tag{1.1.6}$$

모든 타입의 동결토에서

$$K_e = S_r \tag{1.1.7}$$

이며 이 때 $\pm K_e = 0.1$ 미만의 차이를 허용한다.
Johansen 은 건조토에 대해 다음과 같은 반 경험식을 제안하였다.

$$\lambda_{dry}(W/mK) = \frac{0.137\rho_d + 64.7}{2{,}700 - 0.947\rho_d} \pm 20\% \tag{1.1.8}$$

이 때 ρ_d는 건조밀도이며 단위는 kg/m^3이다. Johansen 은 쇄석 흙의 경우 상대적으로 높은 열전도도를 나타내는 것을 관찰하였고 이에 관해

$$\lambda_{dry}(W/mK) = 0.039n^{-2.2} \pm 25\% \quad (1.1.9)$$

로 제안하였다. 이 때 n은 흙의 간극률이다.

포화토에 관해서는 흙의 미세구조의 변화는 흙의 열전도도에 작은 영향만을 미치며, geometric mean 모델에 기반하여 포화토의 구성성분인 흙입자와 물의 체적비를 이용한 다음 관계식을 제안하였다. 비동결 포화토에 대하여

$$\lambda_{sat} = \lambda_s^{1-n}\lambda_w^n \quad (1.1.10)$$

약간의 비동결된 물의 체적(w_u)을 포함하는 동결 포화토에 대하여

$$\lambda_{sat} = \lambda s^{1-n}\lambda_i^{n-w_u}\lambda_w^{w_u} \quad (1.1.11)$$

를 제안하였고 얼음의 열전도도로 λ_i=2.2 W/mK, 물의 열전도도 λ_w=0.57 W/mK 를 이용해 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있게 된다.

$$\lambda_{sat} = \lambda_s^{1-n}(2.2)^n(0.57)^{w_u} \quad (1.1.12)$$

또한 geometric mean 모델에 기반하여 흙 입자의 열전도도 λ_s는

$$\lambda_s = \lambda_q^q\lambda_o^{1-q} \quad (1.1.13)$$

로 제안하였고, 여기서 λ_q는 석영의 열전도도 8.4 W/mK 이며 q 는 석영의 체적비이고 λ_o는 흙입자의 다른 나머지 조성광물의 열전도도로 2.0 W/mK 을 사용한다. 조립질 흙의 경우 석영 함유량이 20% 미만일 때는 λ_o=3.0 W/mK 를 사용한다.

Johansen 의 모델은 포화도가 높아짐에 따라 발생할 수 있는 흙 내부 수분의 이동을 고려하지 못하며 흙을 구성하는 광물에 대한 정보, 최소한 석영의 조성비가 주어져야만 사용가능하다. 또한 Farouki(1986)에 의하면 본 모델은 포화도 20% 이상의 흙에 적용되는 것이 적절하다.

(나) Kersten's model

Kersten 은 자연 흙과 쇄석 중 순수한 모래, 순수한 점토와 입경이 작은 흙 등으로 많은 실험을 수행하였고 이를 바탕으로 모델을 유도하였다(1949). 실험은 시료의 건조밀도와 수분함량을 조절할 수 있는 조건에서 열류를 원통형 용기 내에서 직경방향으로 흘리는

방식으로 진행되었고 시료의 성분, 입자 크기, 온도, 건조밀도, 함수비를 각각 분석하여 모델을 유도하였다. Faoruki 가 Kersten 의 모델을 SI 단위로 전환하였다(1981).

실트나 점토 함유량 20%미만인 석영이 지배적 조성광물인 조립질 비동결토의 경우

$$\lambda = 0.1442(0.7\log w)(10)^{0.6243\rho_d} \tag{1.1.14}$$

동결토의 경우

$$\lambda = 0.01096(10)^{0.8116\rho_d} + 0.004619(10)^{0.9115\rho_d} w \tag{1.1.15}$$

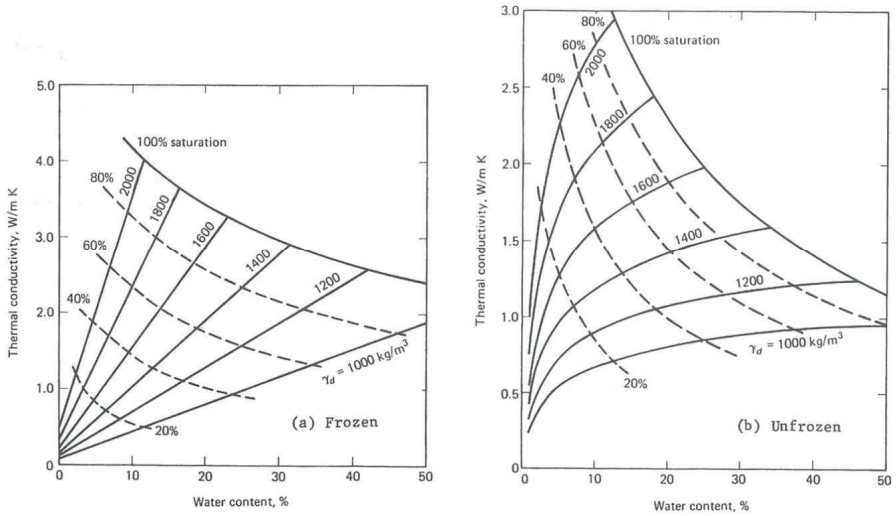
를 제안하였고 여기서 ρ_d는 g/cm^3이다. 본 식은 함수비, 건조밀도, 포화도에 기반하여 그림 1.1.3 에 나타내었다. 가정 사항에서 알 수 있듯이 본 모델은 석영 함유량의 변화를 반영하지 못하여 모래와 실트나 점토 사이로 분류되는 흙에 대하여 석영 함유량에 기반한 다음과 같은 열전도도 추정식을 제안하였다. 50% 이상의 실트질 점토를 함유하는 비동결 세립토의 경우

$$\lambda = 0.1442(0.9\log w - 0.2)(10)^{0.6234\rho_d} \tag{1.1.16}$$

동결토의 경우

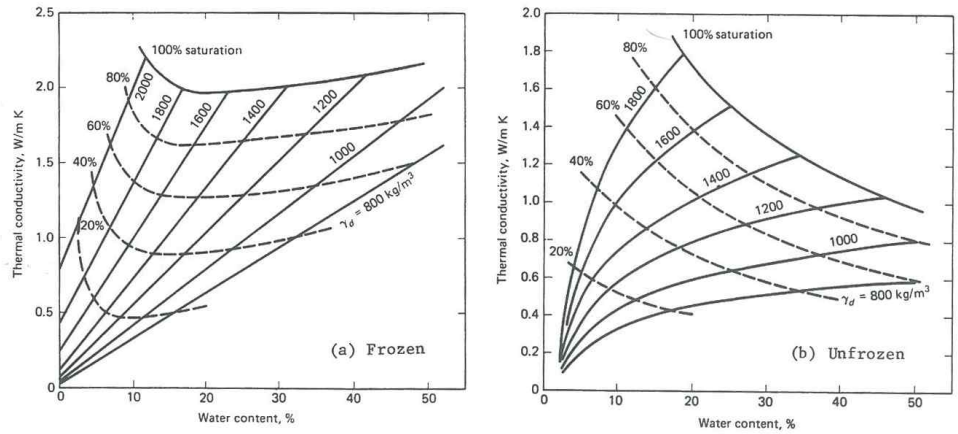
$$\lambda = 0.0001442(10)^{1.373\rho_d} + 0.01226(10)^{0.4994\rho_d} w \tag{1.1.17}$$

를 제안하였고 동결토에 포함된 얼지 않은 물은 고려되지 않는다. Kersten 에 의하면 본 모델들은 실제 측정된 값과 ± 25% 범위 내에서 일치한다고 밝혔다. 또한 Harlan and Nixon(1978)은 Kersten 의 모델을 흙의 종류, 건조밀도, 함수비 및 포화도를 기반으로 하여 흙의 열전도도를 추정하는데 바로 적용할 수 있도록 자갈 및 모래, 실트, 점토, 피트에 관해 그림 3-1-3, 3-1-4, 3-1-5 와 같이 도식하였다.



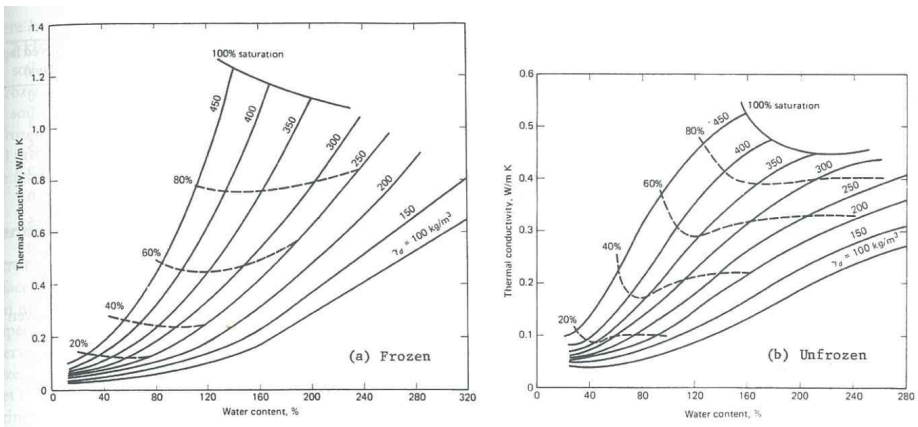
(a) 동결 (b) 비동결

그림 3-1-3 모래와 자갈의 평균 열전도도



(a) 동결 (b) 비동결

그림 3-1-4 실트와 점토의 평균 열전도도



(a) 동결 (b) 비동결

그림 3-1-5 피트의 평균 열전도도

(Reproduced with permission from Harlan and Nixon 1978. Copiright 1978 McGraw-Hill)

본 모델은 함수비와 건조밀도만 주어지면 열전도도를 추정할 수 있지만 석영이 지배적인 흙에 기반하여 만들어 졌으며 Farouki(1986)에 의하면 포화도 90% 까지의 동결토에 적절한 결과를 준다.

(다) De Vries' model

De Vries(1952)는 물 또는 공기라는 매개체 내에 타원 형태의 흙 입자를 가정하여 다음과 같은 열전도도 모델을 제안하였다.

$$\lambda_h = \frac{\sum_{j=1}^{n} \lambda_j \theta_j \lambda_{h,j}}{\sum_{j=1}^{n} \lambda_j \theta_j} \tag{1.1.18}$$

$\lambda_{j,h}$는 열전도성, θ_j는 j 번째 성분 흙의 미소 체적 수분함량, λ_j는 j 번째 성분 흙에 가해지는 온도 경사의 평균 간격에 대한 물 또는 공기의 온도 경사의 평균 간격 비이다. 흙 입자를 바늘 형태라 가정했을 때, λ_j는

$$\lambda_j = \frac{2}{3}[1+(\frac{\lambda_{h,j}}{\lambda_{h,w}}-1)g_j]^{-1} + \frac{1}{3}[1+(\frac{\lambda_{h,j}}{\lambda_{h,j}}-1)(1-2g_j)]^{-1} \tag{1.1.19}$$

이며 g_j는 흙의 구성성분에 따른 형상계수로 표 3-1-2 에 나타내었다.

표 3-1-2 흙의 구성성분에 따른 아래첨자와 형상계수 (Nobre and Thomson, 1993)

Constituent	Subscript j	Shape Factor
Quartz	q	0.125
Clay	c	0.125
Organic matter	o	0.500
Water	w	-
Air (dry)	a	variable

공기 내에서 형상 계수는 체적 수분함량에 좌우되며 구형일 때 건조시 0.013 에서 포화시까지 선형적으로 변한다(Kimball et al, 1976).

$$g_a = 0.013 + (\frac{0.022}{\theta_{w,wilt}} + \frac{0.298}{\eta})\theta_w \tag{1.1.20}$$

여기서 $\theta_{w,wilt}$는 Wilting point 의 체적 수분 함량이며 η는 흙의 간극률이다.

식 (1.1.20)은 $\theta_w > \theta_{w,wilt}$일 경우에만 적용된다. 매우 건조한 흙의 경우 본 모델은 공기를 연속적 매개체로 적용할 수 있지만 $\theta_w < 0.03$인 조립토나 $\theta_w < 0.05 \sim 0.1$인 세립토의 경우 불연속으로 다루어야 한다고 하였다. $\theta_w \approx 1$ 이하에서 본 모델은 열전도도를 과대평가하는데 이는 물이 연속체로 존재하지 않기 때문으로 보인다.

(라) IGSHPA 도표

미국 IGSHPA (International Ground Source Heat Pump Association)는 열전도도를 추정하는 아래의 표 3-1-3 을 제안하였다. 하지만 여러 입도의 흙 입자가 혼합되어 있고 어느 정도의 수분을 함유하는 실제 지반에서는 기술자의 판단에 의존하거나 실험적 방법으로 열전도도를 구해야 한다.

표 3-1-3 흙의 열 특성 (IGSHPA, 1988)

Thermal Texture Class	Thermal Conductivity	Thermal Diffusivity
	W/mK	$cm^2/\sec$
Sand (or gravel)	0.77	0.0045
Silt	1.67	-
Clay	1.11	0.0054
Loam	0.91	0.0049
Saturated sand	2.50	0.0093
Saturated silt or clay	1.67	0.0066

표 3-1-4 는 건조 밀도와 수분함량에 따른 모래와 점토의 열전도도와 열 확산성을 나타낸 것으로, 구한 값의 평균값을 취한 것이다.

암반은 흙에 비해 균질하고 다공성재가 아니기 때문에 적용하기에 무리가 없지만 흙의 경우에는 순수한 자갈이나 모래, 점토에 대한 범위만을 나타낸 상태여서 일반적인 혼합토사나 함수비가 높은 지반에 적용하려면 기술자의 판단에 의존해야 하는 한계가 있다.

표 3-1-4 모래와 점토의 열전도도 및 열 확산율 (ASHRAE, 1997)

Soil Type	Dry Density	5% Moist		10% Moist		15% Moist		20% Moist	
		λ	α	λ	α	λ	α	λ	α
Coarse 100% sand	120	1.20-1.90	0.96-1.50	1.40-2.00	0.93-1.30	1.60-2.20	0.91-1.20	-	-
	100	0.80-1.40	0.77-1.30	1.20-1.50	0.96-1.20	1.30-1.60	0.89-1.10	1.40-1.70	0.84-1.00
	80	0.50-1.10	0.60-1.30	0.60-1.10	0.60-1.10	0.60-1.20	0.51-1.00	0.70-1.20	0.52-0.90
Fine grain 100% clay	120	0.60-0.80	0.48-0.64	0.60-0.80	0.40-0.53	0.80-1.10	0.46-0.63	-	-
	100	0.50-0.60	0.48-0.58	0.50-0.60	0.40-0.48	0.60-0.70	0.37-0.48	0.60-0.80	0.41-0.55
	80	0.30-0.50	0.36-0.60	0.35-0.50	0.35-0.50	0.40-0.55	0.34-0.47	0.40-0.60	0.30-0.45

Values indicate ranges predicted by five independent methods
Thermal conductivity (λ) - , Thermal diffusivity (α) -
Coarse grain = 0.075 - 5 mm;
Fine grain < 0.075 mm (0.075 mm = #200 U.S. Standard Sieve)

(마) Côté and Konrad's model

Côté and Konrad(2005)는 Johansen 의 모델의 K_e를 간편하게 수정하였다. Johansen 의 모델에서 로그함수를 제거하기 위해 경험계수 k 를 사용하여 S_r과 K_e의 관계를 나타내었다.

$$K_e = \frac{kS_r}{1+(k-1)S_r} \tag{1.1.21}$$

경험계수 k 는 자갈, 중간모래, 실트질 흙, 유기질 흙에 대해 각각 4.60, 3.55, 1.90, 0.60 을 제시하였다. 또한 흙의 간극율에 따른 λ_{dry}를 구하는 경험식을 제시하였다.

$$\lambda_{dry} = \chi 10^{-\eta n} \tag{1.1.22}$$

여기서 χ(W/mK)와 η 는 입자 형상의 영향을 반영한다. 파쇄암의 경우 χ 은 1.70, η 는 1.80, 광물질 토사의 경우 χ 은 0.75 , η 는 1.20, 유기질 토사의 경우 χ 은 0.30, η 는 0.87 을 제안하였다. 본 모델에서 Johansen 이 제안한 포화시의 열전도도를 계산하는 식을 사용하지만, 흙입자의 열전도도를 계산하는 부분은 암반을 형성하는 광물 각각의 열전도도와 체적비를 이용하여 geometric mean 법을 이용하여 구하는 점에서 석영과 기타 광물로 고려하는 Johansen 의 모델과 차이를 보인다.

(바) Lu's model

Lu 등(2007)이 Johansen의 모델의 K_e를 S_r과의 관계식으로 조금 더 개선 시켰다. 기존의 K_e는 특히 세립토와 낮은 함수비의 경우 정확하지 않다.

$$K_e = \exp\alpha[1 - S_r^{\alpha - 1.33}] \tag{1.1.23}$$

여기서 α는 흙의 종류에 따른 계수이다. 포화도에 따른 열전도도 측정값을 정규화 시킨 그래프를 산정하였고 조립토와 세립토로 구분하여 α를 나타내었는데, 조립토와 세립토일 때 각각 0.96과 0.27이다. 1.33은 형상계수이다.

또한 λ_d와 n의 관계를 선형으로 규명하였다.

$$\lambda_d = -an + b \tag{1.1.24}$$

여기서 a 및 b는 간극률에 따른 열전도도 변화의 그래프에서 곡선맞춤하여 구한 경험 계수로 각각을 0.56, 0.51로 제시하였다. 다른 식들은 Johansen과 동일한 식을 사용하였고 모래는 석영으로만 조성되어 있다고 가정하였다.

(사) Van Rooyen and Winterkorn's model

Van Rooyen의 수정식(Van Rooyen and Winterkorn, 1957)은 서로 다른 유형의 모래와 자갈로부터 수집한 자료에 기반한 식이다. 식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{\lambda} = B10^{-CS_r} + b \tag{1.1.25}$$

여기서 λ는 흙의 열전도도(W/mK), S_r은 포화도, B, C, 그리고 b는 각각 건조단위중량, 광물유형, 입상의 함수들을 나타낸다. Van Rooyen and Winterkorn의 모델은 1.5%~10% 포화수준의 비동결토에만 적용되도록 제한된다.

(아) Gemant's model

Gemant 수정식(Gemant 1952)은 이상적인 흙 입자를 기반으로 제안되었다. Gemant는 이상적인 입자들이 꼭지점에서만 접촉하게 되고 이러한 접촉점 주변에서 모이게 되는 수분이 thermal bridge를 형성한다고 가정하였다. 또한 열 흐름은 수직방향으로만 이루어진다고 가정하였다.

Gemant 수정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{\lambda}=\frac{[(1-a)/a]^{4/3}\tan^{-1}[(\lambda_s-\lambda_w)/\lambda_w]^{1/2}}{(h/2)^{1/3}[\lambda_w(\lambda_s-\lambda_w)]^{1/2}}+\frac{(1-z)}{\lambda_s a}\psi(\frac{b^2}{a})$$

여기서,

$$a=0.078\rho_d^{1/2} \tag{1.1.26}$$

$$h=0.16\times10^{-3}\rho_d w-h_0$$

$$z=(\frac{1-a}{a})^{2/3}(\frac{h}{2})^{1/3}$$

$$b^2=(\frac{a}{1-a})^{2/3}(\frac{h}{2})^{2/3}$$

Gement 의 제안식은 비동결토에서만 합리적인 결과값을 준다.

(자) Sakashita and Kumada's model

Sakashita and Kumada(1998)는 조밀한 벤토나이트의 미세구조를 고려한 열 전달 모델을 제시하였다. 입자 속 미소공과 입자 사이 대공극이 연속적인 고체상 안에서 사각형의 평형육면체 모형으로 간주된다. Ould-Lahoucine et al(2002)은 실험데이터와 수정모델을 이용하여 모델 속 미지수를 결정하였다.
이론식은 다음과 같다.

$$\lambda=\lambda_{dry}1+[(9.750n-0.706)S_r]^{0.285n+0.731} \tag{1.1.27}$$

(차) 이론적 모델(Geometric mean model, Parallel model, Series model)

이론적인 모델로는 수학적인 산술평균(arithmetic mean), 기하평균(geometric mean), 조화평균(harmonic)에 기반하여 제시된 Parallel 모델, Geometric mean 모델, Series 모델이 있으며 이들은 각각 다음과 같은 식 (1.1.28), (1.1.29), (1.1.30)으로 정의되었다. λ_i는 각상(흙 입자, 물, 공기, 얼음)의 열전도도를 의미하며 n_i는 각 상의 volume, fraction 을 의미한다.

$$\lambda=\sum n_i\cdot\lambda_i \tag{1.1.28}$$

$$\lambda=\sum\lambda_i^{n_i} \tag{1.1.29}$$

$$\lambda=(\sum n_i/\lambda_i)^{-1} \tag{1.1.30}$$

Parallel 모델은 열전도도를 과대평가, Series 모델은 과소평가하여 알려진 열전도 데이터가 없을 때 각 각 upper boundary 와 lower boundary 로 적용되며 geometric mean 모델은 두 모델의 중간 정도의 값을 나타내는 것으로 알려져 있다(Clauser and Huenges, 1995).

광물 조성비에 대해 일반화 된 geometric mean method 는 다음과 같다.

$$\sum_j x_j = 1 \quad \text{with} \quad \lambda = \sum_j \lambda_{m_j}^{x_j} \tag{1.1.31}$$

여기서, λ_{m_j}는 j 번째 광물의 열 전도도(W/Mk), x_j는 j 번째 광물의 구성비를 의미한다.

다. 데이터베이스 구축

(1) 열전도도 측정실험

일반적으로 열전도도 실험은 비정상상태법(non steady state method)과 정상상태법(steady state method)이 있다. 정상 상태법은 두 물질의 온도 차이를 일정하게 유지하는데 필요한 열 유속을 측정하여 열전도도를 구하는 방법이다. 정상 상태법을 이용한 대표적인 장비는 HFM(Heat Flow Meter)이다(그림 3-1-6c). 지배방정식은 단순하지만 두 표면의 배열이 불완전 하면 정확도가 떨어지고 측정 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 비정상 상태법은 선형 열원 이론에 기반하여 매우 가는 금속선에 전류를 흘려 시간에 따른 금속선의 온도 상승을 이용하여 열전도도를 측정하는 것으로 간편하고 측정 시간이 짧은 장점이 있다. TP08 Probe 와 Quickline 30 이 비정상상태법의 대표적인 실험 장비이다(그림 3-1-6a,b).



(a) TP08 (b) Quickline 30 (c) HFM 436
그림 3-1-6 열전도도 실험장비

본 연구에서는 Hukseflux 사의 TP08 Probe 를 이용하여 흙의 열전도도를 측정하였고, 장비는 그림 3-1-7 과 같이 ① 전기선 ② 베이스 ③ needle ④ temperature sensor ⑤ heating wire ⑥ thermocouple junction (열전대)로 구성되어 있다. 본 탐침은 하나의 thermocouple 로 구성되어 있으며 thermocouple junction 은 온도차로

thermoelectromotive force(열기전력)을 발생시키는 두 가지 다른 금속의 접합체이다. Thermocouple 이 하나이기 때문에 베이스부분과 시료가 완벽히 같은 온도일 때 실험이 수행되어야 더욱 정도 높은 결과를 준다.

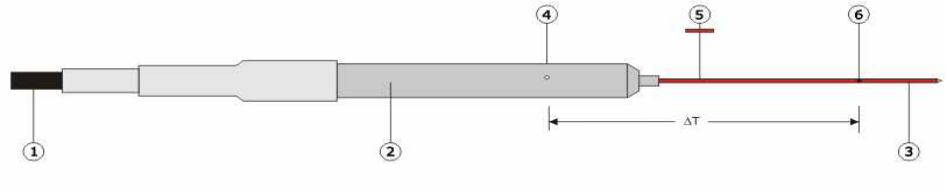


그림 3-1-7 TP08 Probe (Hukseflux)

TP 08의 제원은 다음 표 3-1-5와 같다.

표 3-1-5 TP08 제원

TP08 SPECIFICATIONS	
실험방법	ASTM D 5334-00 and D 5930-97, IEEE Std 442-1981
탐침 치수	길이 70 mm, 지름 12mm
측정 범위 (λ)	0.1 to 6 W/m.K
온도 범위	-55 to +180 °C
측정시간	200 초(전형적)
실험 가능 시료	조립질 물질, 파우더, 슬러리, 젤, 페이스트.
시료 요구 조건	최소 반경 20mm 최소 부피 80ml 최소 높이 35mm

그림 3-1-8 과 같이 탐침의 열원으로부터 시료에 열이 가해지면, 열기전력 (thermoelectromotive force)이 발생되고, 이로 인한 온도센서에서의 온도변화차이를 이용하여 비정상상태에서의 열전도도를 측정하게 된다. 본 장비의 적합성을 검증해보기 위해 다른 열전도도 측정 장비로부터 얻은 결과 값과 비교해 보았다. 대상 시료는 동일한 주문진 규사를 사용하였고 비교한 결과 값은 표 3-1-6 에 나타내었다. 표 3-1-6 에서와 같이 TP08 장비로 얻은 열전도도 값은 비교적 정확한 값을 산출하고 있음을 확인하였다.

표 3-1-6 장비 별 열전도도 (주문진 규사)

	Thermal conductivity of soil (fully dried)
TP08 Probe	0.17~0.25
quickline30	0.21~0.23
HFM (Heat Flow Meter)	0.24~0.25

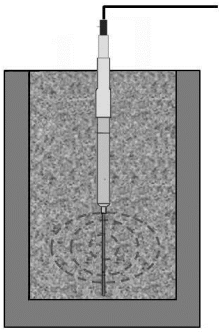


그림 3-1-8 탐침 실험 원리

(2) 실험 대상 시료

본 연구는 충남 세종시 연기군(W1), 강원 평창군(W2), 전남 담양군(W3), 부산 금정구(W4)에 분포하고 있는 국내 화강 풍화토를 대상으로 열전도도 측정 실험을 수행하였다. 표 3-1-7 은 채취한 대상시료의 기본적 물성치를 나타낸 것이다. 현장에서 채취한 비교란 시료의 간극률(porosity)은 약 40~50% 였고, 그림 3-1-10 에서와 같이 세립토(입경 <0.074mm)의 비율이 3% 이하로 상대적으로 낮은 비소성(Non-plastic)흙으로 확인 되었다.

표 3-1-8 와 그림 3-1-9 는 대상 시료의 광물 정량 분석(XRD)실험 결과를 보여준다. 흙을 구성하는 광물들의 조성비와 각 광물입자들의 열전도도값을 이용하여 흙 입자의 열전도도 값(λ_s)을 산정하였다. 이는 광물 조성비에 대해서 일반화 된 Geometric mean method 를 이용하여 산정된 것이다. 또한 화강 풍화토와는 다르게 주문진사(S1)의 경우 석영 비율이 90% 이상을 차지하고 있다. 즉, 화강 풍화토와 모래의 광물 조성비가 확연히 다르며, 때문에 모래를 대상으로 제안했던 기존의 모델들을 국내 화강 풍화토에 적용하는 것이 무리가 있을 것이라 사료된다.

열전도도 측정 실험은 간극비, 함수비(또는 포화도)를 변화시켜가며 수행하였다.

표 3-1-7 권역별 국내 화강 풍화토 기본 물성치

Soil	porosity*	C_u	C_c	G_s	USCS*
S1	45.19	2.06	1.05	2.65	SP
W1	44.44	13.80	1.67	2.58	SW
W2	46.3	7.80	1.01	2.55	SW
W3	52.38	7.67	1.23	2.56	SW
W4	53.05	12.83	1.47	2.54	SW

*porosity(%,undisturbed)

*Unified Soil Classification System

표 3-1-8 광물정량분석(XRD) 결과

Soil	Mineral portion(%)								λ_s (W/mK)
	Quartz	Microcline	Albeit	Kaolin	Orthoclase	Muscovite	Illite	Chlorite	
S1	92.0								7.0
W1	28.2	21.8	24.6	13.8	-	5.9	4.2	0.8	3.504
W2	28.6	19.0	28.5	9.0	-	6.8	-	1.1	3.491
W3	40.7			30.8	17.4		11.1		6.044
W4	38.5	-	23.5	17.9	19.2	-	-	0.6	3.875

***Provided by KIGAM**

S1:주문진사, W1:세종 연기군, W2:강원 평창군, W3:전남 담양, W4:부산 금정

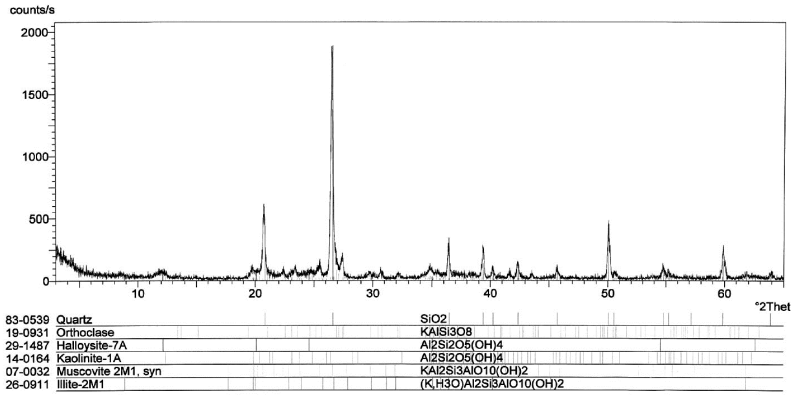


그림 1.1.9 광물정량분석(XRD) 결과(W3)

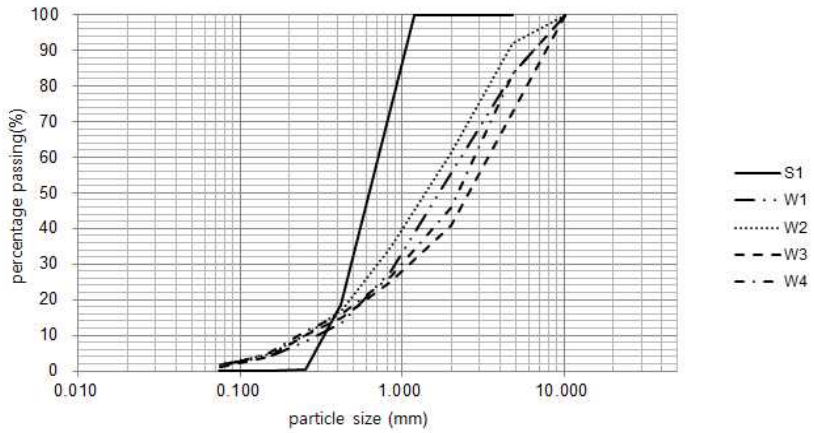
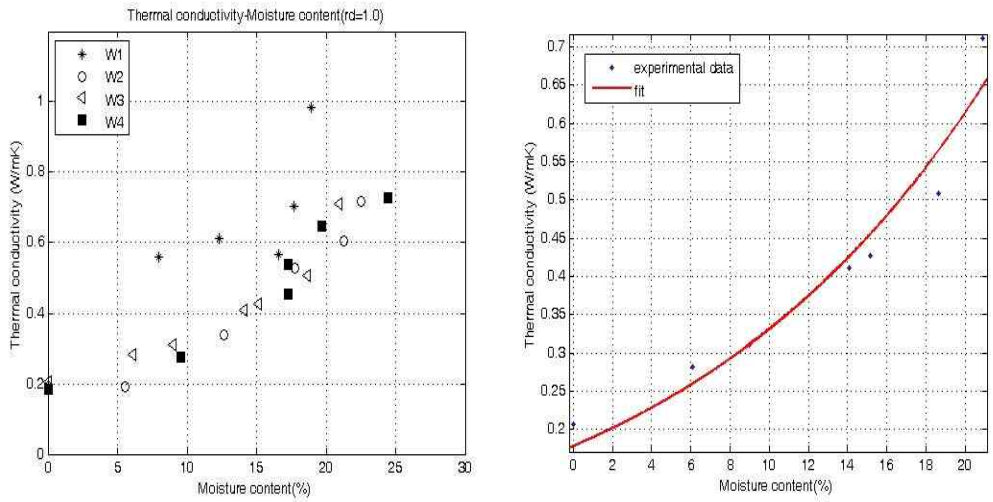


그림 3-1-10 광물정량분석(XRD) 결과(W3)

(3) 실험 결과 및 분석

(가) 함수비가 열전도도에 미치는 영향

흙의 열전도도에 가장 큰 영향을 주는 인자는 흙의 함수비이다. 그림 3-1-11 이 이를 나타내고 있다. 동일한 건조단위중량에서 함수비가 커질수록 열전도도가 증가하는 경향을 보인다. 낮은 함수비 구간에서 열전도도-함수비 분포는 다소 완만한 경향을 보이다가 일정 함수비 이상에서 급격히 증가를 나타낸다. 하지만 수분이 입자 사이의 공극을 완전히 채워지게 되는 단계에 이르면, 열전도도는 더 이상 증가하지 않는다(Salomone et al. 1984, Salomone and Kovacs 1984, Salomone and Marlowe 1989). 본 연구는 낮은 함수비 구간으로 제한하여 실험하였기 때문에 이러한 경향까지는 확인 할 수 없지만, 함수비가 일정치(critical moisture content) 이상으로 증가하게 되면 기울기가 점점 완만해질 것으로 사료된다.



(a) 열전도도-함수비 (b) 실험데이터(W3) 및 분포양상

그림 3-1-11 흙의 열전도도에 영향을 주는 인자

함수비가 열전도도에 미치는 영향을 파악하기 위해 별도의 추가적인 실험을 하였다. 석영질 모래와 실트를 이용해 세 가지 간극률에서 함수비를 변화시키며 실험을 수행하였고 그 결과를 다음 표 3-1-9 및 그림 3-1-12 에 나타내었다.

표 3-1-9 석영질 흙의 함수비 변화에 따른 열전도도의 변화

Soil Type	Water Content (%)	Thermal Conductivity (W/mK)	Soil Type	Water Content (%)	Thermal Conductivity (W/mK)
Silt	5.0	0.354		15.0	1.809
(n=64.11)	10.0	0.460		20.0	2.038
	15.0	0.598	Sand	2.5	1.139
	20.0	0.611	(n=41.93)	5.0	1.394
	25.0	0.928		10.0	1.628
Sand	2.5	0.742		15.0	2.083
(n=47.70)	5.0	0.990		20.0	2.340
	10.0	1.429			

간극률 64.11 인 석영질 흙의 경우에는 중량함수비 5.0%에서 25.0%로 증가함에 따라 열전도도는 0.354 W/mK 에서 0.928 W/mK 로 약 160% 정도 증가하였다. 간극률 47.70 인 석영질 흙의 경우에는 중량함수비가 2.5%에서 20.0%로 증가하면 열전도도는 0.742W/mK 에서 2.038W/mK 로 약 170% 증가하였으며, 간극률 41.93 인 석영질 흙에서는 중량함수비 2.5%에서 20.0%로 변화하면 열전도도는 1.139 W/mK 에서 2.340 W/mK 으로 약 110% 증가하는 것으로 나타났다. 세립분(실트)으로 구성된 시료의 경우에는 함수비가 증가함에 따라 열전도도가 증가하는 정도가 작은 것(Tarnawski, 2000)을 아래 그림 3-1-12 에서 확인할 수 있다.

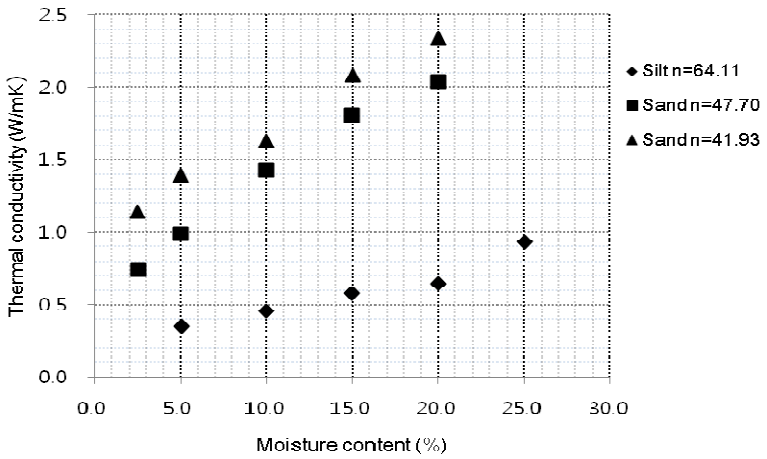
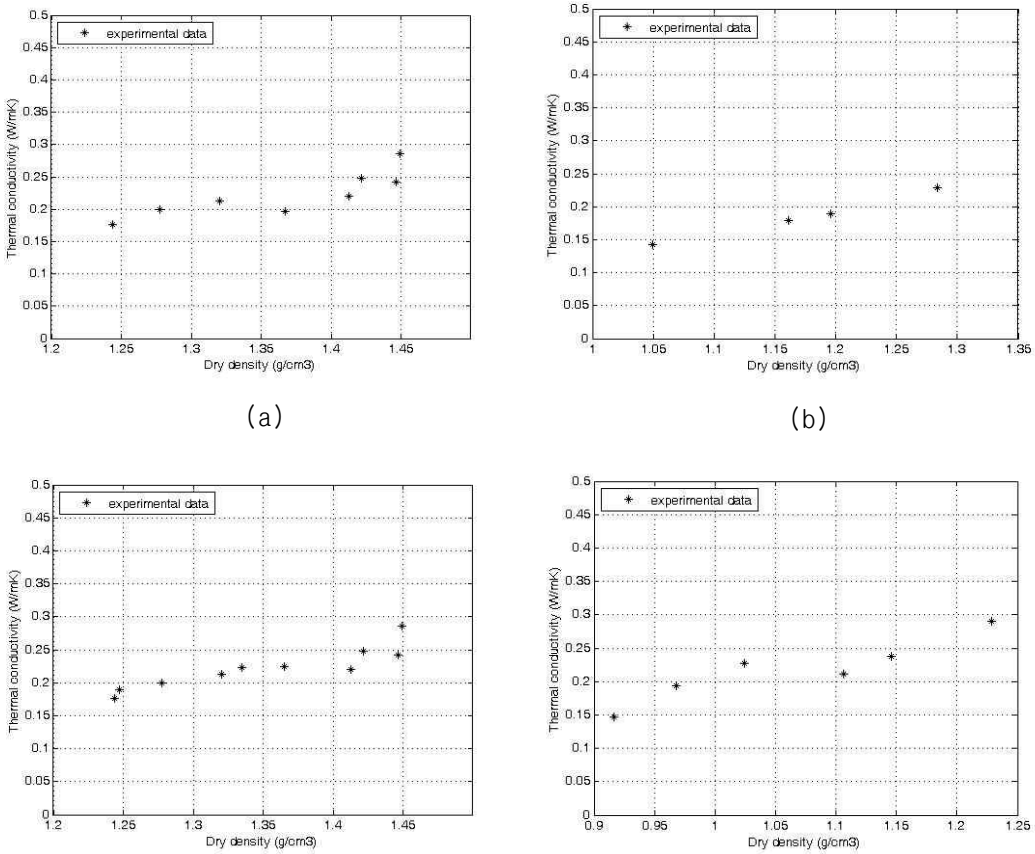


그림 3-1-12 석영질 흙의 함수비 변화에 따른 열전도도의 변화

(나) 건조단위중량이 열전도도에 미치는 영향

세종시 연기군(W1), 강원 평창군(W2), 전남 담양군(W3), 부산 금정구(W4)에서 채취한 화강 풍화토를 대상으로 건조단위중량의 변화에 따른 열전도도의 분포를 살펴보았다. 분포양상은 그림 3-1-13 에 나타내었다.

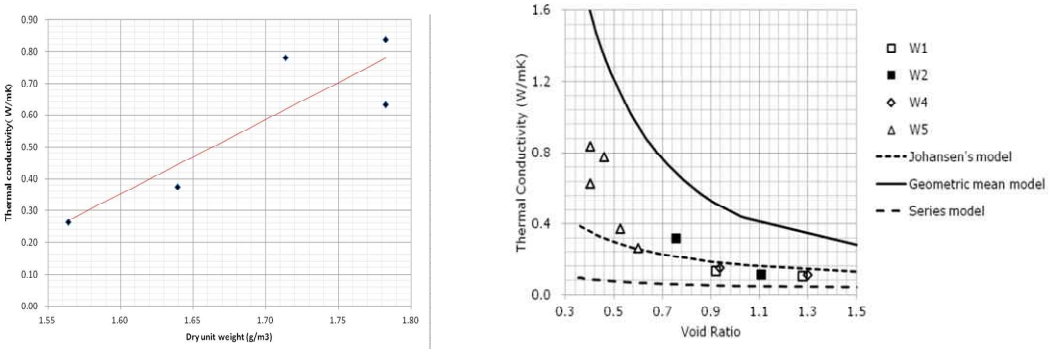


(a)W1 (b)W2 (c)W3 (d)W4

그림 3-1-13 건조단위중량 변화에 따른 열전도도

건조단위중량이 증가할수록 흙의 열전도도가 증가하고 있다. 열전도도 분포는 대체로 선형적인 경향을 보이긴 하지만 그림 3-1-11 의 함수비에 의한 변동폭에 비해서 그 증가 폭이 크지는 않다. 이는 흙의 열전도도가 건조단위중량에 의한 영향보다 함수비에 의한 영향을 더 크게 받음을 알 수 있다.

기존에 제시된 모델들에 의하면 건조단위 중량이 커질수록, 즉 흙이 낮은 간극비를 가질수록 열전도도가 더 크게 증가한다. 이를 확인하기 위해 경기도 수원시(W5)에서 채취한 화강 풍화토로 높은 건조단위중량에 대해서 탐침 실험을 수행하였고 실험결과를 기존모델과 비교해 보았다. 그림 3-1-14(a) 에서와 같이 매우 큰 건조단위중량의 흙(낮은 간극비)일수록 입자들간의 접촉면적이 커져서 열전도가 더 잘 일어난다. 또한 건조시료의 간극비 별 열전도도 측정결과, Johansen 의 추정모델이 합리적으로 예측하고 있음을 알 수 있다(그림 3-1-14(b)).



(a)낮은 간극비에서의 열전도도분포 (W5) (b) 화강 풍화토의 열전도도 분포(완전건조)

그림 3-1-14 간극비에 따른 열전도도 분포

또한 그림 3-1-15 에서와 같이 상대적으로 균등계수(C_u)가 높은 W4(부산 금정구)시료가 균등계수(C_u)가 낮은 W2(강원 평창군)시료보다 더 높은 열전도도 값을 가진다. 같은 건조 단위중량을 가지더라도 균등계수가 커지면 입자들 간의 접촉점 수가 많아져 열전도가 잘 일어날 수 있기 때문이다. 이러한 현상에 비추어볼 때, 균등계수도 열전도도에 다소 영향을 주고 있음을 확인할 수 있다.

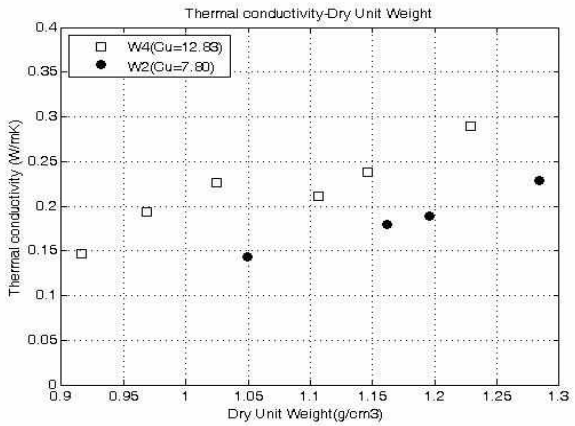
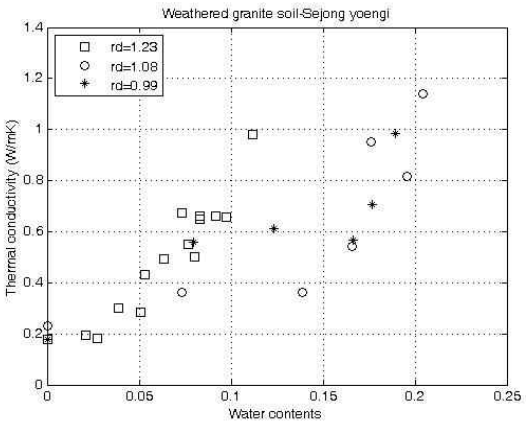
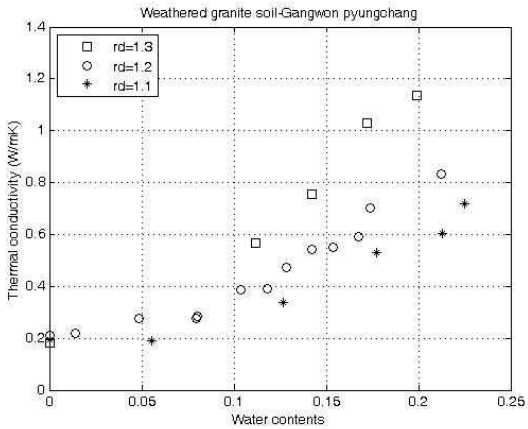


그림 3-1-15 균등계수가 열전도도에 미치는 영향

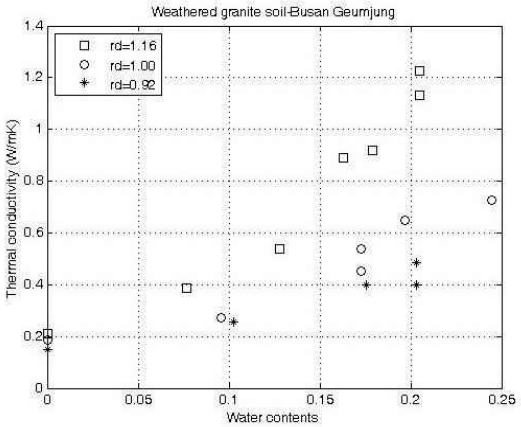
그림 3-1-16 은 권역 별 화강 풍화토의 함수비, 건조단위중량에 따른 열전도도 분포를 보이고 있다. 대부분의 시료에서 약 5~10% 정도의 함수비까지 매우 완만한 열전도도 증가를 보이다가 특정 변곡점을 지나 함수비 약 15% 이후부터 급격한 증가를 보였다. 이를 정량적으로 살펴보면 10% 포화도 시 높은 건조단위중량에서는 λ_{dry}의 2 배, 낮은 건조단위중량에서는 λ_{dry}의 1.2~1.5 배 정도의 열전도도가 측정되었다. 또한 20% 포화도시 높은 건조단위중량에서는 λ_{dry}의 약 6 배, 낮은 건조단위중량에서는 λ_{dry}의 약 3 배의 열전도가 측정되었다. 건조단위중량이 증가할수록 포화도 변화에 민감하게 반응하여 비교적 낮은 함수비에서부터 열전도도가 급격히 증가하는 경향을 보였다. 이는 건조단위중량이 증가함에 따라 동일한 포화도에서 시료 내 절대 수분량이 많아지기 때문으로 판단된다.



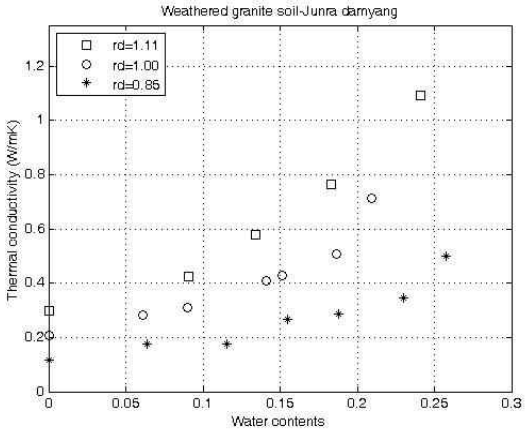
(a) W1



(b) W2



(c) W3



(d) W4

그림 3-1-16 건조단위중량 별 함수비에 따른 열전도도

(다) 모관 흡수력이 열전도도에 미치는 영향

흙의 함수 정도에 따른 열전도도를 정밀히 측정하기 위해 함수특성 측정 장비와 열전도도를 측정하는 센서를 결합하여 실험하였다. 0.5~200kPa 의 범위의 압력으로 건조과정을 통해 얻어진 주문진 표준사(S1)의 함수특성곡선과 각 압력단계 완료시의 열전도도의 결과는 다음 표 3-1-10 및 그림 3-1-17, 3-1-18, 3-1-19 에 나타내었다. 얻어진 함수특성곡선은 가장 널리 사용되고 있는 함수특성곡선식인 Fredlund and Xing (1994)의 모델과 비교하였으며 잘 일치함을 보여준다. Fredlund and Xing 의 모델은 다음 식 (1.1.32)와 같다.

$$\theta_w = \frac{\theta_s}{[\ln[e+(\frac{\psi}{a})^n]]^m} \qquad (1.1.32)$$

여기서 맞춤 변수 a 는 공기함입치(air entry value)와 관련된 값이고 n 은 곡선의 기울기, m 은 높은 모관흡수력 범위에서 함수특성곡선의 변화와 관련이 있다. 본 S1 의 경우에는 R^2=0.9846 의 값을 주는 맞춤 변수로 각각 a=1.146, n=2.885, m=0.647 이 사용되었고 e=자연수(2.71828…) 이다.

표 3-1-10 S1 의 모관흡수력에 따른 열전도도

Matric Suction (kPa)	Degree of saturation (S)	Volumetric water content (Θ)	Water content (%)	Thermal Conductivity (W/mK)
0.5	0.456	0.191	12.46	0.809
1	0.407	0.171	11.13	0.780
2	0.269	0.113	7.34	0.751
5	0.204	0.086	5.58	0.748
10	0.129	0.054	3.53	0.673
20	0.130	0.054	3.55	0.550
50	0.107	0.045	2.93	0.375
100	0.085	0.036	2.33	0.320
200	0.048	0.020	0.33	0.290

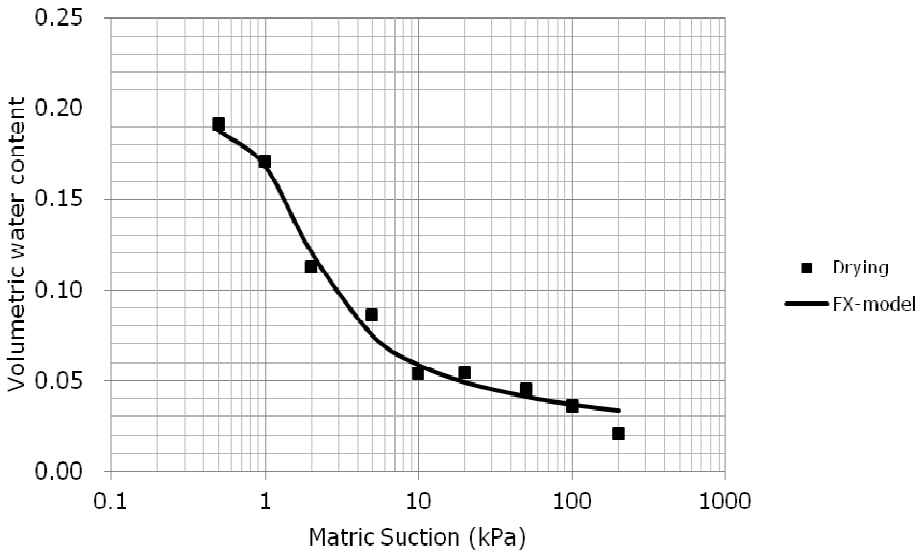


그림 3-1-17 S1 의 함수특성곡선

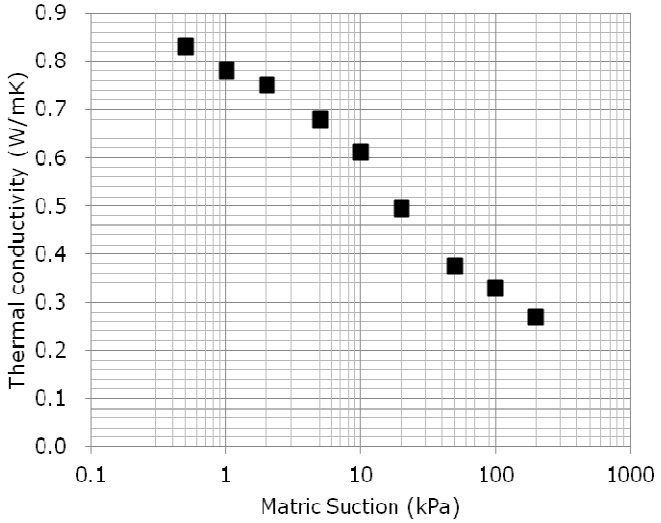


그림 3-1-18 S1 의 모관 흡수력에 따른 열전도도

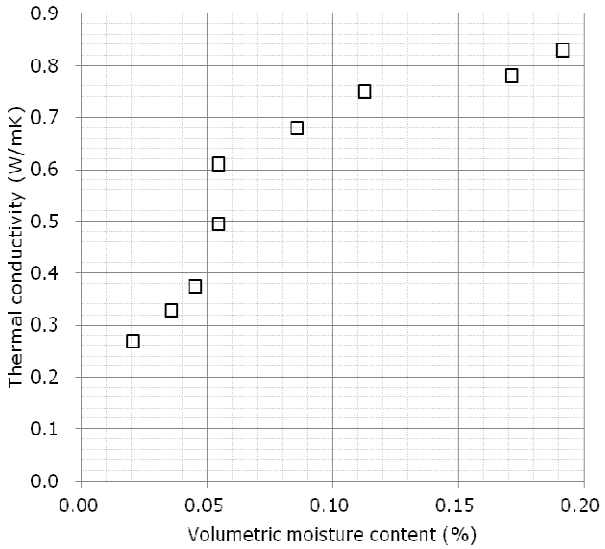


그림 3-1-19 S1 의 체적 함수비에 따른 열전도도

그림 3-1-19 에서 보면 체적 함수비 0.045 까지의 구간에서는 함수비가 증가함에 따라 열전도도가 비교적 완만하게 증가하다 이후부터 0.054 까지 구간에서는 급격히 증가하였다. 또한 이 함수비 이후로는 다시 열전도도가 증가하는 정도가 감소하는 것으로 관찰되었다. S1(주문진사)와 같은 조립토는 함수비의 변화에 따라 포물선(parabolic)형태의 열전도도 분포를 보임을 확인할 수 있다.

압력을 400~0 kPa 로 변화시키며 측정한 강원도 평창군 화강풍화토(W2)의 함수특성곡선과 각 압력단계 완료시의 열전도도의 결과는 다음 표 3-1-11 및 그림 3-1-20, 3-1-21, 3-1-22 에 나타내었다. 얻어진 함수특성곡선은 Fredlund and Xing(1994)의 모델과 비교하였으며 잘 일치함을 보여준다 맞춤 변수는 각각 a= 4.365, n=1.6667, m=1.507 이 사용되었다.

표 3-1-11 과 그림 3-1-22 에 나타낸 바와 같이 열전도도는 체적 함수비 0 에서 0.206 으로 증가함에 따라 0.495 W/mK 부터 1.182 W/mK 까지 약 140% 증가했다. 체적 함수비 0.028 전후에서 함수비 증가에 따른 열전도도 증가 정도가 달라짐을 확인할 수 있다.

표 3-1-11 W2의 모관흡수력에 따른 열전도도

Matric suction (kPa)	Degree of saturation (S)	Volumetric water content (Θ)	Water content (%)	Thermal Conductivity (W/mK)
0	0.441	0.191	12.76	0.643
400	0.000	0.000	0.00	0.495
200	0.002	0.001	0.07	0.520
100	0.034	0.015	0.98	0.608
50	0.063	0.028	1.83	0.723
20	0.129	0.056	3.73	0.815
10	0.162	0.070	4.68	0.864
5	0.275	0.119	7.94	1.012
2	0.392	0.170	11.34	1.087
1	0.474	0.206	13.71	1.182
0.1	0.474	0.206	13.71	1.182

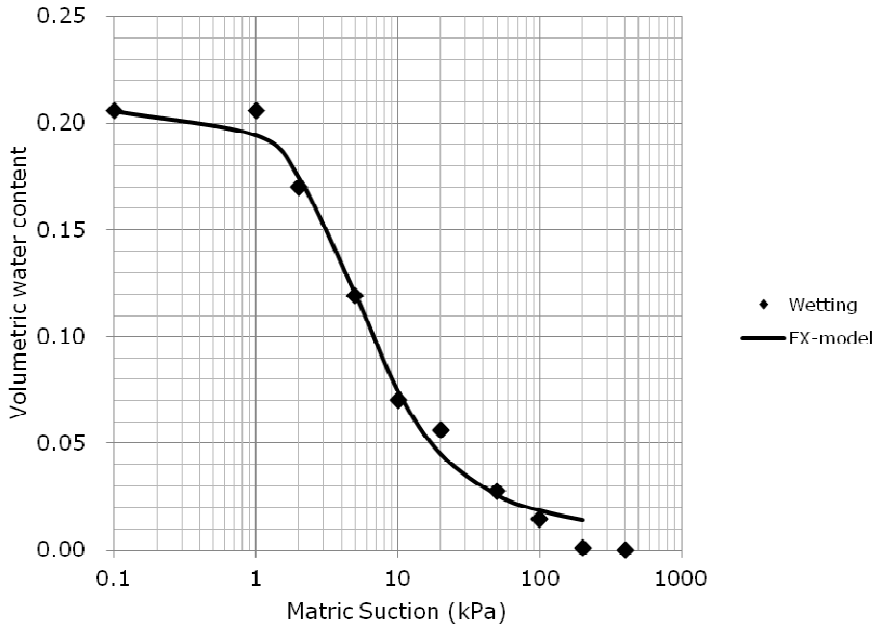


그림 3-1-20 W의 함수특성곡선

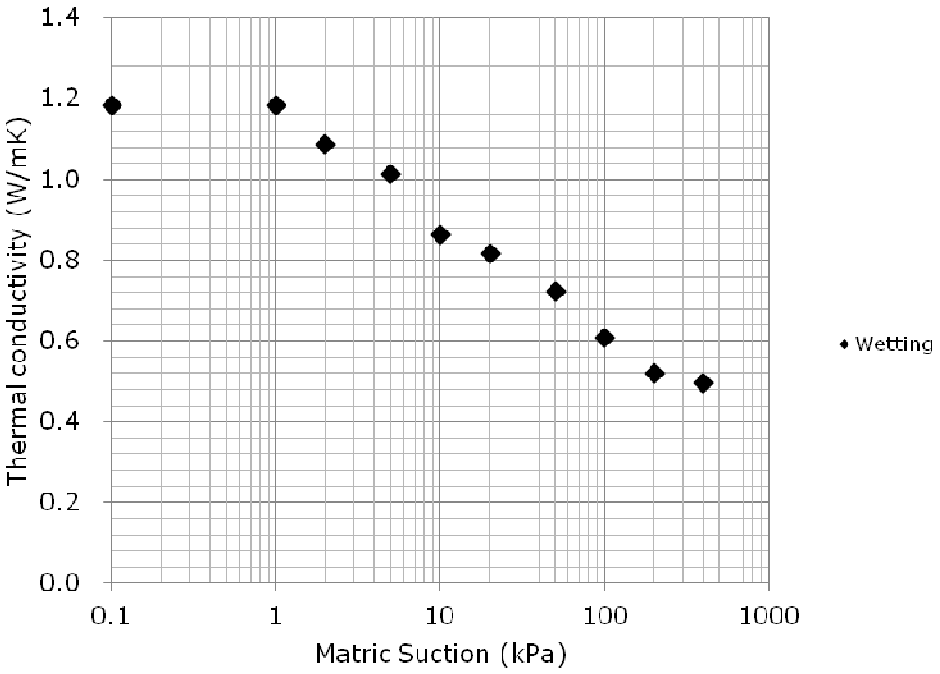


그림 3-1-21 W2의 모관 흡수력에 따른 열전도도

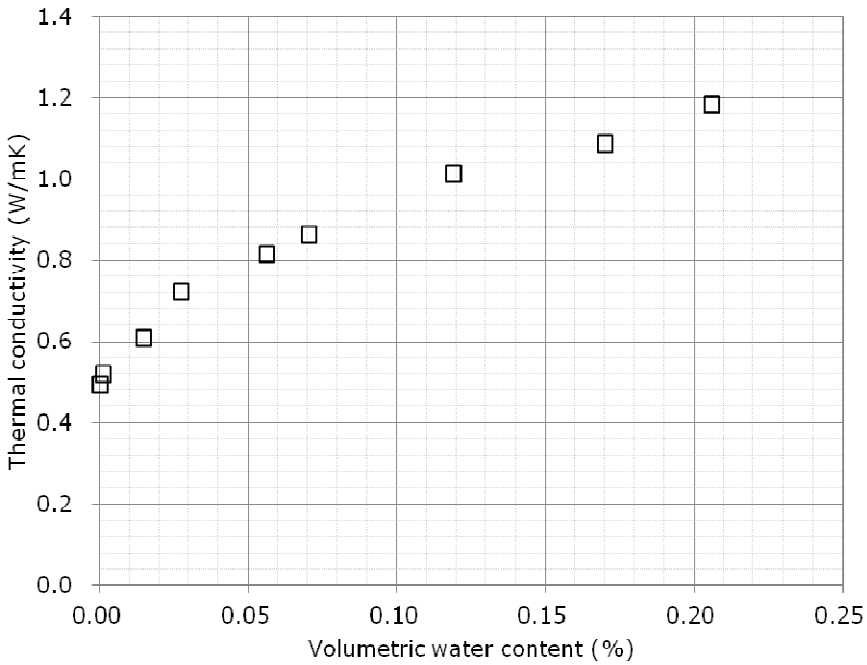


그림 3-1-22 W2의 체적 함수비에 따른 열전도도

일반적으로 화강 풍화토의 열전도도 분포는 포화도 변화에 따라 초기에 완만한 증가 후 일정 변곡점을 지나 급격한 증가를 보이지만, 그림 3-1-22 의 경우 실험을 위해 아주 조밀하게 다짐하여 시료를 조성했기 때문에 건조 상태에서도 높은 열전도도를 보이며, 초기에서부터 큰 증가 폭을 보이고 있다.

(라) 기존 모델과의 비교

① 석영질 시료

건조상태의 석영질 시료의 열전도도는 Johansen 의 반경험적 모델의 추정값과 거의 일치하는 것을 보이며 건조할 경우에 더욱 잘 일치하는 것을 아래 그림 3-1-23 로부터 확인할 수 있다. Geometric mean 모델로 추정한 값은 실험값과 큰 차이를 보였으며 간극률이 작아질수록 그 차이는 더 커졌다. Series 모델은 열전도도를 매우 과소평가하고 있으며 이 모델 역시 간극률이 작아질수록 오차가 더욱 커지는 경향을 나타내었다.

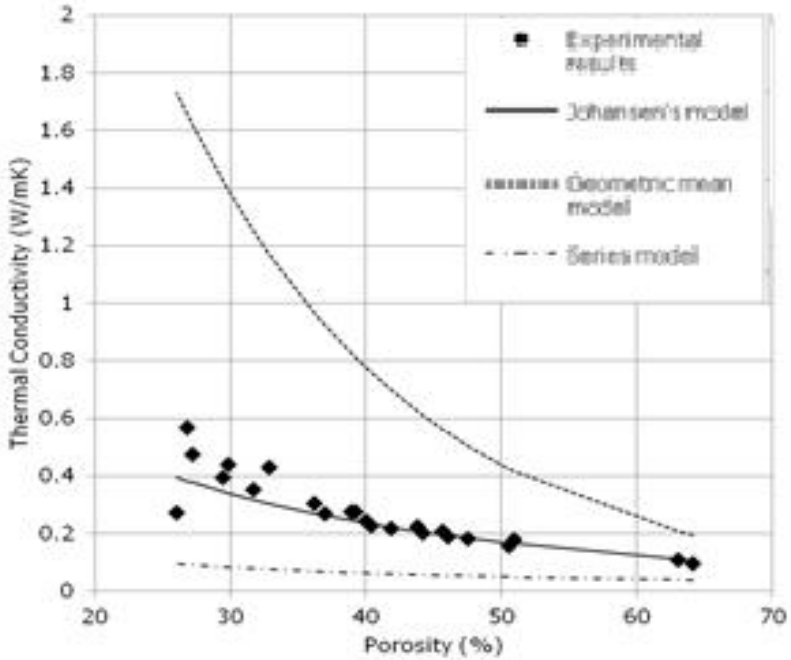


그림 3-1-23 건조한 석영질 시료의 열전도도의 기존 추정 모델과의 비교

함수비를 변화시키며 측정한 열 전도도 값 역시 Johansen 의 모델과 가장 잘 일치하였다 (그림 3-1-24). Geometric mean 모델과 Series 모델은 열 전도도 값을 매우 과소평가하고 있으며 경향성에서도 크게 벗어났다. 본 시료들은 점토광물을 포함하지 않고 석영으로만 조성되어 실험이 수행된 함수비 범위에서는 적용성에 무리가 없는 것으로 판단된다.

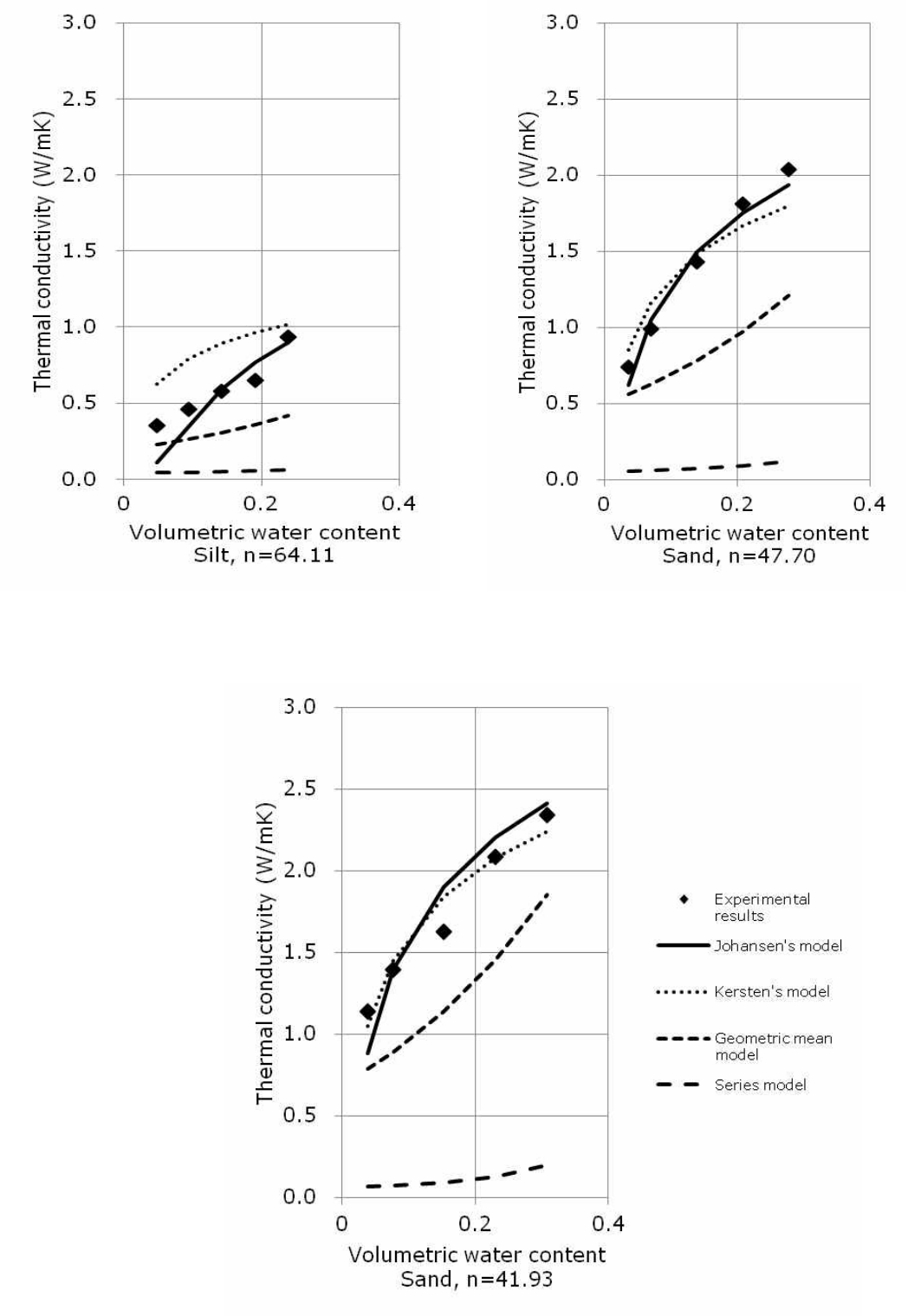


그림 3-1-24 석영질 실트 및 모래 열전도도의 기존 추정 모델과의 비교

② 국내 화강 풍화토

대부분의 국내 화강풍화토에서는 Johansen 의 모델과 Kersten 의 모델은 열전도도를 과대예측하고 있으며 Series 모델은 과소예측하고 있다(그림 3-1-25~3-1-28).

Johansen 모델의 경우에는 건조상태에서의 열전도도는 잘 예측하였으나 함수비가 높아짐에 따라 열전도도를 과대평가하게 되고 특히 점토광물을 많이 포함하는 W3 및 W1 시료에서 크게 과대예측 하였다. W2 시료는 대상 시료 중 점토광물이 가장 적어 모델과의 오차가 가장 적었던 것으로 판단된다.

실험이 수행된 함수비 내에서는 Geometric mean 모델이 비교적 가장 잘 예측하는 것으로 계산되었지만 체적 함수비 약 0.1 정도를 전후로 하여 0.1 이하에서는 과대평가, 0.1 이상에서는 과소평가하는 것으로 나타났다.

Geometric mean 모델의 경우 지수형태의 식이기 때문에 다른 반 경험적 모델과는 달리, 아주 낮은 함수비에서 함수비가 증가함에 따라 열전도도가 증가하는 정도가 작고 함수비가 더욱 증가하면 열전도도가 급격히 증가하는 양상 자체는 어느 정도 반영할 수 있다. 하지만 어느 정도 함수비에 이르면 열전도도가 거의 증가하지 않게 됨에 반해 (Tarnawski, 2000) 지수형태로 이루어진 Geometric mean 모델의 특성상 열전도도가 포화시까지 계속해서 증가하게 될 것이다.

또한 Johansen 의 모델과 Kersten 의 모델은 수많은 자갈, 모래, 실트, 점토 및 유기질토 등 명확히 구분된 종류의 흙을 대상으로 수행된 실험적 데이터를 기반으로 모델을 제시하여 입자의 크기가 균일한 주문진 표준사나 Sil co sil 106 의 경우, 혹은 다른 종류의 흙과 섞여있지 않은 경우에 매우 적절한 열전도도 추정값을 제시할 수 있다. 하지만 다양한 입도의 입자로 구성되어 있고 풍화로 인해 점토광물을 많이 포함하는 화강 풍화토의 경우에는 위 모델들의 적용성이 부적절한 것으로 판단된다.

따라서 다양한 입도의 입자로 구성되어 있고 점토광물을 포함하는 국내 화강풍화토의 열전도도 경향성을 정확하게 예측하기 위한 새로운 모델이 제시되어야 한다.

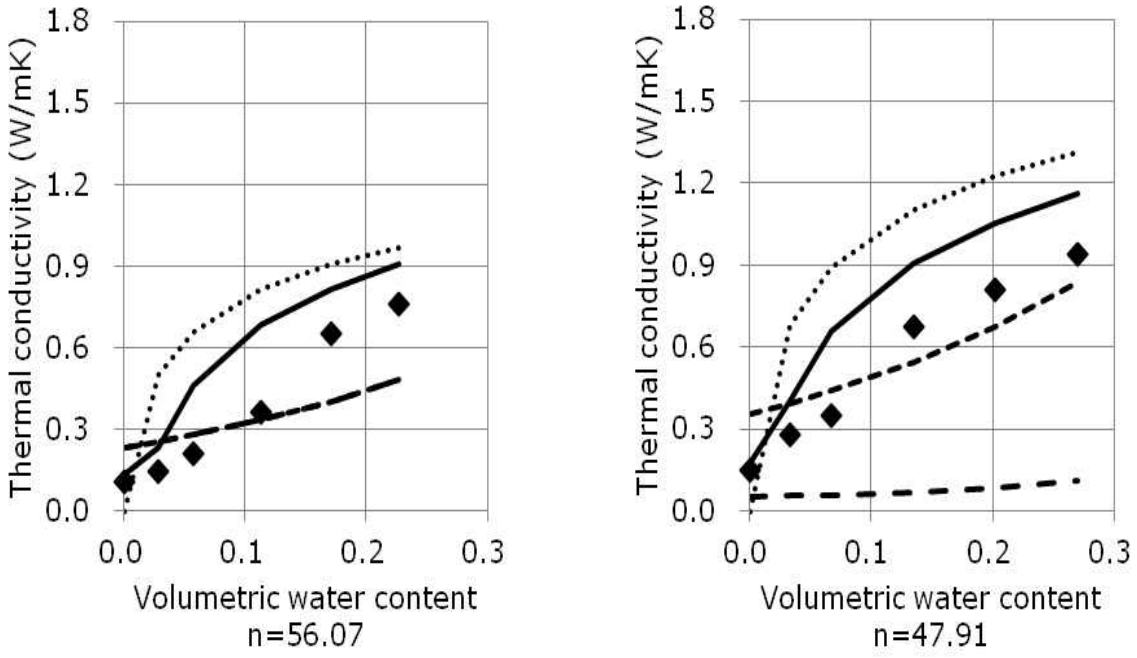


그림 3-1-25 세종시 연기군 화강풍화토(W1) 열전도도의 기존 추정 모델과의 비교

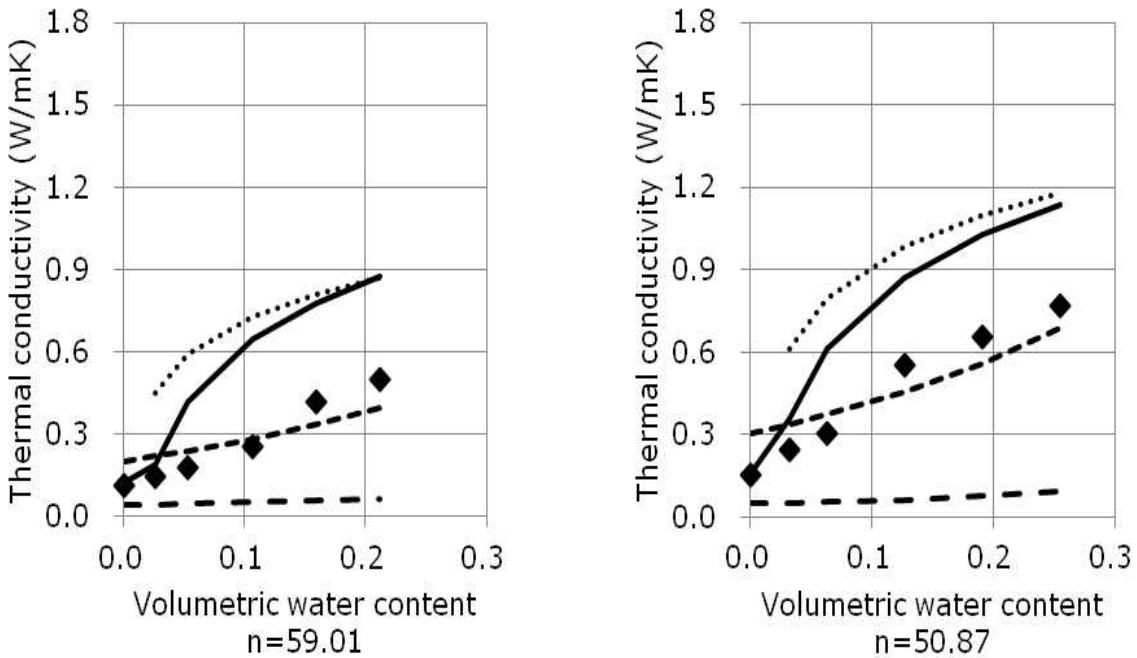


그림 3-1-26 강원도 평창군 화강풍화토(W2) 열전도도의 기존 추정 모델과의 비교

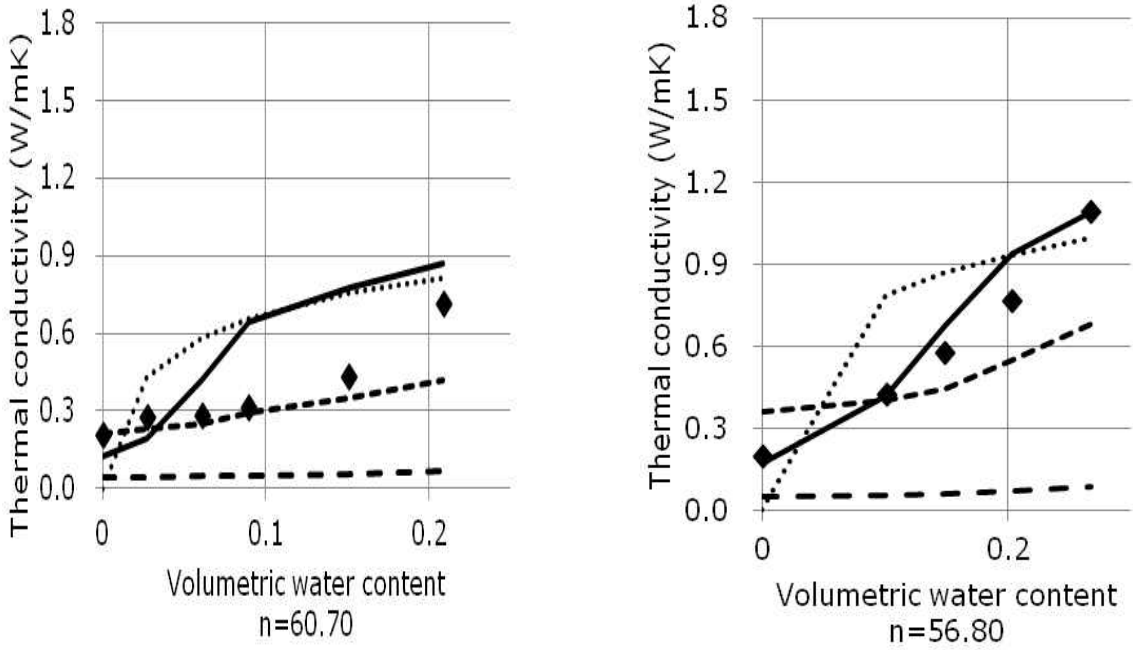


그림 3-1-27 전라남도 담양군 화강풍화토(W3) 열전도도의 기존 추정 모델과의 비교

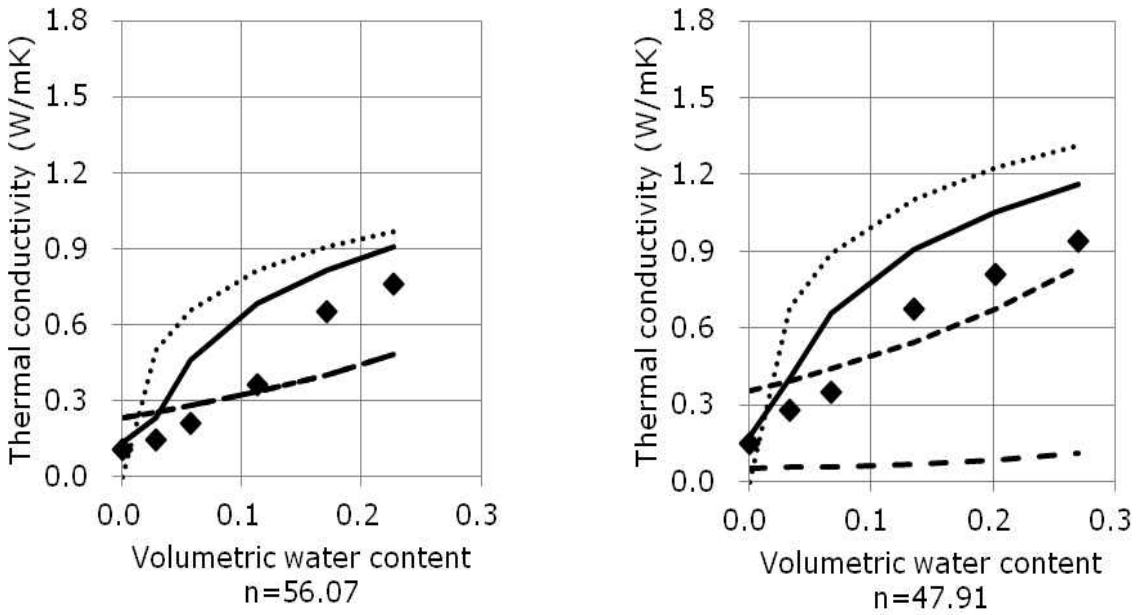


그림 3-1-28 부산시 금정구 화강풍화토(W4) 열전도도의 기존 추정 모델과의 비교

(마) 국내 화강 풍화토에 대한 열전도도 모델 제시

① 화강풍화토 열전도도 모델 제시

본 연구에서는 다양한 크기의 입자와 점토광물을 포함하는 국내 화강 풍화토의 특성을 잘 반영할 수 있는 열전도도 추정모델을 다음과 같이 제시하였다.

$$\lambda = 0.13 \cdot {\gamma_d}^{2.4} \cdot \exp[(0.0305 + \frac{0.0013}{\gamma_d - 0.795}) \cdot S_r] \qquad \text{여기서, } 0 \le S_r \le 60 \qquad (1.1.33)$$

수행된 실험결과를 토대로 분포의 경향성을 분석하였고, γ_d와 S_r의 함수로 표현이 되는 새로운 열전도도 추정 모델식을 구상하였다. 식 (1.1.33)안에는 λ_{dry}를 나타내는 식이 포함되어 있으며, 건조상태일 경우 열전도도는 γ_d에 의해 지배적인 영향을 받는다고 가정하였다.

본 연구에서 제안한 새로운 모델식은 critical moisture content 에 도달하기 전까지의 경향을 반영하는 식이므로 아주 높은 포화도 영역에서는 열전도도를 과대예측(overestimate)할 수 있다. 이러한 이유로 이 모델의 적용범위를 포화도 0~60%로 제한하였다.

② 새로운 모델 검증

앞서 수행한 열전도도 탐침 실험 결과를 이용하여 제안한 모델의 적합성을 검증하였다. 대상 시료는 국내 화강풍화토 W1~W4 시료를 사용하였다. 그림 3-1-29~3-1-34 과 같이 새로운 모델의 예측 값과 실험데이터를 비교하여 나타내었다.

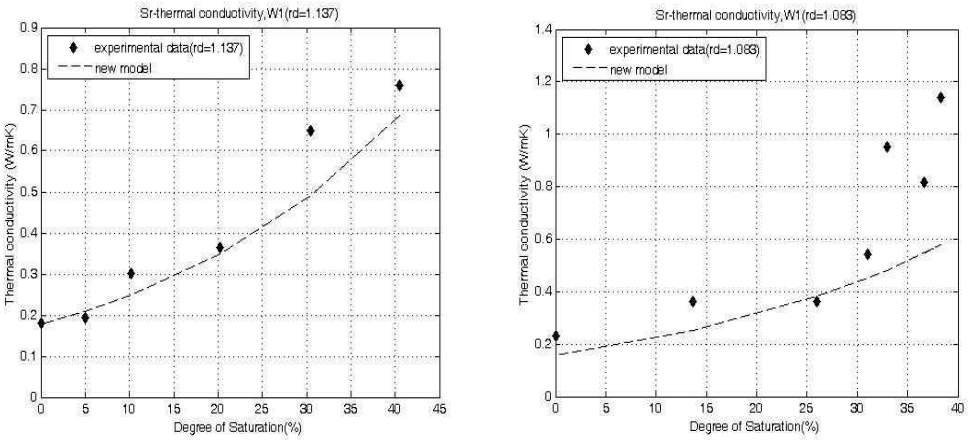


그림 3-1-29 W1 시료에 대한 실험데이터와 새로운 모델의 산정 값

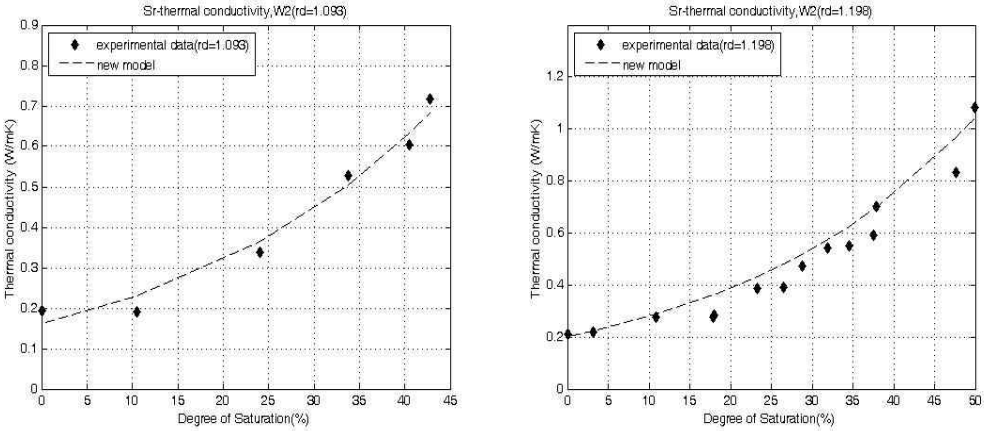


그림 3-1-30 W2 시료에 대한 실험데이터와 새로운 모델의 산정 값

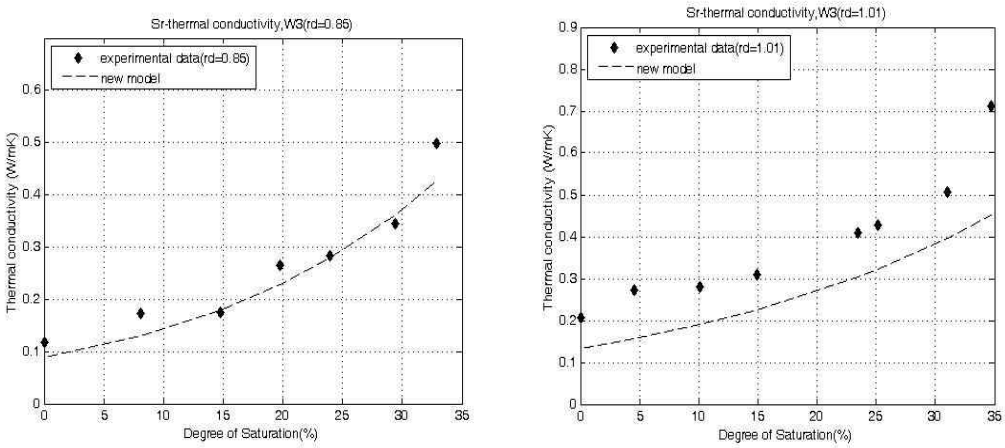


그림 3-1-31 W3 시료에 대한 실험데이터와 새로운 모델의 산정 값

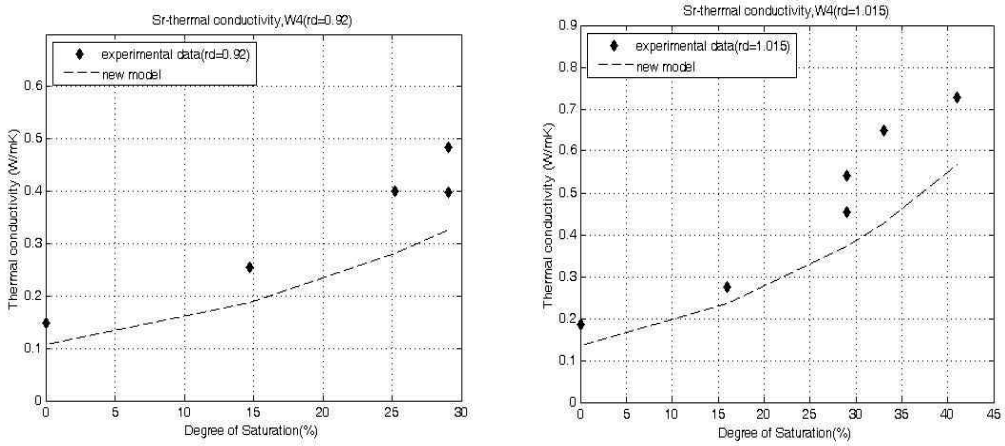


그림 3-1-32 W4 시료에 대한 실험데이터와 새로운 모델의 산정 값

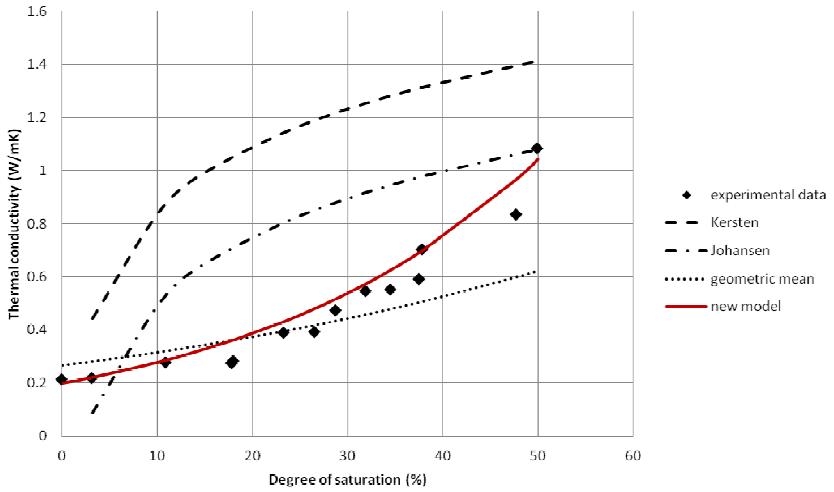
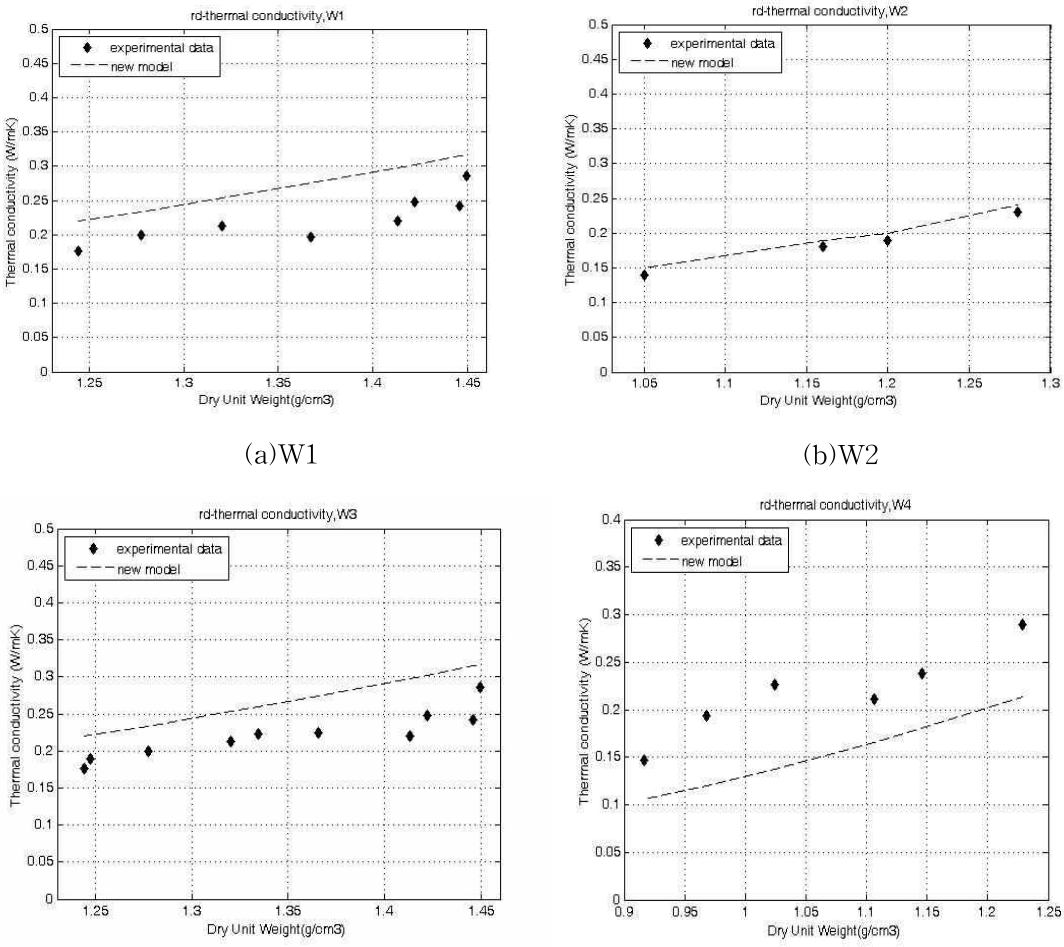


그림 3-1-33 기존 모델과 새로운 모델 비교 (대상시료 W2, n=0.534)



(a)W1 (b)W2

(c)W3 (d)W4

그림 3-1-34 건조상태에서의 건조단위중량 별 실험 데이터와 새로운 모델 산정 값

그림 3-1-29~3-1-34 에서와 같이 새롭게 제안된 열전도도 추정 모델식은 국내 화강풍화토의 열전도도 값의 분포를 합리적으로 예측하고 있다. 양측가설검정(Paired t-test) 결과, p-value 가 유의수준 0.05 보다 크기 때문에 $\mu_0=0$ 가 95% 신뢰구간 안에 존재한다. 따라서 본 연구에서 개발된 추정모델이 확률론적으로 높은 정확률을 나타낸다고 볼 수 있다. W2 강원도 평창 시료에 대해서는 정확한 값을 예측하는 반면, 나머지 시료에 대해서는 대체적으로 과소평가(underestimate)하는 경향이 있다. 하지만 그림 3-1-33 에서 확인할 수 있듯이 기존의 제안된 모델들과 비교해보면, 국내 저심도 지반의 특성을 반영하는 새로운 모델이 더 좋은 예측결과를 준다는 것을 확인 할 수 있다.

라. 결론

경제적인 지반의 열 해석이나 설계를 위하여 신뢰도 높은 국내 지반의 열전도도 평가 및 예측 모델의 개발이 필요하다. 해외 지반을 대상으로 한 열전도도 산정 연구는 이미 많이 진행되어 왔다. 하지만 이들 연구는 자갈, 모래, 실트, 점토, 피트 등 명확히 구분된 흙의 종류를 대상으로 수행되었거나 각 지역의 고유 특성을 지니는 지반을 대상으로 수행되어 이를 국내의 화강 풍화토에 일괄적으로 적용하기는 어렵다.

따라서 본 연구에서는 보다 신뢰도 높게 국내 지반의 열전도도를 평가하기 위하여 석영질 흙을 비롯하여 국내 네 개 지역의 화강 풍화토를 선정하여 여러 조건을 변화시키며 열전도도를 측정하는 실내 시험을 수행하였고 이를 바탕으로 새로운 열전도도 모델을 제안하였다.

본 연구에서 얻어진 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

① 건조상태의 석영질 모래와 실트의 경우 간극률을 변화시키며 열전도도를 측정한 결과 간극률의 감소는 열전도도의 증가를 가져오며 간극률 약 40% 이하의 범위에서는 증가하는 정도가 급격히 증가한다.

② 석영질 모래와 실트를 대상으로 함수비를 변화시키며 열전도도를 측정한 결과 함수비의 증가는 열전도도의 증가를 가져오며 그 정도는 간극률의 크기가 작을 때 더 크다.

③ 국내 화강풍화토의 경우 건조상태의 열전도도는 0.15~0.3 W/mK 범위에 분포하였다. 구성광물의 영향은 예상과 달리 크지 않았으며 구성광물과 건조단위중량과 균등계수의 영향이 복합적으로 작용한다.

④ 국내 화강 풍화토의 경우, 함수비에 따른 열전도도 증가는 건조단위중량과 점토광물의 함량에 따라 복합적으로 영향을 받으며 이루어진다. 초기 아주 낮은 단계의 함수비 영역에서는 열전도도의 증가 정도가 낮으며 이 영역 구간의 길이는 점토광물의 양으로 결정된다. 일정 함수비 이상에서 열전도도가 다소 크게 증가하기 시작하며 이 구간에서도 점토광물의 양이 많으면 증가 정도가 낮다. 함수비가 어느 정도 증가하고 나면 열전도도의 증가 정도가 둔화되기 시작한다. 일정 이상의 함수비(critical moisture content)이상에서는 열전도도의 변화가 더딜 것으로 예상된다. 또한 국내 화강풍화토의 포화시의 열전도도는 0.746 W/mK~2.206 W/mK 정도의 범위에 분포할 것으로 예상된다.

2. 지반 열 물성 추정 프로그램 개발

가. 개요

연중 일정하게 유지되는 지중의 온도를 에너지원으로 사용하는 지열냉난방 시스템은 그 활용과 빈도가 점점 늘어나고 있으며, 신축 구조물이나 초고층 빌딩 등에 활발하게 적용되고 있다. 이는 지열에너지가 친환경적 에너지자원으로서 각광받고 있으며, 다른 신재생에너지에 비해 높은 에너지 효율을 자랑하기 때문이다. 국내의 경우, 지중구조가 열전도도가 높은(약 2 W/mK) 화강암 계통의 암반층으로 이루어져있어서 지중과의 열전달이 용이하고, 암반층의 지지역할로 인해 지중함몰 우려도 적기 때문에 지열냉난방시스템의 적용성이 아주 좋다고 할 수 있다. 지중 열을 이용하는 냉난방시스템은 소위 지중 열 교환시스템(GSHP)이라 일컬어지는데, 그중에서 수직 밀폐형 GSHP 시스템이 가장 널리 이용된다. 수직 밀폐형 GSHP 시스템은 일반적으로 지하 150m 이상 천공하여 열 교환기가 설치되는데 시공 시에 상당한 천공비용이 소요된다. 수직 밀폐형 GSHP 시스템의 초기 시공비 문제를 해결하기 위해 최근에는 기존의 건물 말뚝 내부에 열 교환기를 설치한 형태인 에너지 파일이 널리 이용된다. 에너지 파일은 기초지반 내에 존재하는 지열에너지를 건물의 기초 말뚝에 축적하여 구조적인 지지체와 지중 열교환 파이프로서의 역할을 동시에 수행한다. 에너지파일은 별도의 천공이 필요 없고 기존 말뚝 안에 설치가 되기 때문에 그 길이가 보통 20m이하로 제한된다. 따라서 수직 밀폐형에 비해서 상대적으로 저심도 지반과 열 교환이 이루어지며, 저심도 지반의 열 물성을 고려한 지중열 교환기의 설계가 이루어져야한다.

저심도 에너지 파일 설계에 있어서 가장 중요한 인자는 열 교환기가 설치되는 지반의 열전도도 값인데 그 이유는 흙의 정확한 열전도도 추정이 GSHP 시스템의 효율적인 설계를 가능하게 하기 때문이다(Hart and Whiddon, 1984). 하지만 이러한 국내 저심도 지반의 특성을 반영하는 국내지반의 열 물성 데이터가 충분하지 않은 실정이고, 지반의 열전도도를 산정하는 기존의 모델들로 저심도 지반의 열전도도 값을 산정하는데 많은 어려움이 있다.
따라서 본 연구는 국내에 존재하는 저심도 지반의 열전도도 데이터베이스를 구축하여

다양한 조건에 따른 지반의 열전도도를 정확하게 산출할 수 있는 추정프로그램을 제작할 필요성을 인식하였고, 특히 국내 화강풍화토 지반의 열 특성에 초점을 맞추어 GSHP 시스템 설계에 필요한 지반의 열 물성 자료들을 확보하고자 하였다.

나. 사용자 친화적 인터페이스를 갖춘 열전도도 산출 프로그램 개발

(1) 프로그램의 특징

본 연구는 실내 열전도도 측정 실험을 통해 구축된 데이터베이스를 기반으로 간극률(porosity)과 함수비(water content)에 대한 열전도도 추정모델을 제안하였고 이를 사용자 친화적 인터페이스를 갖춘 프로그램화 하였다. 기존의 열전도도 추정 모델들은 그 적용성이 특정 시료에만 국한되는 한계가 있지만, 본 연구에서 개발한 프로그램은 다양한 흙에 대해서, 상세한 지반조건을 반영하여 열전도도 값을 산출할 수 있다. 그림 3-1-35는 프로그램의 알고리즘을 보여주고 있으며, 화강풍화토에 대한 열전도도는 구축된 데이터베이스를 근간으로 만들어진 3차원 곡면식을 통해서 식 1.2.1과 같이 산정이 된다(그림 3-1-36 참조).

$$f(\omega,n) = 0.66 + 20.57^{*}\omega - 0.94^{*}n - 3.51^{*}\omega^{2} - 28.6^{*}\omega^{*}n \qquad (1.2.1)$$

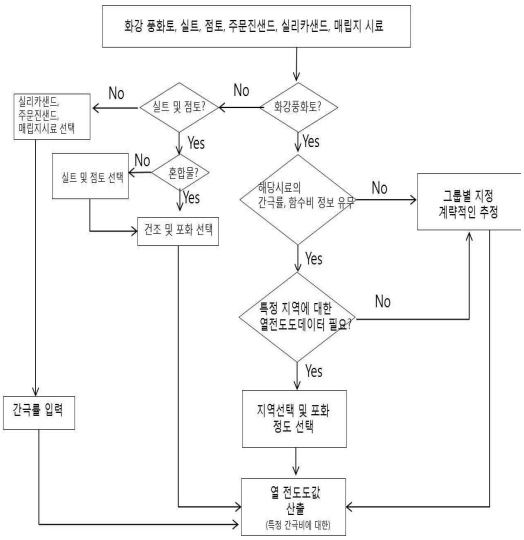


그림 3-1-35 프로그램의 FLOW CHART

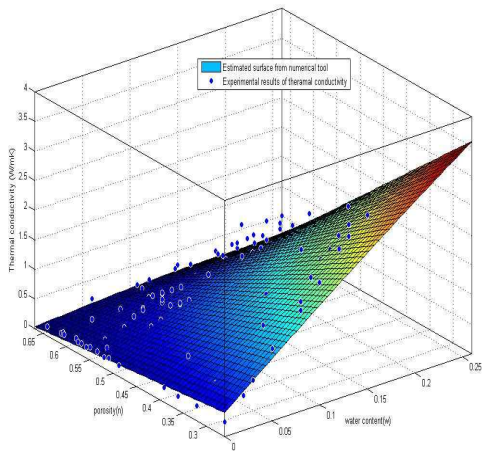


그림 3-1-36 3차원 열전도도 곡면식

(2) 프로그램의 기능

(가) 화강풍화토

시료의 간극비와 함수비 값을 정확히 알고 있을 경우, Category의 Value 지정을 통해 입력 값을 받아 간편하게 시료의 열전도도 값을 예측할 수 있다. 입력 시 포화도(degree of saturation), 간극비(void ratio), 건조단위중량(dry unit weight)도 자동 계산된다. 만약 사용자가 정확한 간극비와 함수비를 모를 경우, Category에서 Group 지정을 하여 해당시료의 계략적인 열전도도의 범위를 확인할 수 있다.

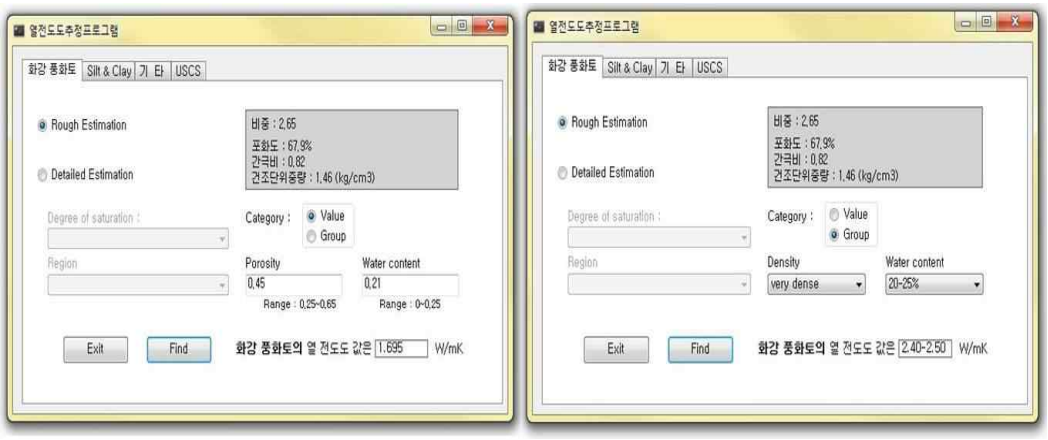


그림 3-1-37 화강풍화토 Rough Estimation 입력창

또한 Detailed Estimation을 이용하면 화강 풍화토의 지역별 열전도도 값을 산출할 수 있다. 흙의 포화정도에 따라서 크게 습윤토와 건조토로 분류되며 각 지열별로 특정 간극률에 대한 열전도도 값을 구할 수 있다. 입력 시 포화도(degree of saturation), 간극비(void ratio), 건조단위중량(dry unit weight)도 자동 계산된다.



그림 3-1-38 화강풍화토 Detailed Estimation 입력창

(나) 실트 및 점토

실트 및 점토는 크게 건조토와 포화토(fully saturated soil)에 대해서 열전도도를 산출할 수 있으며, 다양한 구성비의 실트 및 점토 혼합물에 대한 열전도도 산출이 가능하다(그림 3-1-39 참조).

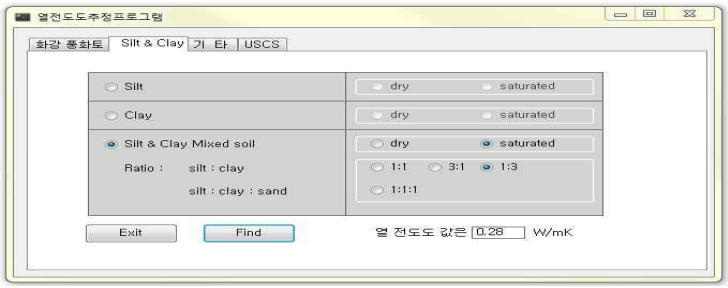


그림 3-1-39 실트 및 점토의 입력창

(다) 기타 시료

기타 시료의 열전도도 산정은 건조토로 국한되며, 특정 간극률 범위 내에서 산출이 가능하다. 실리카 샌드는 0.40~0.50 의 간극률 범위 내의 열전도도 값 산출이 가능하며 주문진 샌드는 0.38~0.46, 매립지 시료는 0.30~0.44 의 간극률 범위 내에서 열전도도 산출이 가능하다.

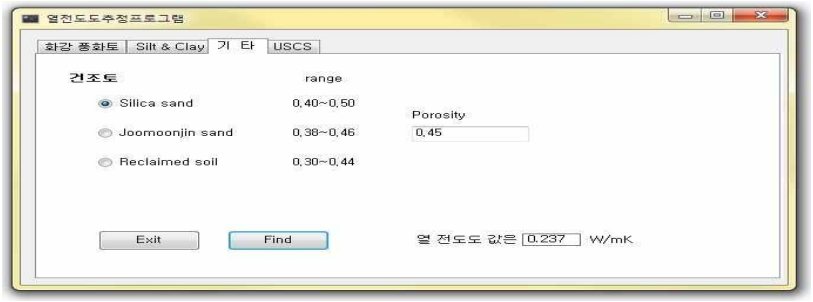


그림 3-1-40 기타 시료의 입력창

마. 열전도도 추정을 위한 인공신경망 모델

인공신경망 이론은 인간의 뇌 구조에서 학습되고 축적되는 기존 지식의 운용체계를 모사한 컴퓨터 모델로서, 압밀침하량 예측, 비배수 전단강도 예측 등 다양하게 지반공학 분야에서 인공신경망 이론의 응용이 증가하고 있는 추세이다. 본 연구에서는 국내 화강풍화토 지반에 대한 열전도도 자료를 바탕으로 인공신경망 모델을 개발하여 지반의 열 물성 추정에 개발된 인공신경망 모델을 적용해보고자 하였다.

인공신경망 모델은 그림 3-1-41 과 같이 입력층(I)-은닉층(H)-출력층(O)의 다층 신경망 형태로 구성되며 각 층에는 인간의 신경조직의 기본단위를 모사한 뉴우런(neuron)이 존재하고 각 층의 뉴우런들은 다른 층의 모든 뉴우런들과 특정 연결강도(weight)로 연결되어있다. 각 층의 각 뉴우런에 전달된 입력값 들은 연결강도와 곱해지며 이들의 합은 전달함수(transfer function)에 의해 처리되고 출력되어 다시 다음 층에 존재하는 뉴우런들의 입력값으로 전달된다. Hornik 등(1989)은 단일 은닉층만으로도 적정한 수의 뉴우런이 존재한다면 함수근사화(function approximation)와 패턴인식(pattern classification)이 충분한

정도(accuracy)로 가능함을 증명한 바 있다. 인공신경망 모델의 구축은 크게 두 단계로 나눌 수 있다. 먼저 입력과 결과값을 이용하여 각 층에 존재하는 뉴우런(neuron)간의 연결강도(weight)를 조정하는 훈련단계(training phase)로, 이 과정을 통하여 신경망 모델은 주어진 자료들을 일반화할 수 있는 최적의 연결강도를 스스로 학습(learning)하게 된다. 다음은 훈련과정을 통하여 구축된 모델을 검증하는 단계(testing phase)로, 구축된 모델에 학습에 사용되지 않은 기지의 결과값을 가지는 입력값을 입력하여 얻어진 예측값과 실험값을 비교함으로서 구성된 모델을 검증한다.

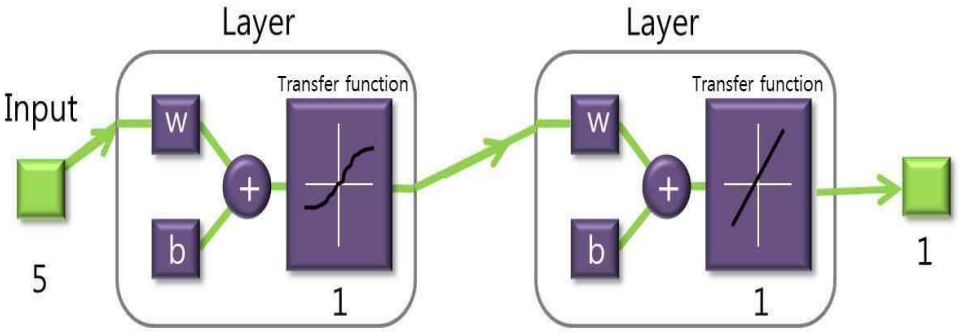


그림 3-1-41 화강풍화토 열전도도 산정을 위한 인공신경망 모델 구조

(1) 화강풍화토 데이터베이스

본 연구에서는 국내 4 개 권역(세종, 평창, 금정, 담양)의 화강암질풍화토 시료에 대한 열전도도 데이터베이스를 구축하였으며 총 106 개 지점의 자료들이 인공신경망 모델의 구축 및 검증에 사용되었다. 모델에 사용된 화강풍화토에 대한 특성을 표 3-1-12 에 나타내었다. 이 중 약 69.8%에 해당하는 74 개 지점의 자료가 인공신경망 구축을 위해 '학습자료'로 사용되었으며, 전체자료 중 임의로 선택된 약 28.3%에 해당하는 30 개 지점의 자료는 구축된 모델의 '검증자료'로 사용되었다. 각각의 입력값들은 인공신경망의 학습을 효율적으로 수행하기 위하여 최대값과 최소값을 기준으로 [0, 1]범위의 값들로 정규화(normalized)되었다.

표 3-1-12 인공신경망 학습 및 검증에 사용된 화강풍화토의 특성

지역	간극률(n)	함수비(%)	흙입자의 열전도도 (W/mK)	#200체통과율 (세립토비율)	C_u	C_g	USCS
세종시	0.48~0.61	0~20.0%	3.50	1.60	7.68	1.23	SP
평창군	0.49~0.58	0~22.3%	3.49	1.80	7.80	1.01	SP
금정구	0.55~0.64	0~24.4%	3.88	1.20	12.83	1.47	SW
담양군	0.57~0.67	0~25.8%	6.04	1.20	13.80	1.67	SW

(2) 최적화 기법

본 연구에서 구축된 인공신경망 모델의 학습규칙은 오차역전파 알고리즘(error back-propagation algorithm)이 이용되었다. 다층 신경망의 학습에 이용되는 오차역전파 알고리즘은 입력 값과 결과 값이 비선형적인 관계를 구축하는 함수근사화에 매우 효율적인 것으로 알려져 있다. 또 연결강도(weight)와 바이어스(bias)를 최적화하는 기법으로는 matlab toolbox 에서 제공하는 Levenberge-Marquardt 기법이 이용되었으며, 이 기법은 오차역전파 알고리즘의 학습효과를 향상시키는 역할을 한다. 학습은 최대 훈련회수(max. epoch)에 도달하거나 식 (1.2.2)에서와 같이 평균제곱오차(mse)가 최종 목적 제곱오차(mean squared error goal)인 0.005 이하로 수렴하는 경우에 종료되도록 설정하였다.

$$mse = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(a(k)-t(k))^2 \qquad (1.2.2)$$

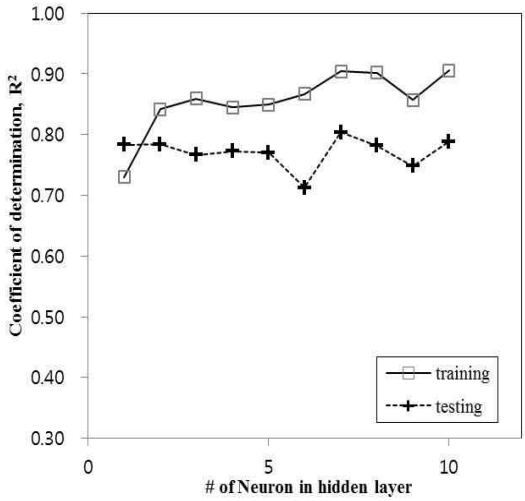
여기서, a(k)는 인공신경망의 열전도도 예측 값, t(k)는 실험에 의한 열전도도 측정값, n은 학습에 사용된 전체 자료의 수이다.

(3) 최적모델 결정

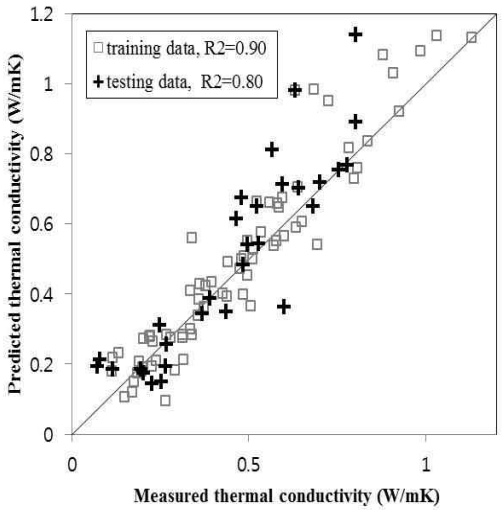
본 연구에서는 열전도도 인공신경망 모델을 구축하기 위해 5 가지의 기본입력변수들을 설정하였고, 입력변수에는 흙의 함수비(water content), 흙의 간극률(porosity), 흙입자의 열전도도, 균등계수(coefficient of uniformity), 곡률계수(coefficient of curvature)가 사용되었다. 은닉층은 단일 은닉층을 사용하였으며 은닉층에 존재하는 뉴우런의 수와 전달함수의 종류에 따라 인공신경망 모델의 정확도(accuracy)가 달라질 수 있기 때문에 3 개의 전달함수(Log-sigmoid, Tan-sigmoid, Linear)의 조합들을 표 3-1-13 과 같이 적용하고 은닉층에 존재하는 뉴런의 수를 1 개에서 10 개까지 증가시키면서 학습자료와 검증자료에 대한 모델의 예측정확도(R2)를 찾고, 가장 높은 예측정확도를 보이는 모델을 최적의 인공신경망-열전도도 추정 모델로 결정하였다.

표 3-1-13 전달함수 조합 및 모델 별 R^2 비교

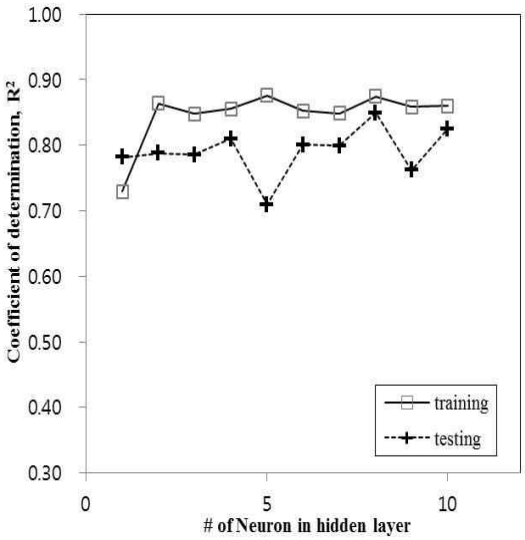
전달함수	최적 뉴우런 수	training data R^2	testing data R^2
Logsig-Linear	7	0.90	0.80
Logsig-Logsig	8	0.87	0.85
Logsig-Tansig	9	0.93	0.84
Tansig-Linear	10	0.89	0.83
Tansig-Logsig	7	0.85	0.87
Tansig-Tansig	6	0.85	0.82



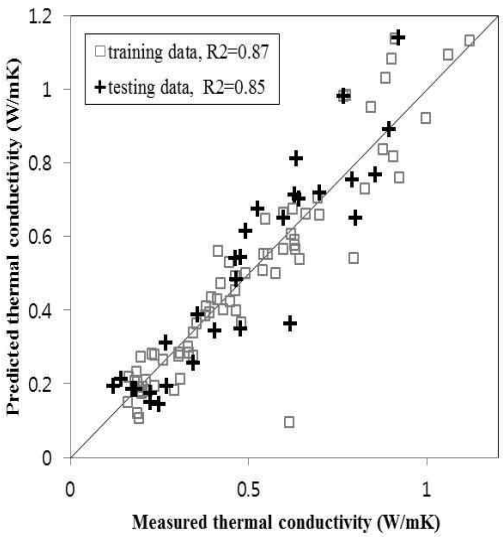
(a) 은닉층의 뉴우런 수에 따른 결정계수(R2)



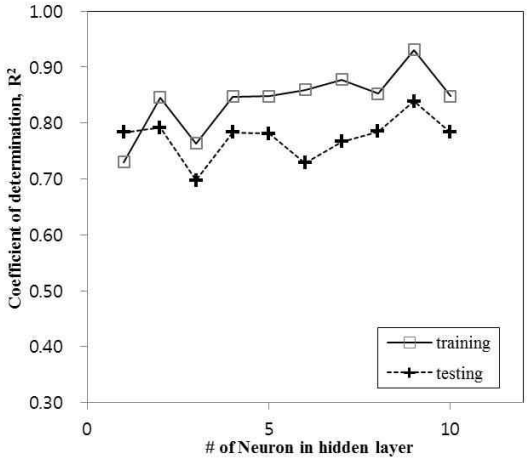
(b) Logsig(7)-Linear 모델



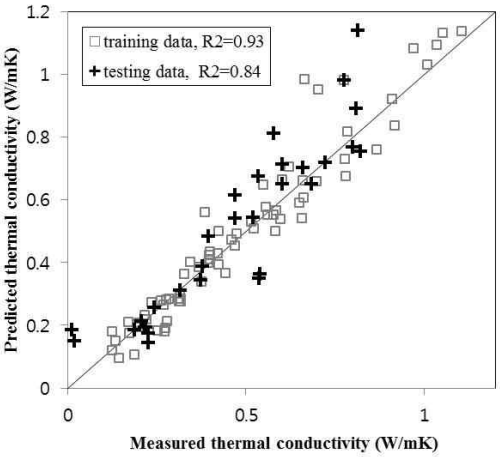
(c) 은닉층의 뉴우런 수에 따른 결정계수(R2)



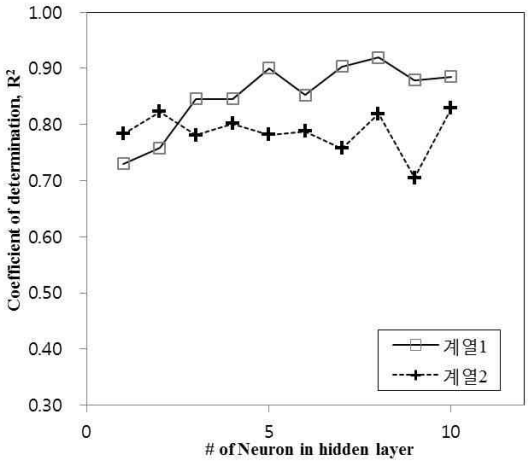
(d) Logsig(8)-Logsig 모델



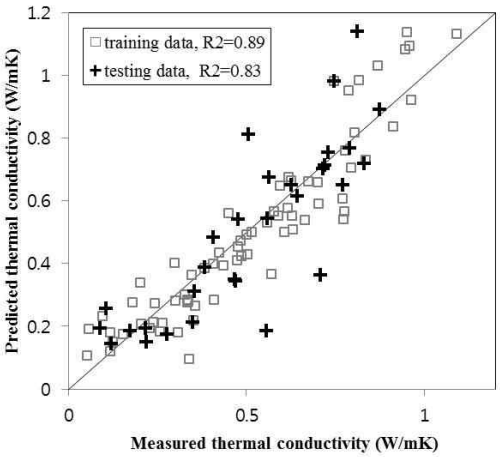
(e) 은닉층의 뉴우런 수에 따른 결정계수(R2)



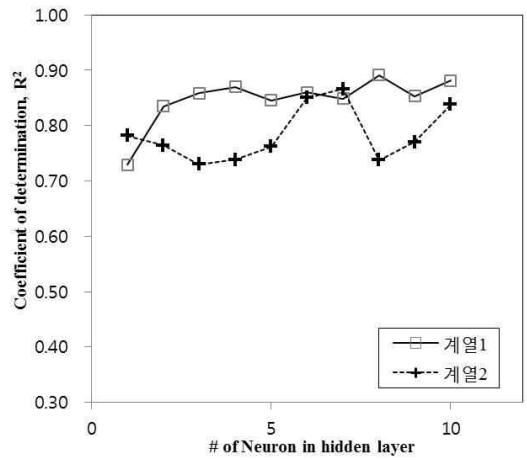
(f) Logsig(9)-Tansig 모델



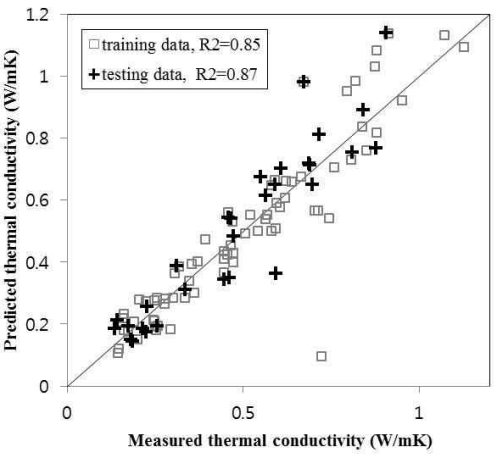
(g) 은닉층의 뉴우런 수에 따른 결정계수(R2)



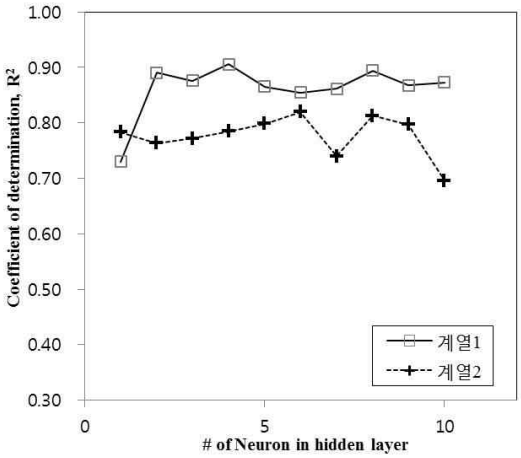
(h) Tansig(10)-Linear 모델



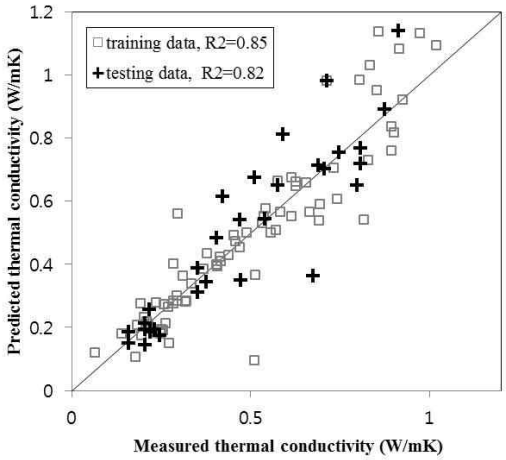
(i) 은닉층의 뉴우런 수에 따른 결정계수(R2)



(j) Tansig(7)-Logsig 모델



(k) 은닉층의 뉴우런 수에 따른 결정계수(R2)



(l) Tansig(6)-Tansig 모델

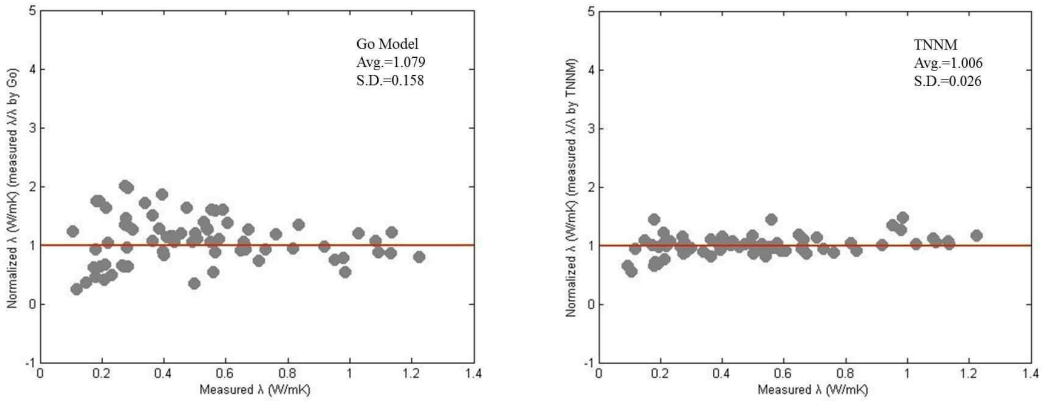
그림 3-1-42 최적모델구성을 위한 뉴우런 수와 전달함수 조합에 따른 예측정도(R2) 비교

그림 3-1-42(a), (c), (e), (g), (i), (k)는 다양한 종류의 전달함수로 조합된 인공신경망 모델 내에서 뉴우런 수의 증가에 따른 학습자료와 검증자료에 대한 예측값과 실험값의 결정계수(coefficient of determination) R^2의 변화를 보여주고 있다. 뉴우런의 개수가 증가할수록 학습자료에 대한 결정계수가 증가하는 경향을 보이는 반면 학습에 사용되지 않은 검증자료에 대한 결정계수는 지속적으로 증가하기 보다는 증감현상을 반복하는 양상을 보였다. 학습자료에 대한 결정계수의 증가현상은 뉴우런의 수의 증가로 인해 학습효과가 증가된다기보다는 자료를 기억(remember)하는 현상이라고 볼 수 있다. 본 연구에서는 학습자료의 결정계수 값이 높은 범위에서 검증자료의 결정계수 값이 최대인 뉴우런의 수를 최적 뉴우런 수로 판단하였으며 이를 표 3-1-13에 제시하였다. 그림 3-1-42(b), (d), (f), (h), (j), (l)에는 각 모델의 최적 뉴우런의 수를 적용한 경우의 학습 및 검증자료에 대한 각 모델의 예측결과를 실험결과와 비교한 것이며 이때의 결정계수 또한 표 3-1-13에 명시하였다. 6개의 모델 모두 결정계수 0.80 이상의 높은 예측결과를 보였으며 그중에서 Logsig(9)-Tansig의 전달함수 조합을 사용한 인공신경망 모델이 가장 적합한 모델로 결정되었다.

(4) 열전도도 인공신경망 모델(TNNM)의 검증

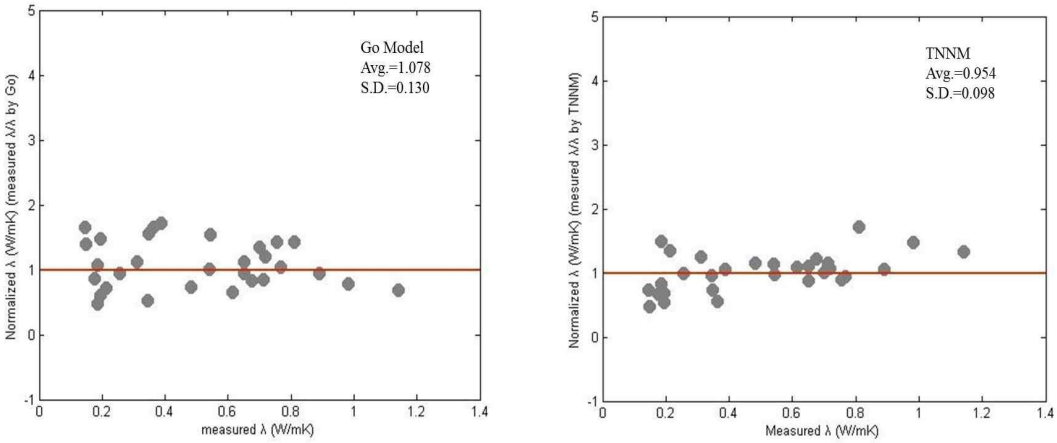
본 연구에서 데이터베이스를 기반으로 만들어진 3차원 곡면 모델(식 1.2.1 참조)과 개발된 인공신경망 모델(Logsig(9)-Tansig)에 의해서 산정된 열전도도를 비교해봄으로써 인공신경망 모델의 예측 정확성을 검증해보고 그 유용성에 대해서 고찰해보았다. 제안된 모델들을 이용하여 학습자료와 검증자료에 대한 열전도도를 예측하였고, 이를 실험 실측값으로 정규화 하여 그림 3-1-43과 그림 3-1-44에 도시하였다. 경험적 모델의 경우 학습

자료와 검증자료에서 각각 1.079 와 1.078 의 평균값과 각각 0.158 과 0.130 의 표준편차를 보였으며, 분산된 양상을 고려할 때 낮은 열전도도 범위로 갈수록 예측능력이 떨어짐을 확인 할 수 있다. 또한 인공신경망 모델의 경우 학습자료와 검증자료에서 평균 1.006 과 0.954, 표준편차 0.026 과 0.098 로서 경험적 모델보다 높은 예측 정확도를 나타내었다. 경험적 모델이 2 개의 입력변수를 사용한 반면, 인공신경망의 경우 5 개의 입력변수를 고려하였기 때문에 상대적으로 더 높은 정확도를 보였다. 이처럼 인공신경망 모델은 다양한 특성을 갖는 지반에서 여러 개의 핵심인자들을 모두 입력변수로 고려할 수 있기 때문에 기존 모델들보다 예측능력이 높으며, 지속적인 자료축적을 통해 국내 전 지반에 활용 가능한 모델로 발전이 가능하기에 그 적용성이 높다고 판단된다.



(a) Go 모델 (b) 인공신경망 모델

그림 3-1-43 경험적 모델과 인공신경망 모델로 예측된 정규화 된 열전도도 비교(학습자료)



(a) Go 모델 (b) 인공신경망 모델

그림 3-1-44 경험적 모델과 인공신경망 모델로 예측된 정규화 된 열전도도 비교(검증자료)

바. 결론

본 연구에서 제안된 경험적 모델과 인공신경망 모델에 대한 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

① 실내 열전도도 측정 실험을 통해 구축된 데이터베이스를 기반으로 간극률(porosity)과 함수비(water content)에 대한 열전도도 추정모델을 제안하였고 이를 사용자 친화적 인터페이스를 갖춘 프로그램화 하였다. 개발한 프로그램은 다양한 흙에 대해서, 상세한 지반조건을 반영하여 열전도도 값을 산출할 수 있다. 이러한 열전도도 예측모델은 효율적인 열에너지 저장 기술 적용 및 설계에 필수적인 역할을 제공한다.
② 경험적 모델을 이용하여 학습자료와 검증자료에 대한 열전도도를 예측한 후 실험 실측값으로 정규화한 결과 각각 1.079 와 1.078 의 평균값과 각각 0.158 과 0.130 의 표준편차를 보였으며, 분산된 양상을 고려할 때 낮은 열전도도 범위로 갈수록 예측능력이 떨어졌다.
③ 열전도도 인공신경망 모델은 단일 은닉층으로 구성되어 있으며 Logsig-Linear, Logsig-Logsig, Logsig-Tansig, Tansig-Linear, Tansig-Logsig, Tansig-Tansig 모델에 대해 각각 7, 8, 9, 10, 7, 6 의 뉴우런 수가 최적인 것으로 나타났다. 6 개모델 모두 학습자료에 대해 0.85~0.93 의 결정계수(R^2)를, 검증자료에 대해 0.80~0.87 의 결정계수(R2)를 보여, 6 개의 모델 모두 입력변수와 출력변수(열전도도)사이의 비선형적 상관관계를 합리적으로 나타냈었다. 그중 가장 높은 예측능력을 보이는 모델을 선정하여, 실용적으로 적용 가능한 모델(Logsig(9)-Tansig)을 확보하였다.
④ 인공신경망 모델은 다양한 특성을 갖는 지반에서 여러 개의 핵심인자들을 모두 입력변수로 고려할 수 있기 때문에 기존의 경험적 모델보다 더 높은 예측결과를 보여준다.
⑤ 본 연구에서 개발된 인공신경망 모델은 추후 지속적인 자료축적을 통해 모델의 정확도를 향상시킬 수 있으며, 국내 전 지반에 활용 가능한 모델로의 발전 가능성이 크다.

2절. 설계프로그램 개발

1. 지열 시스템 설계

지열 시스템 설계는 부하를 입력받고, 그에 맞는 히트펌프 및 지중 열교환기를 결정한 후, 부하를 감당할 수 있는 지중 열교환기의 깊이를 산출하는 과정으로 이루어진다. 먼저 설계부하(design load)는 실내 환경을 원하는 온도와 습도 조건으로 유지하기 위해 시간당 투입하거나 제거하는 에너지 양으로 정의할 수 있다(공형진, 2012). 설계에서는 주로 월별 피크 부하(peak load) 및 총 부하(total load)를 사용하고 있다. 부하는

일반적으로 건축적인 요인과 설비적인 요인으로 구성되어 있으며 건물의 단열성, 틈새바람, 조명, 인체발열, 태양열 등 다양한 요소를 조합하여 산정하게 된다(한정상, 2010).

다음으로 히트펌프는 응축기, 증발기, 4방 밸브 등의 작동 메커니즘에 따라 냉·난방 모두의 경우에 이용할 수 있으며(그림 3-2-1과 그림 3-2-2) 열을 한곳에서 다른 곳으로 효율적으로 이동시킬 수 있어 에너지 효율성이 크고 친환경적인 장비이다. 히트펌프는 피크 부하를 감당할 수 있는 용량으로 산정되어야 하며 선정된 히트펌프의 성적서를 통해 정해진 히트펌프 유입 온도(entering water temperature - EWT)에서의 냉난방 능력(capacity)과, 소비 전력(power)을 확인할 수 있다. 설계에서는 히트펌프의 효율인 COP(coefficient of performance)가 주로 반영된다.

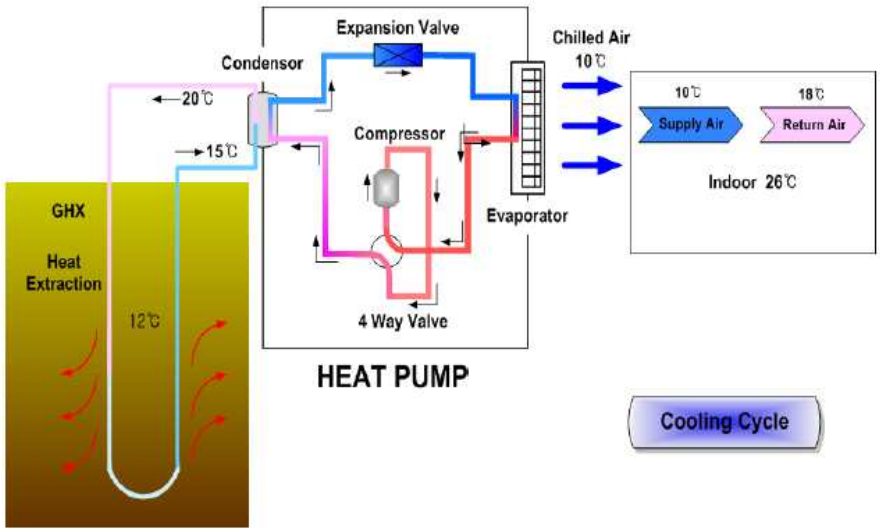


그림 3-2-1 히트펌프의 냉방 사이클 (임효재 등, 2010)

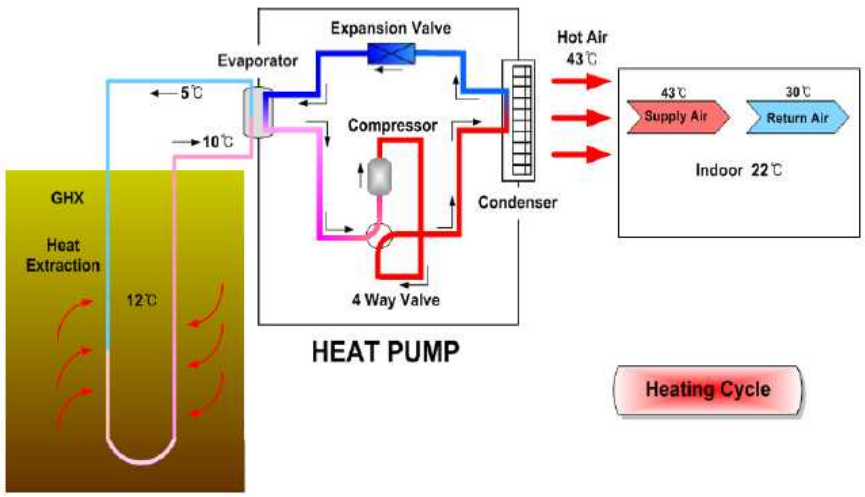


그림 3-2-2 히트펌프의 난방 사이클 (임효재 등, 2010)

마지막으로 요구되는 지중 열교환기의 깊이를 결정하게 된다. 지중열 교환기의 파이프, 그라우트, 파일 등의 제원뿐만이 아니라 지반의 초기온도, 열전도도 등 지반 조건, 순환수의 속도, 비열 등의 제원, 보어홀 배열 등의 다양한 조건을 입력하여 피크 부하를 감당할 수 있는 요구 깊이를 결정한다.

지열에너지의 이용이 크게 활성화되면서 미국, 유럽 등지에서 지중 열교환기 설계를 위한 다양한 상용 설계 프로그램들이 개발되었다. 이러한 상용 프로그램들은 대체적으로 주어진 냉난방 부하와 지중의 열전달 특성을 해석하여 필요로 하는 지중 열교환기의 깊이, 배치 등을 고려한 설계 방안을 제시한다. 또한 각각의 계산 방법에는 차이가 있지만 장기적인 시뮬레이션에 따른 열 간섭 효과, 보어홀 배치 간격, 다층지반, 시스템 최적화 등이 고려된다. 다양한 설계 프로그램들 중 가장 널리 사용되는 몇몇 프로그램들의 제원 및 특징은 표 3-2-1과 같다.

표 3-2-1 다양한 지중 열교환기 설계 프로그램들의 설계 특성

프로그램	개발	해석해	보어홀 및 지중 열교환기 형태
GLD	Gaia Geothermal, USA	Kavanaugh's design method, Cylindrical source model	수직 밀폐형 (U, W형 타입)
EED	Lund University, Sweden	G-function	수직 밀폐형 (U, W, 3U형 타입)
GchpCalc	Energy Information Service, USA	Kavanaugh's design method, Cylindrical source model	수직 밀폐형 (U, W형 타입)
GLHEPRO	IGSHPA, USA	G-function	수직 밀폐형 (U, W형, 동심 이중관)
PILESIM2	SUPSI, Switzerland	Trnsys, Numerical analysis	에너지 파일(U~5U형, 동심 이중관)

국내에서는 특히 GLD, EED, GLHEPRO, GchpCalc가 에너지 관리공단으로부터 정식으로 인증을 받고 사용되고 있다. 하지만 GLD와 GchpCalc, EED와 GLHEPRO의 설계 원리는 거의 비슷한 것으로 알려져 있기 때문에 좀 더 대중적이고 일반적인 프로그램들인 GLD와 EED를 널리 사용하고 있다. 두 프로그램의 설계 원리와 특징은 다음과 같다.

가. GLD(Ground Loop Design)

미국에서 개발된 프로그램으로 현재 국내에서 가장 널리 사용되고 있다. 설계부하 입력 모듈, 히트펌프 입력 모듈, 지반, 순환수, 지중 열교환기 등 설계변수 입력 모듈로 나누어져 지중 열교환기를 설계한다. 부하, 히트펌프, 지반, 파이프, 채움재 등의 각종 제원을 입력하면 Kavanaugh의 설계 방법을 통해 부하를 감당하기 위해 필요로 하는 지중 열교환기의 깊이를 제시한다. 수직밀폐형 지중 열교환기 뿐만 아니라, 수평형 지중 열교환기, 지하수를 이용하는 지표수 지중 열교환기까지도 설계할 수 있다. 또한 히트펌프 모델, 지반, 순환수, 파이프 등의 광범위한 데이터베이스를 제시하여 상용 지열 해석 프로그램 중 가장 편리하며 상업적으로 이용성이 가장 높은 프로그램이다. 부하는 시설 내 각 구역을 합쳐 총 평균 부하를 계산하는 Average Block Loads와 각 구역을 따로 관리하는 Zone Manager로 나누어져 있어 부하를 다양하게 입력할 수 있다.

프로그램 내 열전달 해석해로는 열원을 무한한 원통으로 표현하는 무한 원통형 열원 모델(Infinite Cylindrical Source Model)을 이용한다. 또한 지중 열교환기 사이에 쌓이는 열을 계산하여 온도 변화를 계측, 보어홀 배치에 따른 장기적인 열 간섭 효과를 고려한다. 그리고 이를 통해 EWT 변화를 장기적으로 계산하여 그래프로 제시한다. 이 그래프를 통해 과도하거나 과소한 EWT 변화를 관찰하여 시스템의 지속 가능성을 판단할 수 있다. 해석 후에는 Geothermal System Analyzer를 이용하여 다른 전통적인 냉·난방 시스템과의 경제성을 비교분석할 수 있다. 그림 3-2-3과 3-2-4는 각각 부하, 히트펌프 입력 모듈과 설계 결과를 나타낸다.

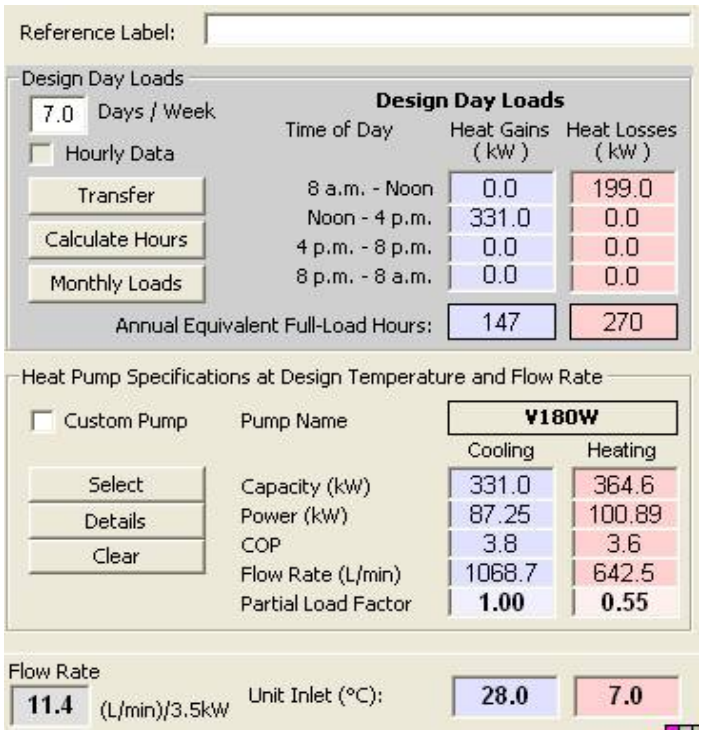


그림 3-2-3 부하, 히트펌프 제원 입력 (GLD)

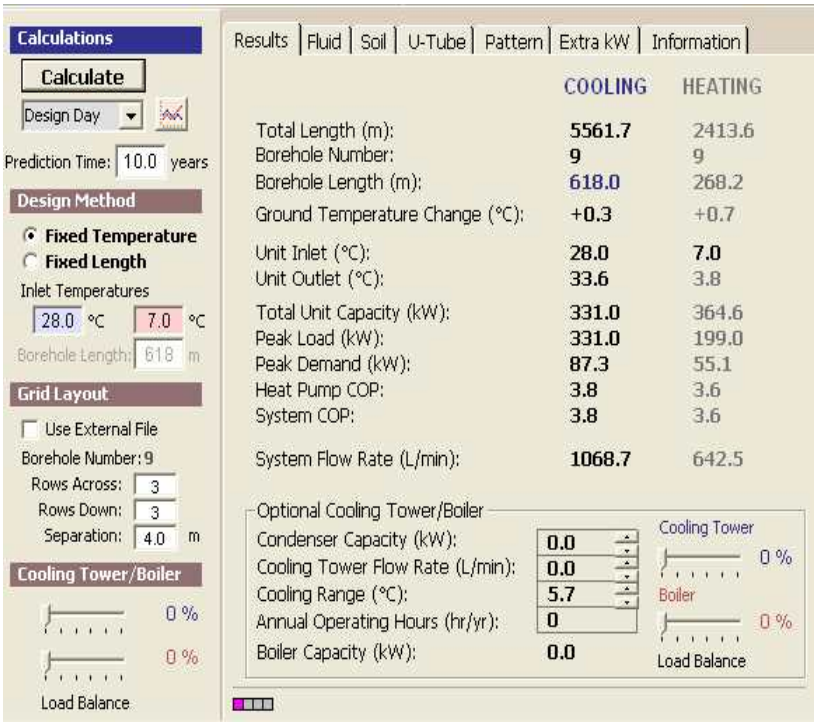


그림 3-2-4 설계 결과 화면 (GLD)

나. EED(Earth Energy Designer)

Sweden에서 개발된 설계프로그램으로 히트펌프, 지반, 순환수의 제원 등 GLD에서 제공하는 데이터베이스에 관한 기능은 없지만, 좀 더 다양한 지중 열교환기 종류를 간편하게 제공하고 있다. 수 천 개의 수치해석 데이터를 이용하여 보어홀 배치에 대한 해를 구하고, 이를 보어홀 간의 간격과 시간의 함수인 'G-function'에 대입하여 지중 열교환기를 설계한다.

EED의 가장 큰 특징으로는 보어홀 열 저항을 산정하는 방법이 GLD와는 완전히 달라 지반조건을 더 자세하게 고려할 수 있고, 보어홀 내 파이프 배치 간격도 자유롭게 설정할 수 있다. 반면 EED에서는 오직 수직 밀폐형 열교환기만 설계가 가능하며, 다층 지반이나 지하수위 등은 고려가 불가능하다. 해석 후에는 역시 유체의 온도에 대한 그래프를 확인할 수 있고, 다양한 보어홀 배치, 간격에 따라 달라지는 지중 열교환기의 깊이가 제시되어 이를 통해 시스템을 최적화할 수 있다.

마찬가지로 그림 3-2-5와 3-2-6은 EED의 보어홀, 지중 열교환기 설계 및 결과화면을 나타낸다.

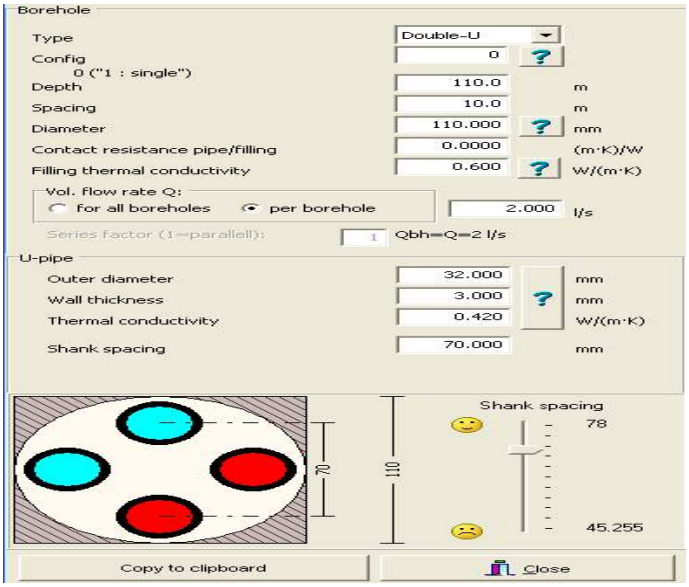


그림 3-2-5 지중 열교환기 제원 입력 (EED)

```
QUICK FACTS
  Cost                                  -
  Number of boreholes                   1
  Borehole depth                        110.00 m
  Total borehole length                 110.00 m

                D E S I G N    D A T A
                ======================

GROUND

  Ground thermal conductivity           3.500 W/(m·K)
  Ground heat capacity                  2.160 MJ/(m³·K)
  Ground surface temperature            8.00 °C
  Geothermal heat flux                  0.0600 W/m²

BOREHOLE

  Configuration:                        0 ("1 : single")
  Borehole depth                        110.00 m
  Borehole spacing                      10.00 m
  Borehole installation                 Double-U
  Borehole diameter                     110.00 mm
  U-pipe diameter                       32.000 mm
  U-pipe thickness                      3.000 mm
  U-pipe thermal conductivity           0.420 W/(m·K)
  U-pipe shank spacing                  70.000 mm
  Filling thermal conductivity          0.600 W/(m·K)
  Contact resistance pipe/filling       0.0000 (m·K)/W

THERMAL RESISTANCES

  Borehole thermal resistances are calculated.
  Number of multipoles                  10
  Internal heat transfer between upward and downward channel(s) is cons
```

그림 3-2-6 설계 결과 화면 (EED)

다. Kavanaugh 설계방법

설계에 사용될 가장 기본적인 방법은 Kavanaugh(1995)가 개발한 설계 방법이다. Kavanaugh는 지중 루프를 통하여 지반에 가해지는 열 펄스를 연간 열에너지 비평형 이동량(장기), 월평균 열 이동율(중기), 단기 최대 열 이동량의 3가지로 구분하고 각각에

대한 지반의 열 저항을 적용하여 지중 루프의 길이를 산출하는 방안을 제시하였다(산업자원부, 2007). 지반의 열 저항 계산에는 각각의 지중 열교환기에 해당하는 해석해를 적용함으로써 수 시간 정도의 짧은 시간부터 해석 년수까지 열 펄스에 의한 영향이 고려될 수 있도록 하였다. 보어홀 열 저항의 경우에는 값을 바로 입력할 수 있어 보어홀 열 저항을 구하는 여러가지 방법의 적용이 가능하다. 또한 온도 보정계수를 통해 보어홀 사이에서 발생하는 열 간섭 효과를 고려하며 순환 파이프 내의 열손실도 반영할 수 있다. 이 방법은 계산이 간단하고 GLD 등 가장 널리 사용되는 설계 프로그램에서 사용하고 있으며 본 연구에서는 이 방법 내에서 계산해야 할 변수들을 산정하는 방법들을 제시하였다.

먼저 Eskilson(1987)은 정상 상태를 가정하였을 때의 보어홀 벽면과 순환수와의 열 전달식을 고안하였다.

$$\frac{Q}{L} = \frac{T_f - T_b}{R_b} = \frac{\triangle T}{R_b} \tag{2.1.1}$$

여기서 Q는 지반으로 전달되는 열량이고 L은 보어홀의 깊이, T_f는 파이프 내 순환수 입출구의 평균 온도, T_b는 보어홀 벽면의 온도, R_b는 보어홀 열 저항이다. 보어홀은 1차원 전도를 기반으로 한 선형 열원이기 때문에 식 (2.1.1)이 성립한다.

식 (2.1.1)을 L로 다시 정리하면 L은 온도 변화와 열 저항, 열량에 관한 식으로 나타낼 수 있으며 이를 정리하면 Kavanaugh의 설계식이 된다. 냉방, 난방에 대한 Kavanaugh의 설계 식은 식 (2.1.2) 및 (2.1.3)과 같다.

$$L_c = \frac{q_a \times R_{ga} + q_{lc}\left(\frac{COP_c + 1}{COP_c}\right) \times (R_b + PLF_m \times R_{gm} + R_{gd}F_{sc})}{T_g - \frac{T_{wi} + T_{wo}}{2} - T_p} \tag{2.1.2}$$

$$L_h = \frac{q_a \times R_{ga} + q_{lh}\left(\frac{COP_h - 1}{COP_h}\right) \times (R_b + PLF_m \times R_{gm} + R_{gd}F_{sc})}{T_g - \frac{T_{wi} + T_{wo}}{2} - T_p} \tag{2.1.3}$$

여기서 q_a는 연간 지반에 흡수 또는 방출되는 열량을, R_{ga}, R_{gm}, R_{gd}는 각각 연간, 월간, 일간 단위의 시간에 대한 지중의 유효 열 저항을, q_{lc}, q_{lh}는 건물의 냉난방 피크 부하를, COP_c, COP_h는 히트펌프의 냉난방 성능 계수를, R_b는 보어홀 열 저항을, PLF_m은 월간 부분 부하율을, F_x는 열 교환기 파이프 부근에서 단기적으로 순환하는 열 손실계수를,

T_g는 지반의 초기 온도를, T_{wi}, T_{wo}는 열 교환기 입출구의 온도를, T_p는 천공 간의 열 간섭에 의한 영향을 반영하는 온도 지수를 나타내며 q_a와 PLF_m은 추가 계산이 필요하며 이는 식 (2.1.4) 및 (2.1.5)와 같다.

$$q_a = \frac{q_{cooling} \times \frac{COP_c + 1}{COP_c} + q_{heating} \times \frac{COP_h - 1}{COP_h}}{365 \times 24} \tag{2.1.4}$$

$$PLF_m = \frac{\text{피크가 가장 큰 달의 총 부하량}}{\text{그 달의 피크 부하량} \times 24 \times 31} \tag{2.1.5}$$

여기서 $q_{cooling}$,$q_{heating}$은 연중 총 냉, 난방 열량을 의미하고 각각의 피크 부하에 최대 부하가 지속될 시 연간 냉, 난방 시간을 곱한 값으로 구할 수 있다. PLF_m은 피크가 가장 큰 달의 총 부하량에 그 달의 피크 부하량을 나눈 값으로 계산할 수 있다.

Kavanaugh의 식은 연간 열량과 연간 저항을 함께 고려했고, 총 부하보다는 피크 부하가 설계를 지배하는 방법으로 피크부하를 감당할 수 있는 기준에 맞춰 설계된다. 하지만 과다 설계를 막기 위해 보어홀의 열 저항과 월간 부분 부하율 등을 곱하여 피크 부하가 걸리지 않는 시간을 대비하도록 설계되어 있다. 이 설계 방법의 가장 큰 장점은 계산의 간편함과 피크 부하가 매우 높더라도 감당할 수 있는 높은 안전율에 있다.

2. 주요 설계 모듈

가. 보어홀 열저항

보어홀 열 저항은 지중 열교환기부터 채움재, 혹은 PHC 등의 파일로 이루어진 보어홀 내의 열전도에 따른 파이프에서부터 보어홀 벽면까지의 열 저항을 의미하며, 보어홀 밖의 지반 요소에 의해서도 영향을 받는다. 이는 Kavanaugh 설계법뿐만이 아닌 전반적인 지열 시스템에 있어서 가장 큰 영향을 미치는 요소 중 하나이다. 보어홀 열 저항은 이를 구하는 방법에 따라 상당히 달라질 수 있으며, 그에 따라 지중 열교환기의 설계깊이에 큰 변동을 일으킬 수 있다. GLD를 이용하여 보어홀 열 저항의 변화에 따른 지중 열교환기의 요구 깊이 변화를 그림 3-2-7에 나타내었다.

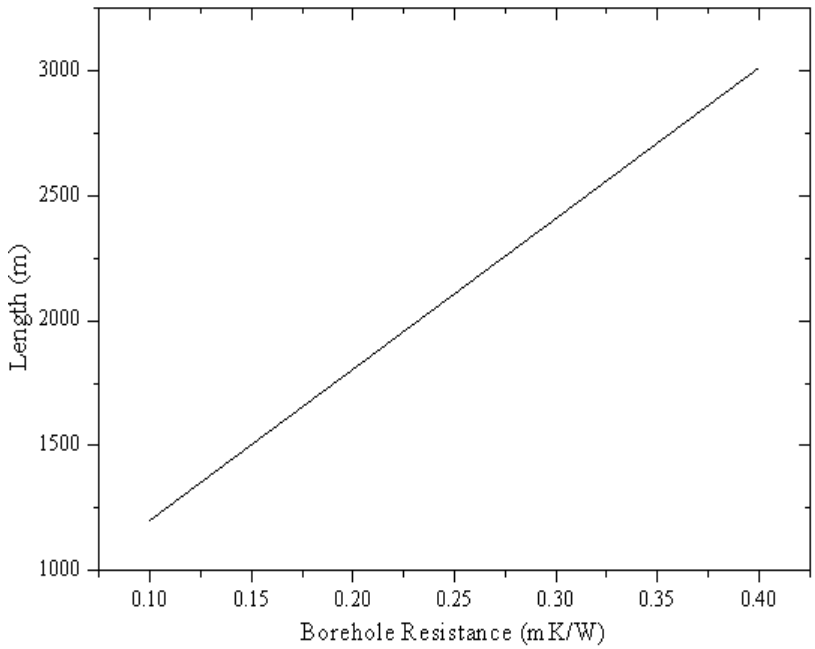


그림 3-2-7 보어홀 열 저항에 따른 지중 열교환기 요구 깊이 변화

그림에서 볼 수 있듯이, 보어홀 열 저항은 절대적으로 보았을 때 상당히 작은 수치이지만 값이 2배 가량 커짐에 따라 지중 열교환기의 요구 깊이도 50% 가량 커짐을 알 수 있다. 이와 같이 보어홀 열 저항을 산정하는 방법을 정확하게 확립하는 것은 매우 중요하다. 보어홀 열 저항 산정방법은 크게 열의 1차원 전도를 고려한 'Series sum method'와 지중 열교환기 파이프 각각의 보어홀 내 좌표를 고려한 'Multipole method'로 구분된다. 먼저 Series sum method는 1차원 전도에 의한 파이프, 순환수, 채움재 등의 열 저항을 각각 구한 후 이들을 더하여 총 저항을 산정하는 방법으로 채움재의 저항을 구하는 방법에 따라 보어홀 내 파이프 배치에 따른 'Shape factor method' 또는 열이 전도되는 파이프를 한 개로 가정하는 유효 파이프 직경 계산에 따른 'Equivalent diameter method'로 나뉜다. 한편 Multipole method는 파이프 각각의 좌표와 채움재, 주변 지반의 열 특성을 한꺼번에 고려하여 보어홀 열 저항을 한 번에 구하는 방법이다. 이 방법은 파이프의 배치가 자유롭고 지반 특성을 고려할 수 있기 때문에 Series sum method에 비해 조금 더 발전한 형태의 방법이다.

하지만 두 가지 방법 모두 지반의 깊이에 따라 형상이 변하지 않는 선형 교환기에는 적용이 가능하나 코일형 교환기에는 적용할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 코일형 교환기의 보어홀 열 저항은 수치해석으로 산정하였다. 식 (2.1.1)에서 정해진 Q/L에 따른 T_f와 T_b를 수치해석으로 구하면 그에 따른 보어홀 열 저항을 구할 수 있다.

표 3-2-2에 각각의 방법에 따라 보어홀 열 저항을 산정할 수 있는 지중 열교환기의 종류가 나타나 있다.

표 3-2-2 다양한 열 저항 산정 방법과 해당하는 지중 열교환기

열 전달 산정 방법		지중 열교환기
Series sum method	Shape factor method	U, W형 교환기
	Equivalent diameter Method	U, W, 3U형 등 모든 라인형 교환기 (파이프간의 거리가 일정한 경우)
Multipole method		U, W, 3U형 등 모든 라인형 교환기 (파이프 좌표와 무관)
Numerical analysis		라인형 교환기, 코일형 교환기

(1) Series sum method

보어홀 내 열의 1차원 전도를 가정하여 열 저항을 산정하는 방법이다. 보어홀이 파이프와 채움재로 구성되어 있을 때, 파이프의 전도, 순환수의 대류, 채움재의 전도 저항의 합(Jun et al, 2009)을 보어홀 열 저항으로 사용하였으며 이는 식 (2.2.1)과 같다.

$$R_b = R_{cond} + R_{conv} + R_{grout} \tag{2.2.1}$$

여기서 R_{cond}는 파이프의 전도 저항을, R_{conv}는 순환수의 대류 저항을, R_{grout}는 채움재의 전도 저항을 의미한다. 파이프의 열전도 저항은 파이프 자체의 열전도도와 파이프의 외경 및 내경을 이용하여 구할 수 있다(Incropera, 2008).

$$R_{cond} = \frac{1}{2\pi\lambda_p} ln\left(\frac{D_e}{D_e-(D_o-D_i)}\right) \tag{2.2.2}$$

여기서 λ_p는 파이프의 열전도도를, D_o와 D_i는 각각 파이프의 외경과 내경을 의미하며 D_e는 파이프의 유효직경, n은 지반 위에서 열교환기를 보았을 때의 파이프의 개수를 의미한다. 그림 3-2-8은 U형 열교환기의 유효 직경을 나타낸다. 이 경우 파이프의 개수 n은 2가 된다.

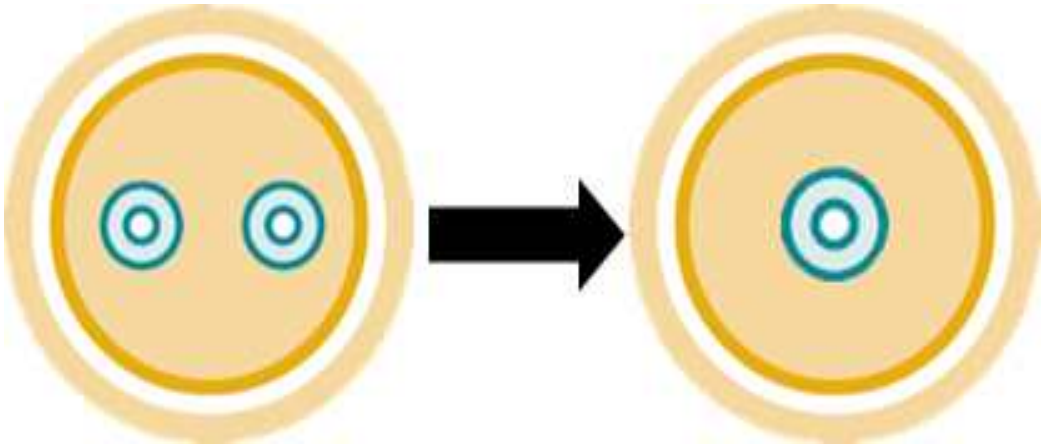


그림 3-2-8 U자형 교환기(n=2)일 때의 파이프 유효 직경

순환수의 대류 저항을 구하는 식은 Dittus-Boelter의 식을 따른다.

$$R_{conv} = \frac{1}{n\pi D_i h_i} \ , \ h_i = \frac{0.023 Re^{0.8} \mathrm{Pr}^{0.3} \lambda_f}{D_i} \tag{2.2.3}$$

여기서 h_i는 대류 계수로 Re(레이놀즈 수), Pr(프란틀 수) 등 유속에 따른 상수와 순환수의 열전도도인 λ_f에 따라 결정된다.

채움재의 저항 산정 방법은 앞에서 언급하였듯이 2가지 방법이 있다. 먼저 Remund(1999)에 의해 제안된 Shape factor method는 파이프의 배치 형태에 따라 산정된 Shape factor를 이용하며, 식 (2.2.4)와 같다. 이 방법은 실험을 통해 산정되었으며 3가지의 제한된 배치 형태에도 불구하고 GLD 등의 상용프로그램에서 널리 이용하고 있다.

$$R_{grout} = \frac{1}{\lambda_g \beta_0 (\frac{D_b}{D_o})^{\beta_1}} \tag{2.2.4}$$

여기서 λ_g는 채움재의 열전도도이며 D_b는 보어홀의 지름, β_0과 β_1는 Shape factor이다. 표 3-2-3에 U, W형 열교환기의 Shape factor가 나타나 있다.

표 3-2-3 파이프 배치에 따른 Shape factor (Remund, 1999)

파이프 배치	U자형 교환기		W자형 교환기		파이프 형태
	β_0	β_1	β_0	β_1	
A	20.10	-0.9447	27.68	-0.9411	
B	17.44	-0.6052	21.36	-0.6031	
C	21.91	-0.3796	25.52	-0.3921	

표에서 A자 형태는 파이프 입·출구가 서로 붙은 형태, B자 형태는 보어홀 중간 지점에 위치한 형태, C자 형태는 보어홀 벽면 끝에 붙은 형태를 의미한다. U형 교환기의 Shape factor는 익히 알려져 있으며, W형 교환기에 대해서는 GLD의 해석 결과를 역계산하여 산출되었다.

채움재의 열 저항을 구하는 또 다른 방법으로 파이프의 등가 직경을 구하는 Equivalent diameter method가 있다. 이 방법은 Gu and O'Neal(1998)이 제안한 방법으로 먼저 파이프의 개수 중 하나를 보어홀과 동심원을 이루는 것으로 가정하여 각각에게 미치는 온도변화를 구한 후 중첩법을 이용하여 각각의 값들을 합산하고, 합한 만큼의 온도변화를 일으키는 한 개의 파이프의 직경을 역계산하여 구하는 방법이다. 식 (2.2.5)와 (2.2.6)에 U형 교환기의 등가직경을 구하는 식과 이를 이용하여 채움재의 열 저항을 구하는 식이 나타나 있다.

$$D_e = \sqrt{2D_oL_s} \ , \ D_o \le L_s \le r_b \tag{2.2.5}$$

$$R_{grout} = \frac{\ln(\frac{D_b}{D_e})}{2\pi\lambda_g} \tag{2.2.6}$$

여기서 L_s는 파이프 중심 간의 간격, r_b는 보어홀의 반경을 의미한다. 이 방법은 파이프간의 간격이 보어홀 반경을 넘을 수 없는 제한사항이 있는데, 한 파이프가 보어홀의 가운데에 위치한 것으로 가정되어 동심원을 이룰 때, 파이프 간격이 보어홀의 반경을 넘어 다른 한 파이프가 보어홀 밖으로 나가는 것은 가정에 위반하기 때문이다. 식 (2.2.7)는 식 (2.2.5)를 U형 교환기뿐만이 아닌 W형 이상의 교환기로 확장시킨 식이다(Ngoc Vau Bu, 2013).

$$D_e = [2^{2n-1}D_oL_s^{2n-1} \times \prod_{i=1}^{2n-1} \sin(\frac{i\pi}{2n})]^{\frac{1}{2n}} \tag{2.2.7}$$

파이프의 개수 n에 4(W형 교환기), 6(3U형 교환기) 등의 숫자를 대입하여서 W형이나 3U형의 교환기의 유효 직경을 구할 수 있다.

Series sum method는 비교적 개념이 쉽고 계산이 용이한 장점이 있어 널리 사용되고 있지만

지반특성을 전혀 반영하지 못하고, 파이프의 배치 간격이 형태에 따라 한정되어 있으며 3U형 교환기 이상에서는 Shape factor가 존재하지 않는 단점이 있다. 또한 코일형 교환기에는 적용이 불가능하다.

(2) Multipole method

Hellstrom(1987)이 처음 제안한 방법으로 보어홀 내 파이프의 위치를 복소수좌표화하여 보어홀의 열 저항을 계산한다. 파이프의 위치를 각각 설정할 수 있어 Series sum method와는 다르게 파이프의 개수에 제한을 받지 않는다. 또한 Series sum method가 U자 및 W자 형태에 한정되어 있고, 대칭을 이루는 교환기에만 적용되는 것에 반해 어느 위치에 어느 크기의 파이프가 배치되어있다 하더라도 열 저항을 구할 수 있다.

이 방법은 열 흐름이 정상 상태라는 조건 하에, 파이프, 채움재와 그 주변 지반을 고려하여 지중 열교환기 주변의 온도를 계산하는 데에 사용이 가능하다. 식 (2.2.8)은 주변의 온도 변화를, 식 (2.2.9)와 (2.2.10)은 차수가 j일 때의 열원과 multipole에 관한 해를 제시한다. 지반이 균질한 매체라고 할 때 식에서의 σ는 0이 되고, 이 식들은 더 간단해질 수 있다. 또한 식 (2.2.11)은 계수 σ의 정의이고, 식 (2.2.12)는 multipole이 복소수좌표계로 이루어졌음을 나타낸다. 복소수좌표계는 2차원의 좌표를 나타내기 편리하여 보어홀 내 파이프의 좌표를 표시하는 데 사용된다.

$$T(x,y) = T_{b,av} + Re[\sum_{n=1}^{N} \frac{q_n}{2\pi\lambda_b} \cdot W_0(z,z_n) + \sum_{n=1}^{N}\sum_{j=1}^{J} P_{n,j} \cdot W_j(z,z_n)] \tag{2.2.8}$$

$$W_0(z,z_n) = \begin{cases} \ln(\frac{r_b}{z-z_n}) + \sigma \cdot \ln(\frac{r_b^2}{r_b^2 - \bar{z} \cdot z_n}) & |z| < r_b \\ (1+\sigma) \cdot \ln(\frac{r_b}{z-z_n}) + \sigma \cdot \frac{1+\sigma}{1-\sigma} ln(\frac{r_b}{z}) & |z| > r_b \end{cases} \tag{2.2.9}$$

$$W_j(z,z_n) = \begin{cases} (\frac{r_b}{z-z_n})^j + (\frac{r_{pn} \cdot \bar{z}}{r_b^2 - \bar{z} \cdot z_n})^j & |z| < r_b \\ (1+\sigma) \cdot (\frac{r_{pn}}{z-z_n})^j & |z| > r_b \end{cases} \tag{2.2.10}$$

$$\sigma = \frac{\lambda_b - \lambda}{\lambda_b + \lambda} \tag{2.2.11}$$

$$z = x + y \cdot i \tag{2.2.12}$$

여기서 j는 multipole의 차수, J는 multipole의 숫자, $T_{b,av}$는 보어홀의 평균 온도, q_n은 파이프의 단위 길이당 열량, λ_b는 채움재의 열전도도, λ는 지반의 열전도도, $P_{n,j}$는 multipole, r_b는 보어홀의 반경, r_{pn}은 파이프의 외경을 나타낸다.

식 (2.1.1)처럼 열량과 순환수의 평균 온도와의 관계로 정의된 보어홀 열 저항이 정해지면 주어진 보어홀 벽면의 온도와 추가적인 multipole 개념을 이용하여 식 (2.2.13)과 같이 순환수의 온도를 추정할 수 있다.

$$T_{fm} = T_{b,av} + \sum_{n=1}^{N} q_n \cdot \widehat{R^o}_{m,n} + Re \cdot \left[\sum_{\substack{n=1 \\ m \neq n}}^{N} \sum_{j=1}^{J} P_{n,j} \cdot \left(\frac{r_{pn}}{z_m - z_n}\right)^j + \sigma \cdot \sum_{n=1}^{N} \sum_{j=1}^{J} P_{n,j} \cdot \left(\frac{r_{pn} \cdot \overline{z_m}}{r_b^2 - \overline{z_m} \cdot z_n}\right)^j \right] \tag{2.2.13}$$

여기서 m과 n은 행렬로 나타낸 파이프 번호이고, T_{fm}은 파이프 내 순환수의 평균 온도, $R^0{}_{m,n}$은 차수 J=0에서의 보어홀 열 저항을 나타내며 최종적인 보어홀 열 저항과 관련 계수들은 식 (2.2.14), (2.2.15) 및 (2.2.16)으로 표현된다.

$$\widehat{R^o}_{m,n} = \frac{1}{2\pi\lambda_p} \begin{cases} \ln\left(\frac{r_b}{r_{pn}}\right) + \beta_m + \sigma \cdot \ln\left(\frac{r_b^2}{r_b^2 - r_n^2}\right), & m = n \\ \ln\left(\frac{r_b}{r_{m,n}}\right) + \sigma \cdot \ln\left(\frac{r_b}{\left| r_b^2 - \bar{z} \cdot z_n \right|}\right) & m \neq n \end{cases} \tag{2.2.14}$$

$$\beta_m = 2\pi\lambda_p R_{pn} \tag{2.2.15}$$

$$R_{pn} = \frac{1}{2\pi\lambda_p} \bullet \ln\left(\frac{r_{pn}}{r_{pn} - d_{pw}}\right) + \frac{1}{2 r_{pn} \bullet h_p} \tag{2.2.16}$$

여기서 R_{pn}은 n번째 파이프의 열 저항, d_{pw}는 파이프의 두께, λ_p는 파이프의 열전도도, h_p는 대류 계수를 나타낸다.

Multipole method는 파이프의 개수와 상관없이 열 저항을 자유롭게 산정할 수 있고, 보어홀의 경계가 되는 지반의 열 특성을 고려할 수 있어 Series sum method에 비해 좀 더 광범위한 지중 열교환기에 이용이 가능한 장점이 있다. 하지만 2차원적인 해석 방법으로 지반의 깊이에 따라 교환기의 형태가 변하는 코일형 교환기를 고려할 수 없는 단점이 있다.

나. 지중 열저항

지중 열저항이란 특정한 시간과 임의의 위치에 따른 지중의 열저항을 의미하며 식 (2.1.2)와 (2.1.3)에서의 R_{ga}. R_{gm} 및 R_{gd}를 의미한다. R_{ga}는 연간 열에너지 비평형 이동량에 따른 열저항으로 연간 부하의 불균형에 따라 흡수 또는 방출되는 열량인 q_a와 결합되어 계산되고, R_{gm}은 월평균 열 이동율에 따른 열저항으로 월간 부분 부하율인 PLF_m과 결합되어 계산되며, R_{gd}는 피크 시간에 따른 단기 최대 열 이동량에 따른 열저항으로 단기 열손실계수인 F_x와
결합되어 계산된다.

지중 열저항은 식 (2.1.1)의 개념을 지반 전체로 확장하여 구할 수 있다.

$$R_{ground} = \frac{T_b - T_0}{Q/L} \tag{2.2.17}$$

식 (2.2.17)의 분자 값은 열의 흐름에 따른 보어홀 벽면(지반과 마주하는)에서의 온도 변화량을 의미하게 된다. 이는 해석 모델을 이용하여 산정될 수 있다.

$$R_{ground} = \frac{\theta(u,t)}{Q/L} \tag{2.2.18}$$

여기서 $\theta(u,t)$는 임의의 지점 u, 시간 t에서의 온도 변화량으로 u를 보어홀의 반지름으로 설정하여 지중 열 저항을 산정할 수 있다. 시간은 R_{ga}의 경우 해석하는 연간 시간을, R_{gm}의 경우 1달을, R_{gd}의 경우 4시간을 대입하여 구할 수 있다(Kavanaugh and Rafferty, 1997).

사용가능한 해석 모델로는 무한 선형 열원 모델, 유한 선형 열원 모델, 원통형 열원 모델, 나선형 코일 모델 등 매우 다양한 해석 모델들이 존재한다. 설계에서는 이들 중 선형 교환기와 코일형 교환기, 수직 밀폐형, 에너지 파일 등 지열 시스템 각각의 특징을 고려하여 가장 적합한 모델을 선택하여야한다.

(1) 무한 선형 열원 모델 (Infinite line source model)

간편성과 편리성으로 인해 가장 많이 사용되고 있는 해석 모델로 Kelvin의 열 이론으로부터 출발하였으며 Carslaw and Jaeger(1946)에 의해 제안되었다. 지중 열교환기는 보어홀의 깊이에 비해 직경이 매우 작은 경우에 무한한 선형 열원으로 가정될 수 있으며 무한히 길고 열 유속이 일정한 선형 열원이 초기온도 T_0의 균일한

무한 매질 속에 매설되어 있고, 열이 가해진 후 시간 t가 경과되었을 때 반경이 r인 지점의 지반 온도에 관하여 다음과 같은 해가 성립한다.

$$T(r,t) - T_0 = \frac{Q/L}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}du}{u} \tag{2.2.19}$$

이 모델에서의 지중 열 저항은 식 (2.2.19)에서 Q/L을 나눈 값으로 나타낼 수 있다.

$$R(r,t) = \frac{1}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}du}{u} \tag{2.2.20}$$

무한 선형 이론은 계산이 간편하고 원리가 간단하며 오차가 작은 편이지만, 6시간 이내의 단기 열 펄스에 대한 지반의 열 저항을 계산할 경우에는 오차가 커져서 특히 R_{gd}를 계산할 경우에는 적합하지 않은 방법이다.

(2) 무한 원통형 열원 모델 (Infinite cylindrical source model)

열원을 속이 빈 무한한 원통형으로 가정하는 해석 모델로 Ingersoll(1954)에 의해 제안되었다. 정상 상태의 무한한 매질 속에 위치한 원통형 열원에 관한 기본해는 식 (2.2.21)과 같다.

$$T(r,t) - T_0 = \frac{Q/L}{\pi^2\lambda} \cdot \int_0^{\infty} \left(e^{-\beta^2 z} - 1\right) \frac{J_0(p\beta)Y_1(\beta) - Y_0(p\beta)J_1(\beta)}{\beta^2\left(J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta)\right)} d\beta \tag{2.2.21}$$

여기서 $z = \alpha t/r^2$, $p = r/r_b$이며 J와 Y는 각각 제 1종, 2종 베셀 함수이다. 역시 지중 열 저항은 여기서 Q/L을 나눈 값으로 나타낼 수 있으며 단기의 열에도 무한 선형 열원 모델보다 예측 오차가 적은 것으로 알려져 있어(Philippe et al, 2009) GLD 등의 설계프로그램에도 사용되고 있는 모델이다.

(3) 유한 선형 열원 모델 (Finite line source model)

무한 선형 열원 모델은 보어홀 내의 축방향 열 흐름을 무시하는 단점이 있다. 따라서 Eskilson(1987)은 보어홀의 유한한 길이에 따른 적분을 통해 깊이를 고려한 모델을 최초로 소개하였고, Zeng et al(2002)은 Eskilson의 모델을 바탕으로 유한 선형 해석

모델을 개발하였다. 깊이 H의 지중 열교환기에서 반경 r, 측정 깊이 z, 시간 t에서의 온도 변화는 식 (2.2.22)와 같다.

$$T(r,z,t)-T_0=\frac{Q/L}{4\lambda\pi}\int_0^H\left\{\frac{erfc\left(\frac{\sqrt{r^2+(z-h)^2}}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{\sqrt{r^2+(z-h)^2}}-\frac{erfc\left(\frac{\sqrt{r^2+(z+h)^2}}{2\sqrt{\alpha t}}\right)}{\sqrt{r^2+(z+h)^2}}\right\}dh \tag{2.2.22}$$

무한 선형 열원 모델은 세장비가 낮은 에너지 파일의 경우 유효하다고 할 수 있다. 하지만 하루 미만의 단기 예측 부분에서 무한 선형 열원 모델과 거의 같은 값을 보이기 때문에 역시 R_{gd}를 계산할 경우에는 적합하다고 할 수 없다.

(4) 해석 모델 비교

지금까지 언급한 무한 선형 열원 모델(ILS), 무한 원통형 열원 모델(ICS), 유한 선형 열원
모델(FLS)은 선형 열교환기에 적용될 수 있는 해석해로 설계에 사용할 해석해의 정확한 선택이 필요하다. 이를 위해 해석 모델 각각의 지중 열 저항을 단기(1년), 중기(10년), 장기(30년)로 나누어 비교하였다. 또한 저항값들을 이용한 설계 깊이를 산정하여 GLD와 비교하였다. 전체적인 설계 과정에서 해석 모델이 사용된 부분을 제외한 모든 다른 설계 값들은 동일하게 가정되었다.

먼저 지중 열 저항 중 R_{gm}, R_{gd}는 1달, 4시간의 열 저항이기 때문에 연간 단위에서는 값이 변하지 않는다. 표 3-2-4에 각각의 열 저항값이 나타나 있다.

표 3-2-4 해석 모델의 중기(R_{gm}), 단기(R_{gd}) 열 저항

	ILS	ICS	FLS
R_{gm}	0.160	0.148	0.160
R_{gd}	0.065	0.077	0.065

유한 선형 열원 모델에서 설정되는 열교환기의 깊이는 30m이고 측정 지점은 보어홀의 축 효과를 고려하여 널리 사용되는 중간 지점인 15m를 사용하였다(Marcotte et al, 2010). 위에서 언급하였듯이 무한 원통형 열원 모델이 선형 모델들과는 다른 값을 나타내었다. 다음으로 1년, 10년, 30년에 따른 R_{ga}값의 변화가 표 3-2-5에 나타나 있다.

표 3-2-5 해석 모델의 장기(R_{ga}) 열 저항

	ILS	ICS	FLS
1년	0.000	0.087	0.087
10년	0.085	0.163	0.160
30년	0.122	0.200	0.182

단기 해석에 있어서는 대체적으로 무한 원통형 열원 모델과 유한 선형 열원 모델의 측정값이 비슷하게 나타났다. 하지만 30년 가량의 장기 해석에서는 무한 원통형 열원 모델의 값이 더 크게 측정되었으며 무한 선형 열원 모델의 경우 다른 두 모델에 비해 값이 매우 낮게 나타났다.

다음으로 표 3-2-6에 이를 이용한 설계 깊이가 나타나 있다.

표 3-2-6 각 해석 모델별 설계 깊이(m) 분석

	GLD	ILS	ICS	FLS
1년	3757	3392	3626	3405
10년	3917	3562	3794	3573
30년	3996	3654	3884	3662

두 선형 열원 모델들은 1% 미만의 매우 미미한 차이를 보였으며 GLD의 결과와는 10% 정도의 차이를 보였다. 하지만 무한 원통형 열원 모델의 경우 GLD와의 차이는 3% 미만으로 비교적 정확한 결과를 보여주었다. 이는 선형 모델들의 낮은 단기 열 저항값에 관련된 결과로 단기적인 예측에 있어 두 모델들은 열 저항을 다소 과소평가한다는 것을 알 수 있다. 따라서 선형 열교환기의 설계에서는 무한 원통형 열원 모델을 사용하는 것이 적합하다고 할 수 있다.

(5) 속이 찬 원통형 열원 모델 (Solid cylindrical source model)

Man et al(2010)이 제안한 모델로 코일형 교환기를 해석하기 위해 만들어졌으며 열교환기를 속이 꽉 찬 원통으로 모델링하였다. 특수한 미분방정식 중 하나인 Green's function에서 유도되었고 지반 아래에만 설치되는 지중 열교환기의 특성에 따라 method of images(Carslaw and Jaeger, 1958, Eskilson, 1987)기법을 적용하였다. 무한과 유한으로 나누어 1차원, 2차원 모델을 제안하였는데, 그 중 유한한 모델의 해석해는 다음과 같다.

$$T(r,t)-T_0=\frac{Q/L}{\rho c}\int_0^t\int_0^h\frac{1}{8\left[\sqrt{\pi\alpha(t-t')}\right]^3}I_0\left[\frac{rr_0}{2\alpha(t-t')}\right]\cdots$$
$$\cdot\left\{\exp\left[-\frac{r^2+r_0^2+(z'-z)^2}{4\alpha(t-t')}\right]-\exp\left[-\frac{r^2+r_0^2+(z'+z)^2}{4\alpha(t-t')}\right]\right\}dz'dt' \quad (2.2.23)$$

여기서 r_0는 원통의 반경으로 코일의 반지름을 대입할 수 있다. 열교환기가 높이 h_1부터 h_2까지 매설되어 있다고 할 때, 식 (2.2.23)은 최종적으로 다음과 같이 정리된다.

$$T(r,t)-T_0=\frac{Q/L}{8\pi\lambda}\int_0^t\frac{dt'}{(t-t')}I_0\left[\frac{rr_0}{2\alpha(t-t')}\right]\cdot\exp\left[-\frac{r^2+r_0^2}{4\alpha(t-t')}\right]\cdots$$
$$\cdot\left\{erfc\left[\frac{z-h_2}{2\sqrt{\alpha(t-t')}}\right]-erfc\left[\frac{z-h_1}{2\sqrt{\alpha(t-t')}}\right]+erfc\left[\frac{z+h_2}{2\sqrt{\alpha(t-t')}}\right]-erfc\left[\frac{z+h_1}{2\sqrt{\alpha(t-t')}}\right]\right\} \quad (2.2.24)$$

여기서 I_0함수는 0차의 수정 베셀 함수이고, erfc함수는 오차함수로서 erfc(x)는 $\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x e^{-u^2}du$를 의미한다. 이 모델에 있어서의 지중 열 저항도 마찬가지로 식 (2.2.24)에서 Q/L을 나눠 구할 수 있다.

(6) 나선형 코일 열원 모델 (Spiral coil source model)

다른 해석 모델과 달리 코일형 교환기를 형태 그대로 모델링한 해석해(박스칸, 2012)로서, 이 모델은 깊이를 고려하는 3차원의 해석 모델이며, 모델을 만족시키기 위해서는 지반이 균질한 무한 매질이고, 균일한 초기 온도를 가지며, 지표면 지점은 일정한 온도를 유지하고, 열교환율이 초기 시간부터 일정하다는 가정 사항이 필요하다. 속이 찬 원통형 열원 모델과 마찬가지로 Green's function에서 유도되었으며 유한 선형 열원 모델에 코일의 형상을 구현한 형태를 가진다. 그림 3-2-9에 모델링하는 코일형 열교환기의 형상이 나타나 있다. 또한 시간 t일 때 코일 중심으로부터의 임의의 위치 u에서 온도변화에 대한 해석해는 식 (2.2.25)와 같다.

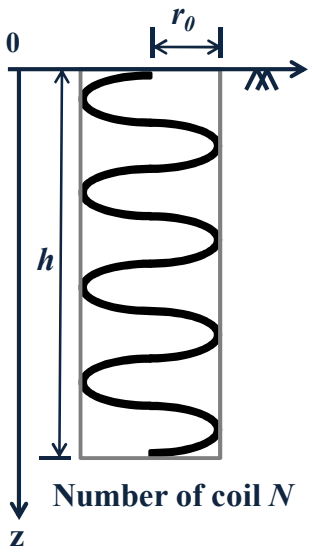


그림 3-2-9 코일형 열교환기의 형상(박스칸, 2012)

$$\theta(u,t) = \frac{q_l}{(4\pi\alpha)^{3/2}\rho c}\int_0^t \frac{1}{(t-t_0)^{3/2}}\int_0^h e^{-\frac{F(x,y,z')}{4\alpha(t-t')}} \times (e^{-\frac{(z-z')^2}{4\alpha(t-t')}} - e^{-\frac{(z+z')^2}{4\alpha(t-t')}})dz'dt'$$
$$= \frac{q_l}{4\pi\lambda}\int_0^h \frac{erfc(A_-(u,z')/2\sqrt{\alpha t})}{A_-(u,z')} - \frac{erfc(A_+(u,z')/2\sqrt{\alpha t})}{A_+(u,z')}dz' \quad (2.2.25)$$

또한 $A_{\pm}(u,z^{'})$는 다음과 같다.

$$A_{\pm}(u,z') = \sqrt{F(x,y,z') + (z \pm z')^2} \quad (2.2.26)$$

$$F(x,y,z') = x^2 + y^2 + r_0^2 - 2xr_0\cos(\omega z') - 2yr_0\sin(\omega z') \quad (2.2.27)$$

나선형 코일 열원 모델은 일반적인 선형 모델들의 과소 예측과 속이 찬 원통형 모델의 과대 예측의 중간에 위치하여 코일형 교환기를 정확하게 모델링할 수 있는 것으로 알려져 있다(박스칸, 2012; 전력연구원, 2013). 또한 유한한 모델로 에너지 파일도 비교적 정확하게 구현할 수 있기 때문에 이 모델은 코일형 열교환기의 지중 열 저항을 산정하는데 적합하다고 할 수 있다.

다. 기타 설계 모듈

지금까지 보어홀 열저항, 지중 열저항 등 설계에 가장 큰 영향을 미치는 변수들을 산정할 수 있는 방법들을 설명하였다. 지금부터는 설계에 고려될 수 있는 부수적인 효과들을 설명한다. 이는 보어홀 사이의 열 간섭 효과, 히트 펌프 설정, 다층 지반 고려 등이 있다.

(1) 열 간섭 효과 (Thermal interference effect)

거의 모든 경우의 지열시스템 설계에서, 단일로 지중열 교환기가 설치되는 경우는 거의 없다고 할 수 있다. 보어홀의 개수와 간격에 따라 보어홀 사이사이의 열 간섭 효과가 발생하게 되고, 이에 따라 지열시스템의 효율은 좋아질 수도, 나빠질 수도 있게 된다. 그림 3-2-10에 예시로 제시된 3*3의 보어홀 배치가 나타나 있다.

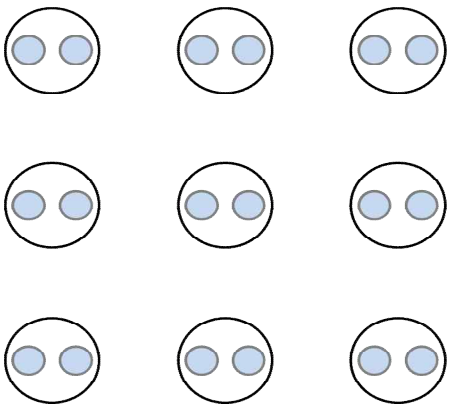


그림 3-2-10 3x3의 보어홀 배치

그림의 9개의 보어홀 중 가운데에 위치한 보어홀에서 방출 또는 흡수되는 열은 위, 아래, 왼쪽, 오른쪽에 있는 보어홀들에 의해 막히거나 충분히 흡수되지 못하게 된다. Kavanaugh and Rafferty(1997)는 이와 같이 보어홀 사이에 쌓이는 축열을 계산하여 열 간섭 효과를 반영하였는데, 식 (2.1.2)와 (2.1.3)의 T_p라는 변수를 통해 열 간섭 효과가 고려된다. T_p는 보어홀이 배치된 면적 내의 평균적인 'temperature penalty'로서 지반의 평균적인 온도 변화를 반영하는 보정계수이다. 예를 들어 연간 부하에서 난방 부하보다 냉방 부하가 우세한 경우, 장기 운용에 따라 지반에 열이 축적되어 온도가 상승하게 되어 냉방효율은 점점 감소하고, 난방효율은 점점 증가하게 된다. 이럴 때 T_p는 지반 온도와는 반대로 음의 값을 가지게 되어 냉방에 소요되는 지중 열교환기의 깊이를 좀 더 길게 설정하게 되고, 반대로 난방에 소요되는 깊이를 조금 더 감소시키게 보정한다. 난방 부하가 우세할 경우 그의 반대로 T_p는 양의 값을 가지게 된다. 그림 3-2-11에 보어홀 사이사이에 원통형으로 쌓이는 축열이 도시되어 있다. 각 원통의 축열은 원통의 질량과 비열, 원통 내 중심점에서의 온도변화를 곱한 값으로 산정할 수 있는데, 이 온도변화의 항에 지중 열교환기의 종류에 따라 다른 해석 모델을 이용할 수 있다.

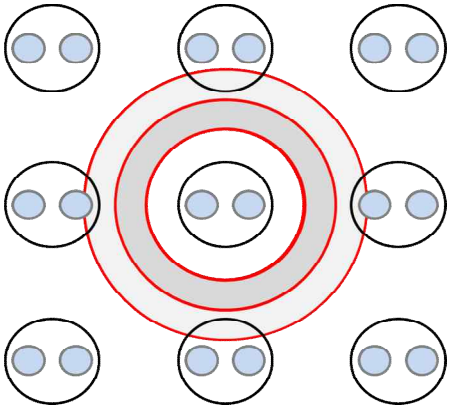


그림 3-2-11 열 간섭으로 인해 쌓이는 축열

각 원통형 공간에 쌓이는 축열에 대한 식이 식 (2.2.28)에 나타나 있다.

$$Q_{stored} = \rho C_p L \pi [(r_o)^2 - (r_i)^2] \triangle t \tag{2.2.28}$$

여기서 L은 T_p가 -1.7℃일 때의 지중 열교환기 요구 깊이, r_o와 r_i는 각각 원통의 외경과 내경, $\triangle t$는 해석 모델에 따른 온도변화를 의미한다. 초기 T_p값은 Kavanaugh가 가정한 초기 추정치로 이를 통해 계산한 L을 이용하여 다시 최종적인 요구 깊이를 구할 수 있다. 그림 3-2-11의 가운데 보어홀처럼 동서남북 4방향 모두에 다른 보어홀이 위치한 경우의 온도변화는 식 (2.2.29)을 사용한다.

$$T_{p1} = \frac{Q_{stored}}{\rho C_p (d_{sep})^2 L} \tag{2.2.29}$$

여기서 d_{sep}은 보어홀 중심 간의 간격을 의미한다. 하지만 실제 설계에서는 모든 보어홀이 동서남북 4방향 모두에 다른 보어홀이 있는 것이 아니라 배치에 따라서 모서리에 위치한 보어홀이나, 일렬로 된 보어홀 배치의 경우에 주위에 3개, 2개 또는 1개의 보어홀이 위치하고 있을 수도 있다. 이를 반영하기 위하여 PF(Partial Factor)를 사용하는데, PF와 최종적인 T_p는 식 (2.2.30)과 같다.

$$PF = \frac{N_4 + 0.5N_3 + 0.25N_2 + 0.1N_1}{Total\ Number\ of\ Boreholes} \tag{2.2.30}$$

$$T_p = PF \times T_{p1}$$

여기서 Total number of boreholes는 보어홀의 총 개수를, N_4, N_3, N_2 및 N_1은 각각 주위에 4개, 3개, 2개, 1개의 보어홀이 위치한 보어홀의 개수이다. 예를 들어 그림 3-2-11처럼 3*3의 배열을 가진 보어홀들에서의 N_4는 1, N_3과 N_2는 4가 되어 PF는 0.444가 된다. T_p는 T_{pl}에 이 PF를 곱하여 구해지는 보어홀 주변 지반의 평균적인 온도 상승 또는 하강치이다.

이와 같이 T_p의 계산에 있어서도 앞서 언급했던 여러가지 해석해가 사용되게 되는데, 특히 지하수 흐름 등 물의 유동은 열 간섭 효과에 있어 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 이를 고려한 정확한 해석해의 사용이 요구된다.

(2) 히트펌프 메커니즘

히트펌프는 응축기, 증발기, 4 방 밸브 등의 작동 메커니즘에 따라 냉·난방 모두의 경우에 이용할 수 있으며 열을 한곳에서 다른 곳으로 효율적으로 이동시킬 수 있어 에너지 효율성이 크고 친환경적인 장비이다. 국내 히트펌프 성적서에서는 정해진 펌프 유량에 있어서의 냉·난방 능력(Capacity)과 소비전력(Power)을 EWT 에 따라 제시하고 있다. EWT 는 펌프 계수를 결정하는 데 있어서 가장 중요한 변수로 각각의 EWT 에 따라서, Capacity 와 Power 는 식 (2.2.31)과 같은 2 차 다항식에 따라 나타나게 된다.

$$y = a + bx + cx^2 \tag{2.2.31}$$

여기서 x는 EWT 를 나타내고, y는 냉·난방 능력 또는 소비전력을 나타내게 된다. a, b 및 c는 미지수로 냉·난방 능력 또는 소비전력에 대한 최소 3 개의 데이터를 가지고 보간법을 통해 구할 수 있다. 또한 히트펌프의 성능계수인 COP(Coefficient of performance)는 주어진 소비전력 대비 냉·난방 능력으로 구할 수 있다.

$$COP = \frac{Capacity}{Power} \tag{2.2.32}$$

지열 시스템에서는 히트펌프의 냉·난방 능력 값이 피크 부하를 수용할 수 있어야 하는데, 냉방 쪽의 피크 부하가 더 크다면 냉방 부하에, 난방 쪽의 피크 부하가 더 크다면 난방 부하에 냉·난방 능력 값을 맞춰 준다. 또한 히트펌프의 1RT(3.5KW) 또는 1KW 당의 유량에 따라 피크 부하를 수용할 수 있는 유량을 구할 수 있다. 이에 따라 정해진 EWT 와 피크 부하에 따른 히트 펌프의 LWT(Leaving water temperature)를 구할 수 있는데, EWT 와 LWT 의 온도차 $\triangle t$는 식 (2.2.34)와 같다.

$$Q = \dot{m} c \triangle t \tag{2.2.33}$$

$$\triangle t = \frac{Q}{\dot{m}c} = \frac{qlc*(\frac{COP_c+1}{COP_c})}{\dot{m}c} \ (\text{for } Cooling) \qquad (2.2.34)$$
$$= \frac{qlh*(\frac{COP_h-1}{COP_h})}{\dot{m}c} \ (\text{for } Heating)$$

식 (2.2.33)은 열량에 관한 기본적인 식으로 $\dot{m}$은 지열시스템 내 순환수의 유량, c는 비열을 의미하며, 식 (2.2.34)의 qlc와 qlh는 각각 냉·난방의 피크 부하를 의미한다. 냉방의 경우 식 (2.1.2)와 같이 피크부하에 $\frac{COP_c+1}{COP_c}$이 곱해지고, 난방의 경우 식 (2.1.3)과 같이 $\frac{COP_h-1}{COP_h}$를 곱하여 계산한다. 이를 통해 주어진 EWT 하에서 피크 부하를 감당할 수 있는 히트펌프의 냉·난방 능력과 요구 전력 및 LWT 를 결정할 수 있다.

(3) 다층지반 (Multi-layered ground)

설계에 이용되는 지반의 열전도도는 주로 열 응답 시험을 통해 산정되지만, 지반 조사를 통한 지층 분석으로도 구할 수 있다. 예를 들어 그림 3-2-12와 같은 2층 지반의 경우 각 지반의 열전도도를 측정할 수 있다면 식 (2.2.35)와 같이 지반의 증가 열전도도를 구할 수 있는데, Yoon et al(2014)은 이를 수평 방향의 열전도 조건으로 가정하여 선형 열원 모델에 근거한 식을 유도하였다.

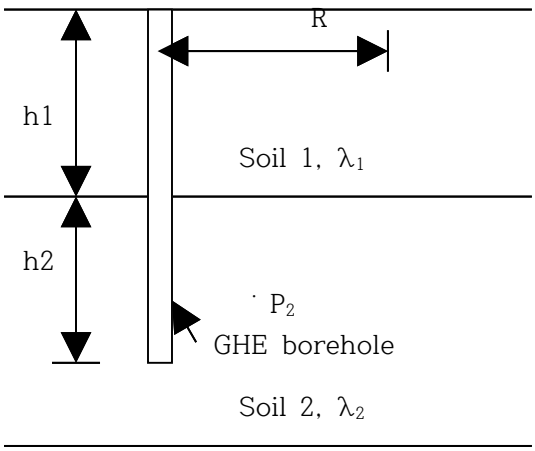


그림 3-2-12 2층 지반과 지중 열교환기 (Yoon et al, 2014)

$$\lambda_{eq} = \frac{(h_1\lambda_1 + h_2\lambda_2)}{(h_1 + h_2)} \tag{2.2.35}$$

이는 실증실험과 수치해석 모델을 통해 검증되었으며, 이 개념은 보어홀 열 저항을 산정할 때도 사용될 수 있는데, 에너지 파일을 해석할 때 채움재와 파일의 열전도도를 등가로 환산하여 수직 밀폐형 열교환기와 같은 방법으로 구할 수 있다. 이때는 수평 방향의 열전도가 아닌 수직 방향의 열전도로 식 (2.2.36)과 같이 산정될 수 있다.

$$\lambda_{eq} = \frac{(r_{grout} + r_{pile})}{r_{grout} / \lambda_{grout} + r_{pile} / \lambda_{pile}} \tag{2.2.36}$$

여기서 r_{grout}와 r_{pile}은 각각 보어홀 내의 채움재와 파일 부분의 두께(반경)를 나타낸다. 식 (2.2.36)은 설계에서 에너지 파일의 보어홀 열 저항을 구할 때 사용될 수 있다.

라. 에너지 파일의 열 저항 모델

(1) 라인형 열교환기의 열 저항 모델

본 연구에서 개발 중인 지열 설계 프로그램의 가장 큰 특징은 에너지 파일의 열전달 거동을 모사할 수 있다는데 있다. 에너지 파일을 이용한 지열시스템 설계 역시 지반의 열전도도와 보어홀의 열 저항 값이 중요한 인자라고 할 수 있다. 에너지 파일의 경우 열전달 매개체에서 파일 요소가 추가되었기에 보어홀의 열 저항 값은 식 (2.2.37)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_b = R_{cond} + R_{conv} + R_{grout} + R_{pile} \tag{2.2.37}$$

Yoon *et al.* (2014)은 그림 3-2-13 과 같이 PHC 에너지 파일 내에 W 자형 열교환기를 설치 후 현장 열 응답 실험을 실시하였다. 에너지 파일에서의 그라우트의 열전도도는 파일 중심으로부터 그라우트와 파일에 대한 등가 열전도도로 환산할 수 있으며 식 (2.2.38)과 같이 나타낼 수 있다.

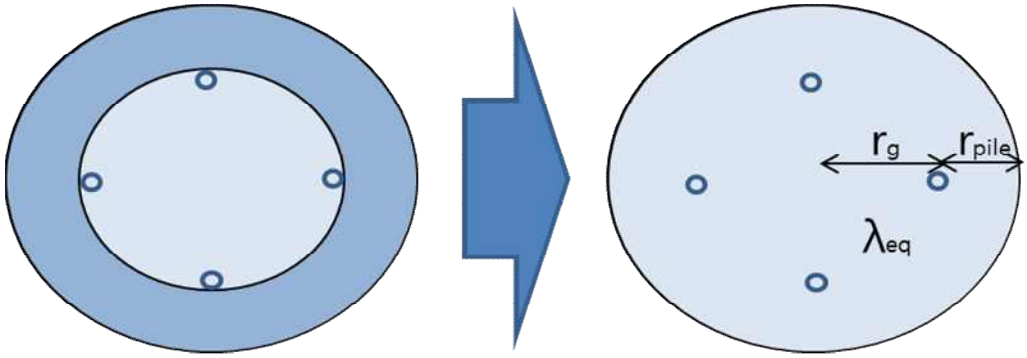


그림 3-2-13 에너지 파일의 보어홀 단면적

$$\lambda_{eq} = \frac{(r_g + r_{pile})}{r_g / \lambda_g + r_{pile} / \lambda_{pile}} \tag{2.2.38}$$

여기서 r_g 는 그라우트의 반경이며 r_{pile} 은 파일의 두께를 뜻한다. 위의 등가환산식의 적합성을 검증하기 위하여 Yoon *et al.*(2014)이 수행하였던 현장 열응답 실험 데이터를 이용하여 보어홀의 열저항 값을 산출하였다. 우선 현장 열응답 실험의 지중 유입수 온도를 CFD (computational fluid dyanmics) 수치해석 모듈에 대입을 하여 지중 유출수 온도 값을 도출하였으며 이를 실험값과 비교하여 수치해석 모듈의 적합성을 검증하였으며 이로부터 보어홀 벽면의 온도를 도출하여 보어홀의 열저항 값을 계산하였다.

절점 기반 대류성 경계조건을 실제 3 차원 파이프 형상에 대해 적용하기 위하여 CFD 기반의 3 차원 유한요소모델 해석 프로그램인 COMSOL Multiphysics (Verson 4.3)을 이용하여 열교환기 형상 및 배치에 따른 에너지파일의 열적 거동을 해석하였다. 대류와 전도에 의한 수치 모델의 지배 방정식은 식 (2.2.39)와 같다.

$$\rho A c u \nabla T = \nabla \cdot A\lambda \nabla T + f_D \frac{\rho}{2d_h} |u|^3 + Q + Q_{wall} \tag{2.2.39}$$

여기서, Q 는 일반적인 열원을 나타내며, Q_{wall}은 파이프 벽면을 통한 열 교환에 의해서 생기는 열원을 나타낸다. $f_D \frac{\rho}{2d_h} |u|^3$ 항은 점성에 의한 열손실에 해당한다. d_h는 수리역학적 평균 지름이며 d_h=4A/Z 로 나타낼 수 있다(A 는 파이프 단면적, Z 는 윤변). 또한 f_D(무차원)는 Darcy 의 마찰계수, u 는 접선속도를 나타낸다.

열응답 실험 시뮬레이션을 위한 유한요소모델은 그림 3-2-14 과 같다. 유한요소모델은 10(가로)×10(세로)×16m(높이) 크기를 갖고 있으며 그림 3-2-14 에는 2(가로)×2(세로)m 부분만 나타내었다. 해석 모델은 그라우트와 PHC 파일, 그리고 지반으로 구성되어 있으며 6 절점 및 8 절점 열전달요소(DC3D6 및 DC3D8)가 적용되었다. COMSOL 을 이용한

코일형의 경우 Free tetrahedral 격자망이 사용되었으며 최대 요소 크기는 0.590 m, 최소 요소 크기는 0.025 m 이다. 반면, 열교환기 벽면의 격자요소 형성은 직접 격자망을 구성하지 않고 COMSOL Pipe 모듈에 내장된 wall layer 기능을 이용하였다. 지반은 지하수위 위치에 따라 건조-포화 영역으로 나뉘었으며 파이프 주변의 큰 온도 구배를 고려하여 주변 영역의 요소를 조밀하게 분할하였다. 말뚝을 둘러쌓고 있는 지반(2m×2m×15m)은 지하수위를 기준으로 불포화층(Layer 1)과 포화층(Layer 2)으로 나누어져 있으며 말뚝 하반부는 암반층(Layer 3)으로 구성되어진다. 그림 3-2-14 에서의 수치해석에 사용된 열물성치는 표 3-2-7 과 같다. Layer 1 은 지하수위 위의 건조시료를 나타내며 현장의 시료를 채취하여 Hukseflux 사의 비정상 탐침(non-steady state probe) 장비인 TP-08 을 이용하여 열전도도를 측정하였다. 또한 Layer 2 는 지하수위 아래로써 열전도도는 Park *et al.*(2012)이 제안한 현장 함수비와 단위중량에 따른 화강풍화토의 열전도도식을 이용하여 도출하였다. 시멘트 그라우트, PHC 파일, PB 파이프 그리고 순환수의 물성값은 관련 문헌을 참고하였다(Jeong *et al.*, 2010). 여기서 시멘트 그라우트의 열전도도는 시멘트 배합조건에 따라 달라질 것으로 판단되나 본 연구에서는 시멘트 양생 후의 열전도도를 측정하지 못하여 Jeong *et al.*(2010)의 값을 참고하였다.

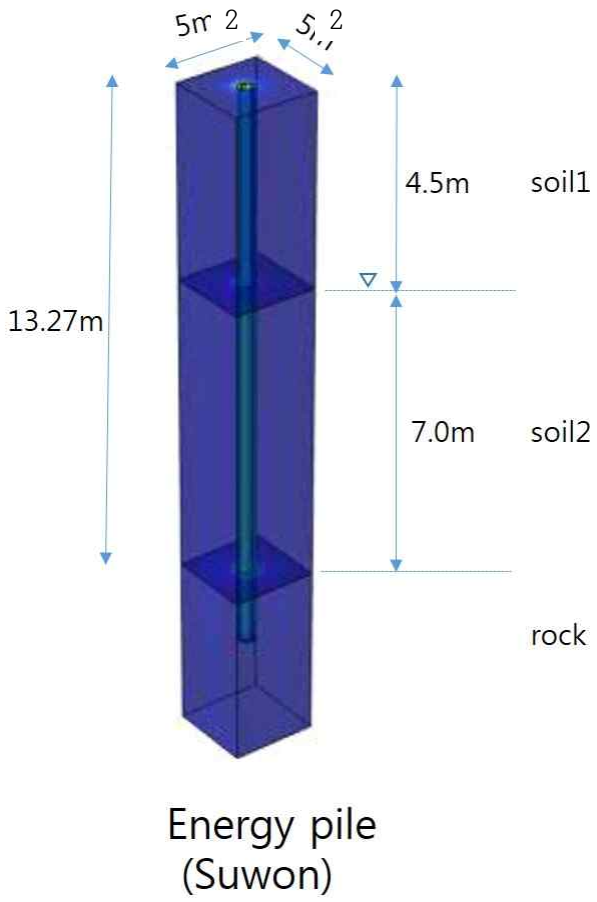
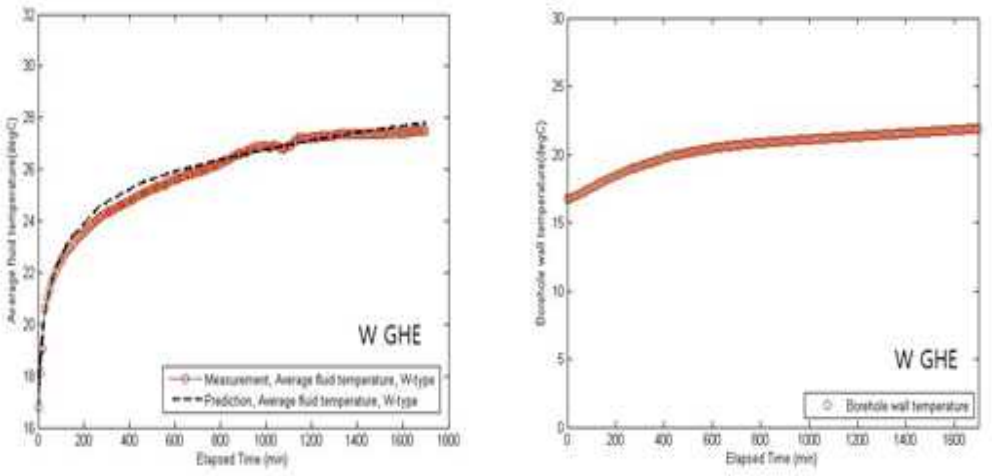


그림 3-2-14 열응답시험 시뮬레이션을 위한 유한요소모델

표 3-2-7 시뮬레이션에 적용된 재료의 열물성

Material	Thermal conductivity (W/mK)	Specific heat (J/kgK)	Density (kg/m³)
Soil 1	1.10	1160	1800
Soil 2	2.40	1280	2140
Rock	3.24	823	2640
Cement grout	2.02	840	3640
PHC pile	1.62	790	2700
PB pipe	0.38	525	955



(a) 순환수 온도변화 (b) 보어홀 벽면 온도변화

그림 3-2-15 시간에 따른 온도변화

그림 3-2-15 는 열응답 시간에 따른 순환수 및 보어홀 벽면의 온도변화를 나타내고 있다. 그림 3-2-15.(a)에서와 같이 수치해석과 실험에 의한 온도변화는 거의 일치한 것으로 나타났기에 수치해석을 통한 보어홀 벽면온도의 변화도 실험에 의한 계측값과 동일할 것으로 판단된다. 그림 3-2-15(b)에 의해 산정된 보어홀 벽면 온도값을 이용한 보어홀 열저항값은 0.118 m·K/W 였다. 2 절 2 에서 소개된 SF, EQD, Multipole 에 의해 산정된 보어홀 열저항 값은 표 3-2-8 과 같다. 해석해를 통해 산정된 보어홀 열저항 산정시 그라우트의 열전도도 값은 식 (2.2.4)에 의해 산정된 값을 적용하였으며 열응답 실험 결과 Multipole 모델과 EQD 모델이 실험값과 보다 유사한 값을 나타내었으며 SF 모델은 보어홀 열저항 값을 과대평가한다는 것을 알 수 있었다.

표 3-2-8 보어홀 열저항 값

Borehole thermal resistance	Numerical analysis (based on TRT)	Multipole method	Series	
			SF	EQD
Energy pile	0.118	0.105	0.151	0.106

(2) 코일형 열교환기의 열 저항 모델

에너지 파일의 설계에 있어서 보어홀 열 저항은 가장 중요한 설계인자 중 하나라고 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 코일 형 에너지 파일의 경우, 보어홀 열 저항을 산정하는 것이 매우 어렵고, 지금까지 이를 산정하기 위한 연구사례도 없는 실정이다. 왜냐하면 앞 절에서 언급한 다양한 해석 모델들은 열교환기 형태가 라인일 경우에만 열 저항 산정이 가능하기 때문이다. Shonder and Beck, Gu and O'Neal, Remund, Bennet and Claesson, Hellstrom 등의 연구자들이 제시한 이론 모델들은 공통적으로 열원을 일정한 반경을 가지는 실린더 형태로 가정한 후, 정상 상태에서 열 저항값을 도출한다. 하지만 코일 형 열교환기의 경우 열원을 2차 평면상에 실린더 형태로 표현하기 불가능하기 때문에 기존의 이론모델로서는 코일 형 에너지 파일의 열 저항을 산정할 수 없다. 게다가 코일 형 열교환기의 열 확산 거동은 라인 형 열교환기보다 복잡하여, 코일의 3차원 형상을 고려해야만 한다. 따라서 지열 시공자들이 코일 형 열교환기 설계 시 해석 모델을 근간으로 한 기존 설계프로그램을 사용하는 것은 무리가 있다. 그러므로 본 연구에서는 코일 형 에너지 파일의 열저항 산출을 위한 새로운 모델을 제시하기 위해 다양한 매개변수 해석을 실시하였고 이를 분석하였다. 또한 코일 형 에너지 파일을 이용한 현장 실험 결과를 바탕으로 제시된 산정모델의 적합성을 검증하였다.

(가) 코일형 에너지 파일 유한요소 모델링

그림 3-2-16은 코일형 열교환기가 설치된 에너지파일의 열응답시험에 사용된 유한요소 모델을 보여주고 있다. 모델의 규격은 가로, 세로 높이가 각각 10, 10, 20 m이며, Free tetrahedral 격자를 사용하였다. 수치모델에 적용된 재료 물성치는 표 3-2-7의 문헌 값을 참조하였다. 열교환기 입구의 유체 온도는 실험 데이터를 근간으로 한 함수식을 통해 주입되었다(그림 3-2-17 참조).

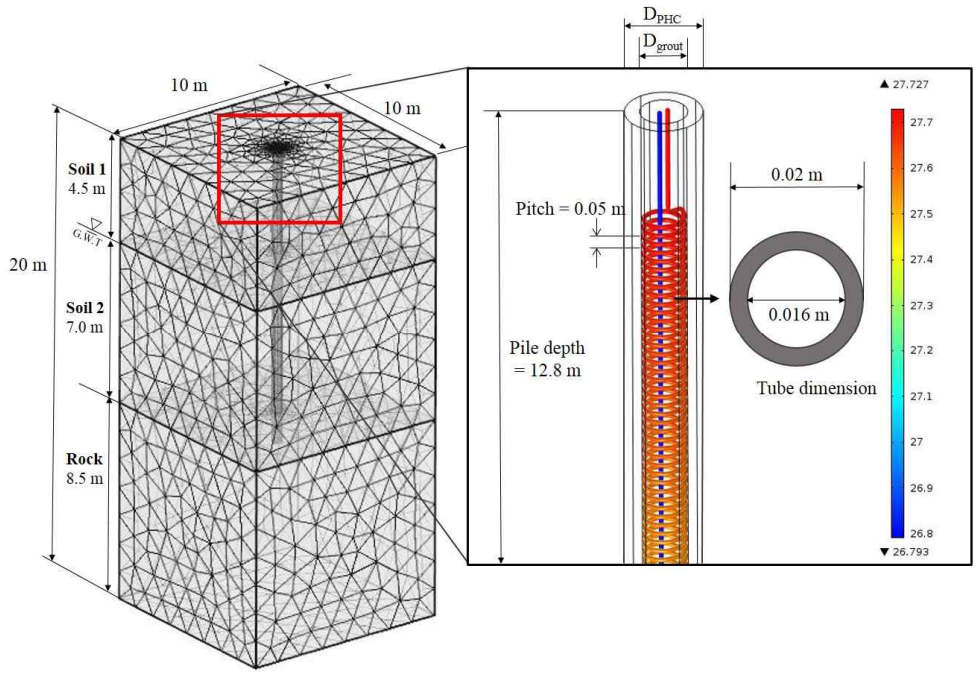


그림 3-2-16 코일형 에너지파일의 열응답시험을 위한 유한요소모델

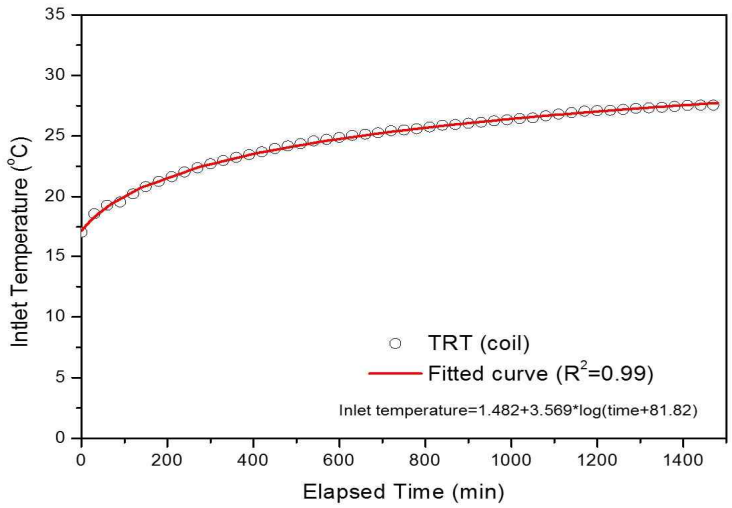


그림 3-2-17 측정된 주입 온도와 시뮬레이션에 적용된 회귀 식

(나) 현장실험 검증

본 연구에서는 수원시 인근 부지에서 PHC 파일을 이용한 현장 열응답 실험을 수행하였다. 에너지 파일은 PHC 파일 내부에 PB(Polybutylene) 소재의 파이프(외경/내경: 20 mm/16 mm)를 코일 형태로 결속한 후 내부에 시멘트 그라우트를 채운 형태로 구성되어 있으며 열교환기 배치 상태는 그림 3-2-18 과 같다. 코일형 열교환기의 양 끝에서의 피치 간격은 5 cm 정도로 유지되었으며, 열교환기는 시공 여건을 고려하여 PHC 파일 벽면에

설치하였으며 열교환기 입출구 부위에 전기식 센서인 RTD(Resistance Temperature Detector) 센서를 설치하였다. 실험지역에 대해 지반조사를 수행한 결과 풍화토와 풍화암으로 구성되어 있었다. 그 중 풍화토는 19/30~50/12 의 N 값을 가지고 추정할 때 중간내지 조밀한 상대밀도를 나타냈다. 본 현장의 지반은 실트 및 세립질과 조립질 모래로 분류되어 채취되었고 지하수위는 파일 두부에서 GL(-)4.5 m 심도에 위치하였다. 또한 GL(-)11.50 m 심도 이하에서는 풍화암이 출현하는 것으로 나타났다. 표 3-2-9 는 실험에 사용된 에너지 파일 및 지중 열교환기의 제원을 나타내며 그림 3-2-19 의 (a)~(e)는 열응답 실험 전 에너지 파일의 주요 시공과정을 보여주고 있다.

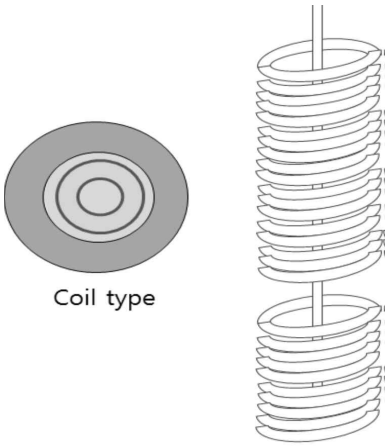


그림 3-2-18 열교환기 배치 및 형상



(a)보어홀 천공



(b)열교환기 설치



(c)시멘트 그라우팅



(d)그라우트 양생



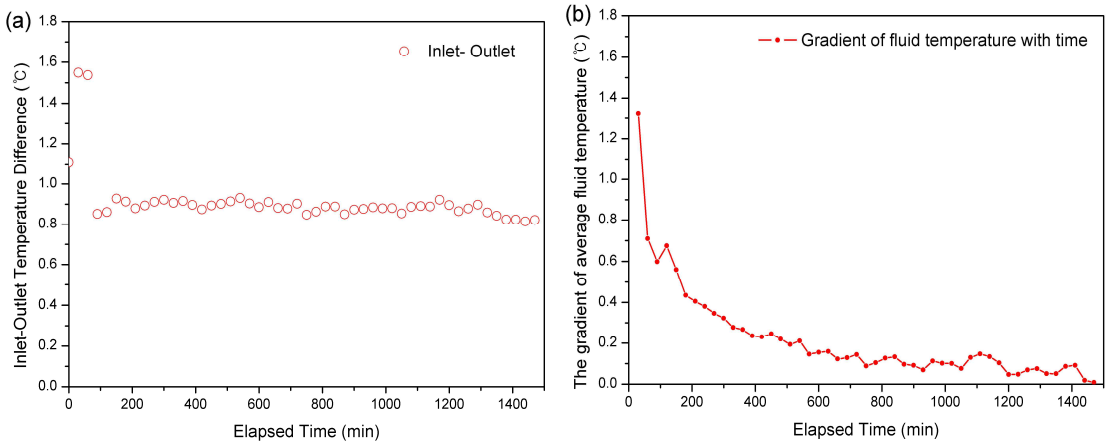
(e)열응답시험 준비

그림 3-2-19 코일형 열교환기 설치 과정

표 3-2-9 에너지파일의 제원

GHE	Coil type
Inner diameter of pile (mm)	245
Outer diameter of pile (mm)	400
Pile length (m)	12.8
Pipe length (m)	196
Type of grout	Cement

코일형 에너지파일에 대한 현장 열 응답 시험은 순환수 온도가 준정상상태(quasi-steady state)에 도달할 때까지 수행되었다. 일반적으로 열 응답 시험은 지반의 열전도도를 산정하기 위해 수행되지만, 본 연구에서는 코일형 에너지파일의 보어홀 열저항 산정을 위해 열응답시험 결과를 활용하였다. 초기 지반 온도는 16.5 °C 이었고, 총 25 시간동안 970 W 의 열량이 열교환기에 주입되었는데, 이는 순환수 온도가 25 시간 경과 후 준정상상태(quasi-steady state)에 도달하였기 때문이다. 그림 3-2-20 는 순환수 온도가 준정상상태(quasi-steady state)에 도달한 양상을 보여준다. 그림 3-2-17 과 같이 주입온도가 비정상상태의 거동을 보일지라도, 열교환기의 입출구 온도차는 200 분이 지나면 약 0.9 °C 로 일정한 값을 보인다(그림 3-2-20(a) 참조). 또한 그림 3-2-20(b)와 같이 10 분 간격 평균 순환수 온도 변화량도 시간이 지날수록 0 으로 수렴함을 확인할 수 있었다.

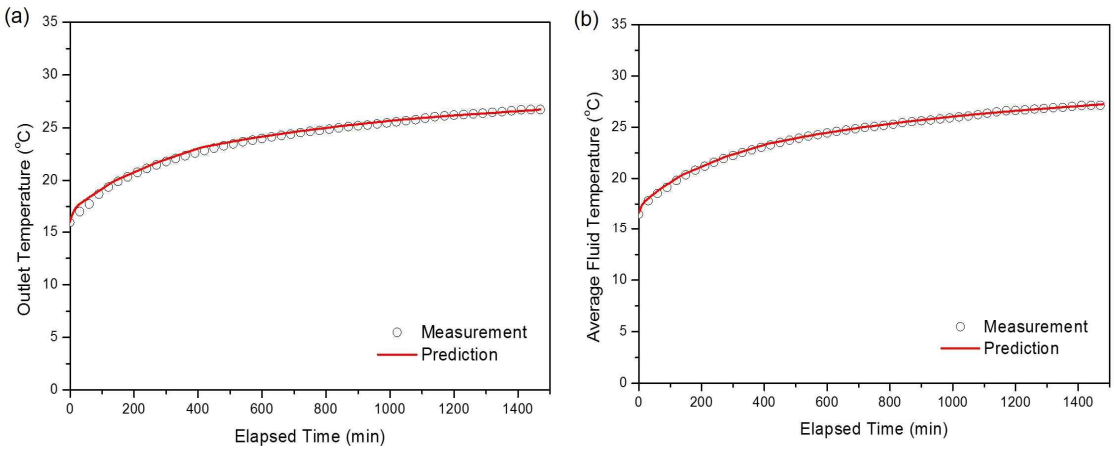


(a) 열교환기 입출구에서의 순환수 온도차이; (b) 10 분간격 평균 순환수 온도 변화 양상

그림 3-2-20 경과 시간에 따른 순환수 온도 결과

그림 3-2-21 은 실험 및 수치해석의 온도 변화 양상 비교를 보여주고 있다. 본 연구에서 개발된 수치해석 모델이 실험 결과를 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 유효 보어

홀 열저항 산정에 있어서 보어홀 벽면 온도 값은 핵심적인 요소이지만, 온도센서를 보어홀 벽면에 직접 설치하여 벽면온도를 계측하는 것은 비용적인 측면에서도 비경제적이며, 소량의 센서로 벽면 전체의 온도를 계측하는 것은 현실적으로 어려움이 있다. 하지만 수치해석의 경우, 보어홀 벽면에 그려지는 절점들의 온도를 평균하여 보어홀 벽면온도를 정확히 계산할 수 있다. 따라서 본 연구는 실험 결과를 모사하는 수치해석모델을 이용하여 에너지파일의 벽면온도를 간접적으로 계산하고자 하였으며, 그림 3-2-22 는 그 결과를 보여주고 있다. 그리고 최종적으로 코일형 에너지파일의 유효 보어홀 열 저항을 산출하였고, 그 값은 약 0.077 mKW^{-1} 로 산정되었다(그림 3-2-23).



(a) 출구에서의 순환수 온도 (b) 평균 순환수 온도

그림 3-2-21 실험 및 수치해석의 온도 변화 양상 비교

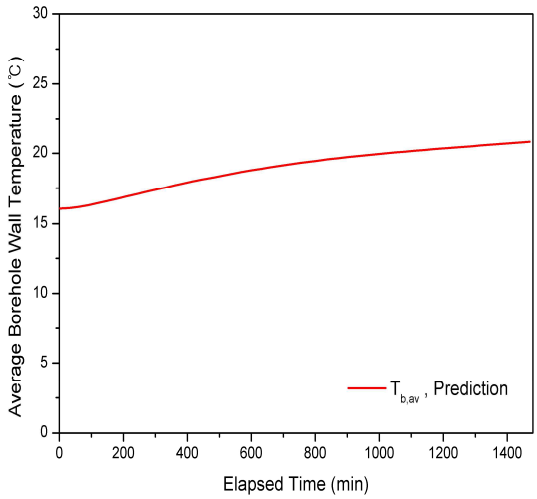


그림 3-2-22 보어홀 벽면 온도

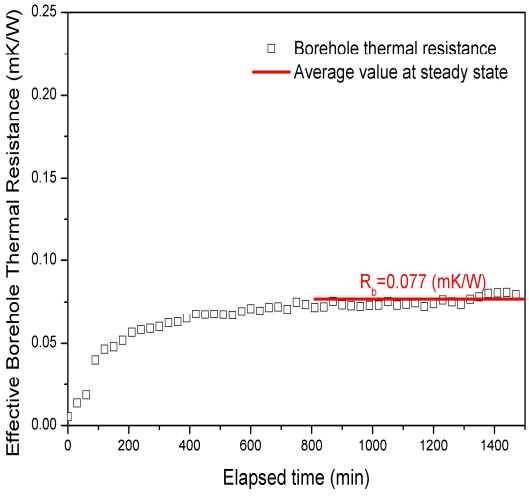
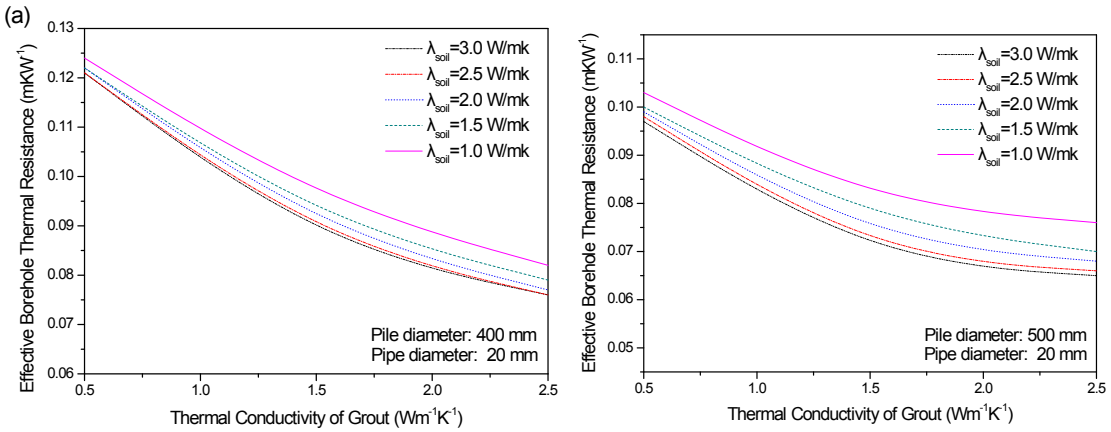


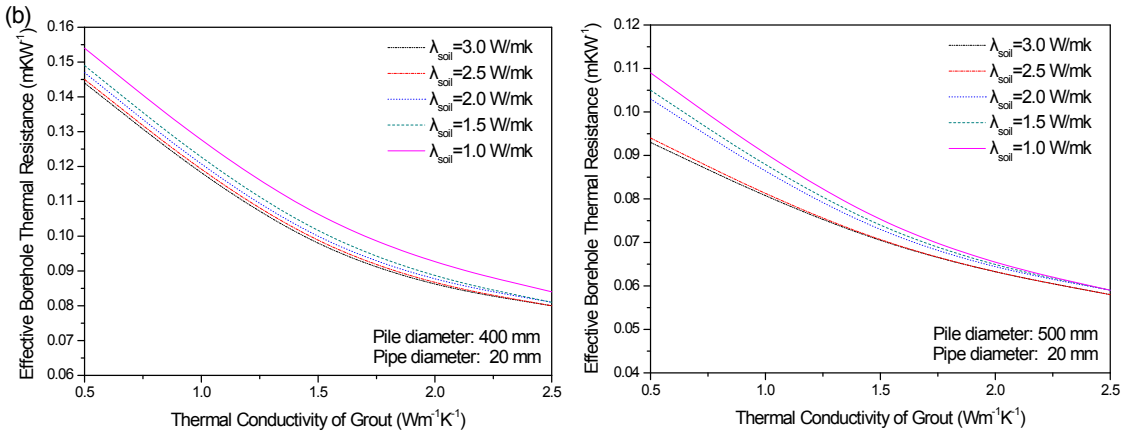
그림 3-2-23 에너지파일의 보어홀 열 저항

(다) 수치해석 매개변수 연구

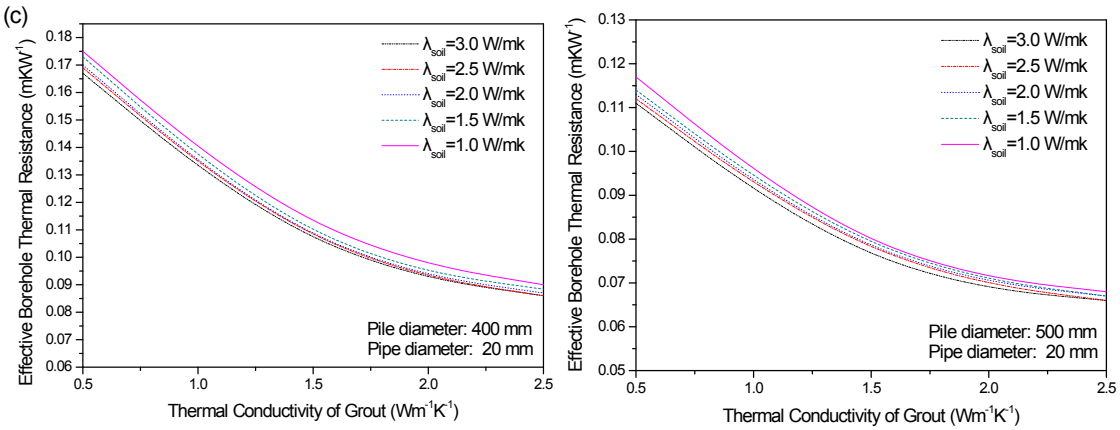
본 연구에서는 코일형 에너지파일 보어홀 열 저항 산정을 위한 매개변수 연구가 수행되었다. 고려된 매개변수는 에너지파일의 직경, 코일 피치, 그라우트의 열전도도, 지반의 열전도도이다. 요인분석 결과 열교환기 파이프의 직경은 그 영향도가 미미하여 매개변수로 선정되지 않았다. 일반적으로 PHC 파일로 가장 널리 사용되는 400 mm 및 500 mm를 채택하였으며, 코일 열교환기는 파일 벽면에 최대한 접촉하였다는 가정 아래 모델링이 되었고, 코일/파일 직경비는 약 0.55 에서 0.65 사이이다. 열교환기에 주입된 유량은 일반적으로 사용되는 값보다 큰 16 LPM 으로 설정되었는데, 이는 코일형 열교환기가 기존 실린더형 열교환기보다 더 많은 양정이 요구되기 때문이다. 초기 지반 온도는 16.5 °C 이며, 순환수 주입온도는 30 °C 로 일정하게 설정되었다. 이러한 경계조건으로 주요 영향 변수들을 변화시켜가며 5 일동안 열성능평가를 수행하였고, 약 200 개 이상의 에너지파일 보어홀 열저항 데이터베이스가 구축되었다. 그림 3-2-24(a)~(c)는 코일 피치, 파일직경, 그라우트 및 지반의 열전도도에 따른 유효 보어홀 열저항 변화 양상을 보여준다.



(a)코일피치=50mm



(b)코일피치=70mm



(c)코일피치=100mm

그림 3-2-24 유효 보어홀 열 저항 산정을 위한 매개변수연구 결과

(라) 다중선형 회귀분석 결과

코일 형 에너지 파일의 열 저항을 산정하는 다중 회귀식을 제안하기 위해 여러 가지 영향 인자들을 고려하여 표 3-2-10 와 같이 독립 변수들을 선정하였다. 변수들간의 대략적인 관계를 알아보기 위해 matrix plot 을 한 결과, 이상치(outlier)는 발견되지 않았지만, 독립변수 x3 와 x4 는 종속변수 y 와 비선형적(nonlinearity)인 관계가 있음을 확인하였다. 따라서 x3 와 x4 는 역수변환을 통해 선형성(linearity)을 가지도록 하였고, 변수변환이 이루어진 새로운 독립변수 X 를 가지고 다중선형회귀분석(Multiple Linear Regression Analysis)을 실시하였다(표 2.2.10). 일반적으로 중요한 독립변수가 빠져있을 경우 종속변수에 자기상관이 존재하게 되며, Durbin-Watson 지수가 $1.4 \le DW \le 2.6$ 을 만족하면 자기상관이 없이 독립이라고 판단하는데, 분석결과 Durbin-Watson 지수가 2.475 로서 종속변수의 자기상관은 없는 것으로 확인되었다. 독립변수들의 P value 는 0.05 보다 작게 나타나 X_1, X_2, X_3, X_4 모두 Y 에 유의한 영향을 주었다. 또한 각각의 독립변수들의 VIF 값이 10 이하로서 독립변수들 사이에 다중 공선성이 발견되지 않았으며, 이는 독립변수들간의 상관관계가 없다는 것을 보여준다. 분석 결과 X_1(B=-0.252)이 작을수록, 그리고 X_2(B=0.039), X_3(B=0.010), X_4(B=0.032)이 높을수록 Y 가 높아지는 것으로 나타났다. 이들 변수가 Y 를 설명하는 설명력의 정도는 90.5%이며 X_4(β=0.797)가 Y 에 가장 큰 영향을 주었고, X_3(β=0.086)가 Y 에 가장 미미한 영향을 주었다. 즉, 에너지파일의 유효 열 저항에 가장 큰 영향을 주는 인자는 그라우트의 열전도도이며, 그 다음으로는 말뚝의 크기, 코일 피치 간격, 토양의 열전도도 순으로 영향을 주었다. 일반적으로 데이터 수와 독립변수 수를 늘리면 자연적으로 결정계수(R^2)값이 증가하게 되는데, 이를 개선하기 위해서 다중회귀분석에서는 독립변수의 수와 데이터 수를 고려한 수정 결정계수(식 (2.2.40))를 사용하였다

$$_{adj}R^2 = 1-(1-R^2)\frac{n-1}{n-p-1} \tag{2.2.40}$$

여기서 n은 데이터 수, p는 독립변수의 수이다. 회귀분석 결과 나타난 수정 결정계수($_{adj}R^2$)는 0.905로서, 본 연구에서 제안한 회귀식이 데이터를 합리적으로 설명한다고 판단할 수 있다. 제안된 다중회귀식의 적용성을 검증하기 위해서 표 3-2-11과 같이 본 연구에서 수행된 두 가지 에너지파일에 대한 열응답실험(TRT) 및 PARAMETRIC 데이터베이스로부터 산출한 열 저항 값과 비교하였다. 회귀식은 대체적으로 높은 예측율을 보였으며, 코일형 에너지파일의 핵심적 설계인자인 보어홀 열 저항 결정에 있어서 적용성이 높을 것으로 사료된다.

표 3-2-10 다중 선형 회귀분석을 위해 선정된 독립변수 및 종속변수

x_1	x_2	x_3	x_4	
$\frac{\cdot c}{r_b}$	$\frac{\cdot\cdot\cdot\cdot}{r_c}$	$_{soil}$	$_{grout}$	$_{0,eff}$
$_1$ $_1$	$_2$ $_2$	$X_3 = \frac{}{x_3}$	$X_4 = \frac{}{x_4}$	$_2$
$\frac{c}{r_b}$	$\frac{\cdot\cdot\cdot\cdot}{r_c}$	$\overline{\lambda_{soil}}$	$\overline{\lambda_{grout}}$	$_{0,eff}$

r_c : coil radius, r_b : pile radius, r_b : pipe radius,
λ_{soil} : soil thermal conductivity, λ_{grout} : grout thermal conductivity,
x, X : independent variable, y, Y : dependent variable

표 3-2-11 다중 선형 회귀분석 결과

	B	β	*VIF*
constant	.181		
$_1$	-.252	-.350***	1.300
$_2$	.039	.261***	1.299
$_3$	.010	.086***	1.000
$_4$	.032	.797***	1.004
$_{adj}R^2$	.905		
F	226.158		

*** $p < 0.01$, *B* : non-standardized coefficient , β : standardized coefficient
VIF : variance inflation factor

표 3-2-12 다중 선형 회귀분석 결과

	열응답시험결과	매개변수연구결과	다중선형회귀분석 결과
유효 보어홀 열 저항 [mKW^{-1}]	0.077*	0.079*	0.080*

3. 지하수 흐름 반영

지하수 흐름은 지중의 열 유동에 큰 영향을 끼칠 수 있으며 설계에서는 지중 열 저항, 열 간섭 효과 등에 영향을 미칠 수 있다. 이는 지금까지 고려된 설계 변수들과는 달리 지반에 해당하는 고유 변수로서 정확한 설계를 위해 연구될 필요성이 있지만 이에 대한 설계 방법은 거의 제시되고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 지하수 흐름을 반영할 수 있는 지중 열교환기에 관한 해석해(Diao et al, 2004, Sutton et al, 2003, Molina-Giraldo et al, 2011, Zhang et al, 2013)들을 분석하였고 코일형 교환기에 적용할 수 있는 수정된 지하수 흐름 해석해를 제시하였다. 또한 Kavanaugh의 설계 방법에 이들을 결합하여 지하수 흐름에 따른 지중 열교환기의 요구깊이 변화를 분석하였다.

가. 지하수 흐름을 고려할 수 있는 주요 해석 모델

(1) 이동 무한 선형 열원 모델(Moving infinite line source model)

Diao et al(2004)이 제시하였으며 일반적인 무한 선형 열원 모델에 지하수 흐름을 고려한 해석 모델이다. 포화된 지반에 작용하는 열은 열전도뿐만이 아닌 지하수 흐름에 의한 대류에도 영향을 받을 수 있으며 Darcy의 법칙과 에너지 보존 법칙에 의하여 전개된 포화된 지반 안의 열 전달은 식 (2.3.1)과 같다.

$$\rho c\frac{\partial t}{\partial \tau}+\rho_w c_w \overrightarrow{V}\bullet \ \triangle t=\nabla \ \bullet \ (\lambda \nabla t) \tag{2.3.1}$$

여기서 ∂t는 온도변화, $\partial \tau$는 시간의 변화를 나타내고 ρc는 지반의 용적 비열, $\rho_w c_w$는 지하수의 용적 비열을 의미하며 $\overrightarrow{V}$는 지하수의 속도를 나타내고 이는 Darcy의 법칙을 이용하여 산정할 수 있다. 여기서 지하수의 흐름 속도를 +x 방향으로 가정하고 양변에 ρc를 나누면 식 (2.3.1)은 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{\partial t}{\partial \tau}+U\frac{\partial t}{\partial x}=\alpha \nabla^2 t \tag{2.3.2}$$

여기서 U는 환산된 지하수의 속도로 $\frac{u\rho_w c_w}{\rho c}$를 의미하고, u는 +x 방향의 지하수 흐름 속도이다. 균질하고 반무한인 지반에서 일정한 초기 온도를 가지고 있고 보어홀의 깊이효과가 무시되었을 때, 즉 지하수 흐름이 지반 전체에 흐른다고 가정되어 2차원화 되는 가정 아래에서 식 (2.3.2)는 원래의 무한 선형 열원 모델식인 식 (2.2.19)의 x항과 결합되어 이동 무한 선형 열원 모델(Moving infinite line source model)이 되며, 그 식은 다음과 같다.

$$T(x,y,\tau)-T_0=\frac{Q/L}{4\pi\lambda}\int_0^{\tau}\frac{1}{\tau-\tau'}exp[\frac{x-U(\tau-\tau')^2+y^2}{4\alpha(\tau-\tau')}]d\tau' \tag{2.3.3}$$

적분과정 중 분모가 0이 되기 때문에 수치적분의 정확성을 높이기 위하여 $\eta=\frac{4\alpha(\tau-\tau')}{x^2+y^2}$으로 치환한 후 정리하면 최종적인 식은 다음과 같다.

$$T(x,y,\tau)-T_0=\frac{Q/L}{4\pi\lambda}exp(\frac{Ux}{2\alpha})\int_0^{\frac{x^2+y^2}{4\alpha\tau}}\frac{1}{\eta}exp[-\frac{1}{\eta}-\frac{U^2r^2\eta}{16\alpha^2}]d\eta \tag{2.3.4}$$

이 모델은 비록 지하수위를 고려하지 못하지만, 지중 열교환기가 100m~150m 이상의 심도까지 설치된다고 볼 때 지하수위 아래 부분의 비중이 훨씬 커 정상상태라고 볼 수 있으며 Eskilson(1987)의 열 전달 모델 등에서도 지하수위는 지반 전체에 일정하며 지반 표면과 평행하다고 가정하고 있다.

(2) 이동 유한 선형 열원 모델(Moving finite line source model)

Molina-Giraldo et al(2010)이 제시하였으며 먼저 기본적인 유한 선형 열원 모델은 역시 Green's function에서 유도되는 해석해로서 시간 t, 3차원 임의의 좌표(x',y',z')에서의 온도 변화는 식 (2.3.5)와 같다.

$$T(x,y,\mathrm{z},\mathrm{t})-T_0=\frac{Q/L}{8\rho c(\pi\alpha)^{1.5}}\exp\left[-\frac{(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2}{4\alpha(t-t')}\right] \tag{2.3.5}$$

여기에 식 (2.3.1)과 (2.3.2)에 나타낸 지하수 흐름에 관한 이론을 대입하면 지하수 흐름이 있을 때의 유한 선형 열원 모델의 해석해를 구할 수 있다.

$$T(x,y,z,t)-T_0=\frac{Q/L}{8\rho c(\pi\alpha)^{1.5}}\int_0^t\frac{1}{(t-t')^{3/2}}\exp\left[-\frac{\left[x-U(t-t')\right]^2+(y-y')^2+(z-z')^2}{4\alpha(t-t')}\right]dt' \quad (2.3..6)$$

여기서 역시 적분의 편의를 위해 $\psi=\frac{r}{2\sqrt{\alpha(t-t')}}$으로 치환한 후 정리하면 최종적인 식은 다음과 같다.

$$T(x,y,z,t)-T_0=\frac{Q/L}{2(\pi)^{1.5}\lambda r}\exp\left[\frac{Ux}{2\alpha}\right]\int_{\frac{r}{2\sqrt{\alpha t}}}^{\infty}\exp\left[-\psi^2-\frac{U^2r^2}{16\alpha^2\psi^2}\right]d\psi \quad (2.3.7)$$

식에서 r은 $\sqrt{x^2+y^2+(z-z')^2}$를 나타내며 온도변화의 측정값은 보통 보어홀의 축 효과를 고려하여 보어홀의 중간 깊이에 해당하는 값이(0.5H) 사용된다(Marcotte et al, 2010).

(3) 이동 속이 꽉찬 원통형 열원 모델 (Moving solid cylindrical souce model)

Zhang et al(2013)이 제안한 모델로 속이 꽉찬 원통형 열원 모델에 지하수 흐름의 원리를 대입한 모델이다. 지금까지 언급한 다른 해석 모델들과 원리가 같으며 그 식은 다음과 같다.

$$T(r,t)-T_0=\frac{Q/L}{16\pi^2\lambda}\int_0^{2\pi}d\varphi'\int_0^t\frac{dt'}{(t-t')}\cdot\exp\left[-\frac{\left[x-r_0\cos\varphi'-U(t-t')\right]^2+(y-r_0\sin\varphi')^2}{4\alpha(t-t')}\right]\cdots$$
$$\cdot\left\{erfc\left[\frac{z-h_2}{2\sqrt{\alpha(t-t')}}\right]-erfc\left[\frac{z-h_1}{2\sqrt{\alpha(t-t')}}\right]+erfc\left[\frac{z+h_2}{2\sqrt{\alpha(t-t')}}\right]-erfc\left[\frac{z+h_1}{2\sqrt{\alpha(t-t')}}\right]\right\} \quad (2.3.8)$$

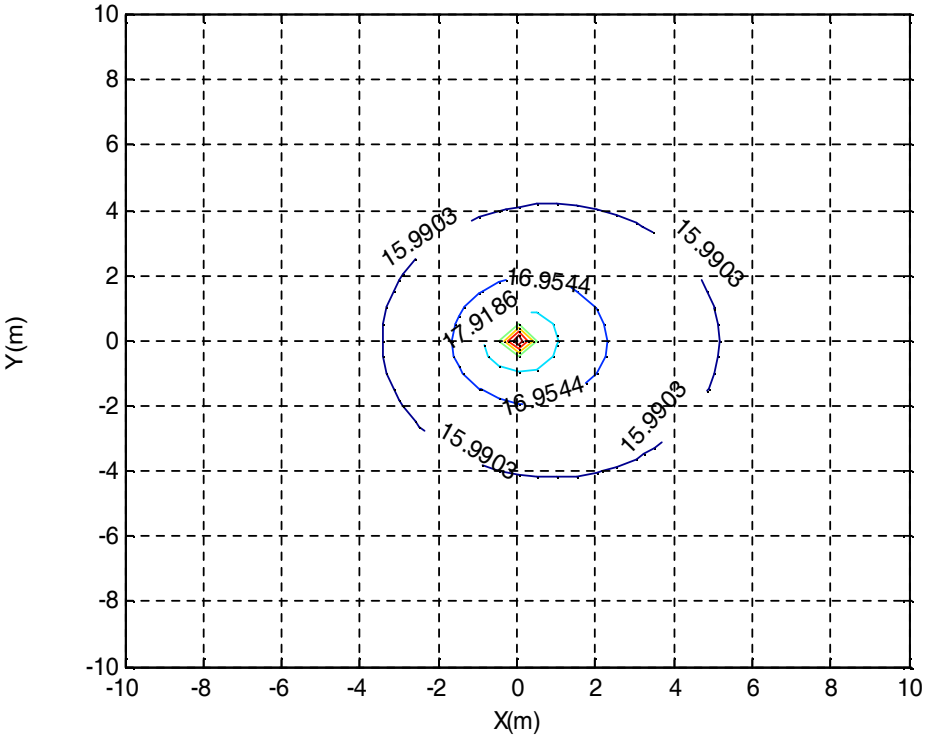
여기서 $r_0\cos\psi'$와 $r_0\sin\psi'$는 각각 x'와 y'로 측정하고자 하는 점의 좌표를 원통형 좌표로 나타내었다.

나. 지하수 흐름이 설계에 미치는 영향

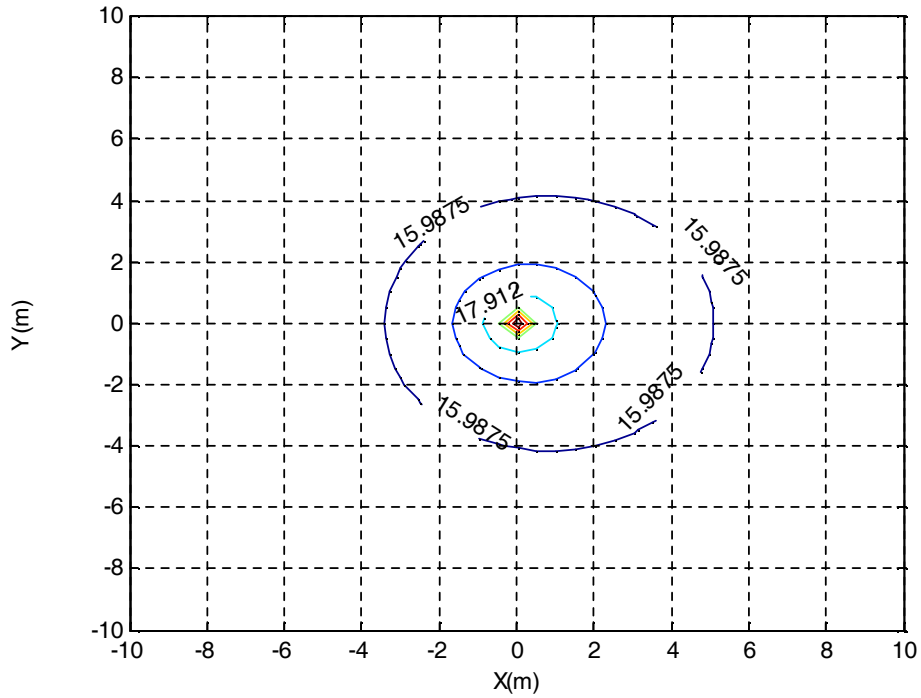
지하수 흐름은 그 속도에 따라 지반 내의 열 흐름에 지대한 영향을 끼칠 수 있다. 먼저 이동 무한 선형 열원 모델과 이동 유한 선형 열원 모델의 주요 지하수 흐름 속도에 대한 온도 변화와 그 해석에 사용된 지반 및 지하수의 주요 제원이 그림 3-2-25~3-2-28과 표 3-2-13에 나타나 있다.

표 3-2-13 해석에 사용된 지하수 및 지반 물성치

지하수 유속 및 방향	2, 50, 100, 200 (m/year), +x 방향	
초기 지반 온도	15	
주입 열량	20 W/m	
토양 물성치	열전도도 (W/mK)	2.31
	밀도 (kg/m^3)	2352.14
	비열 (J/(K*kg)	1060.93
해석시간	1년	

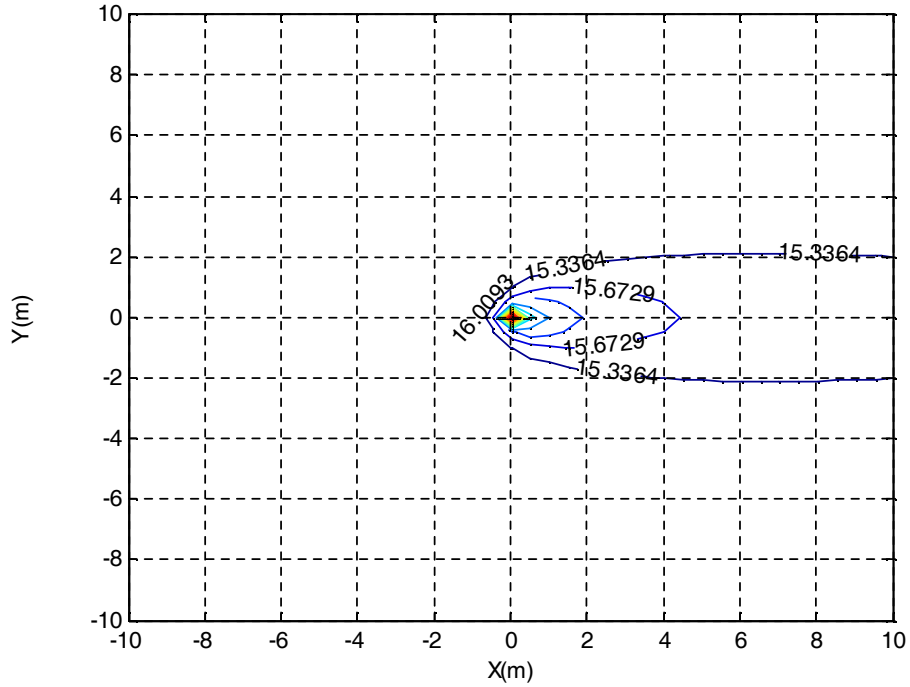


(a) Moving infinite line source model

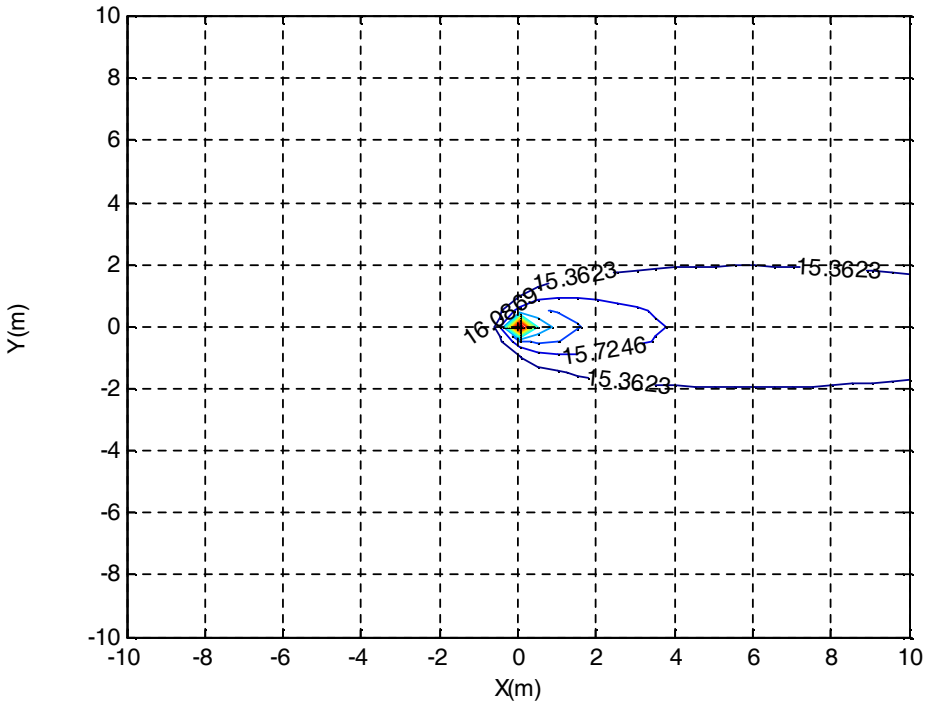


(b) Moving finite line source model

그림 3-2-25 해석모델에 따른 열원 주위 온도 변화 (2 m/year)

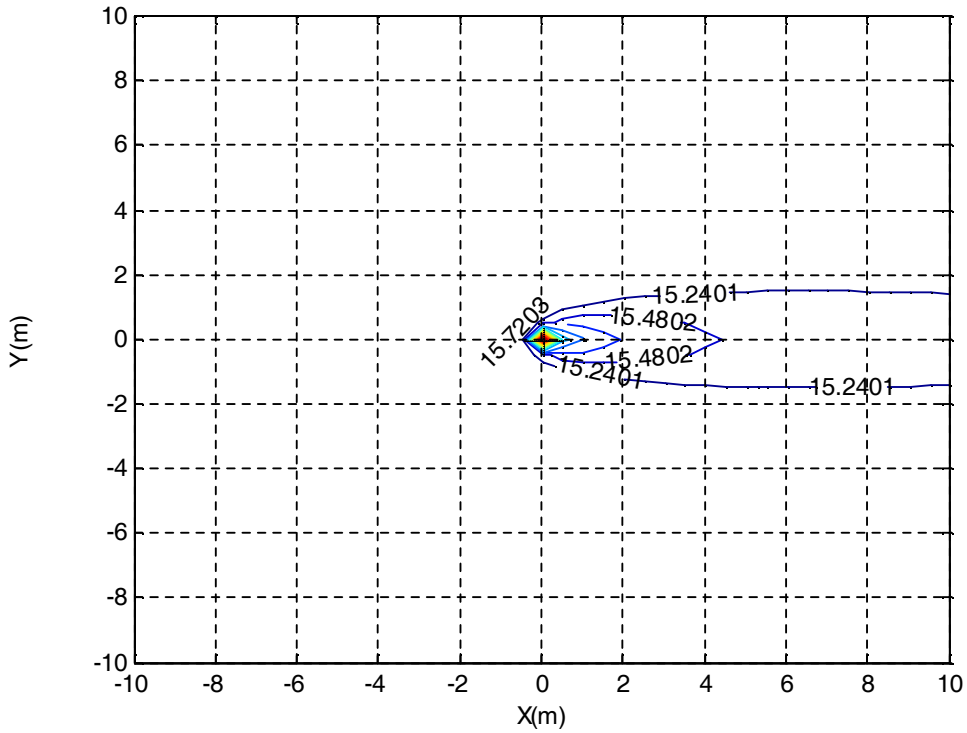


(a) Moving finite line source model

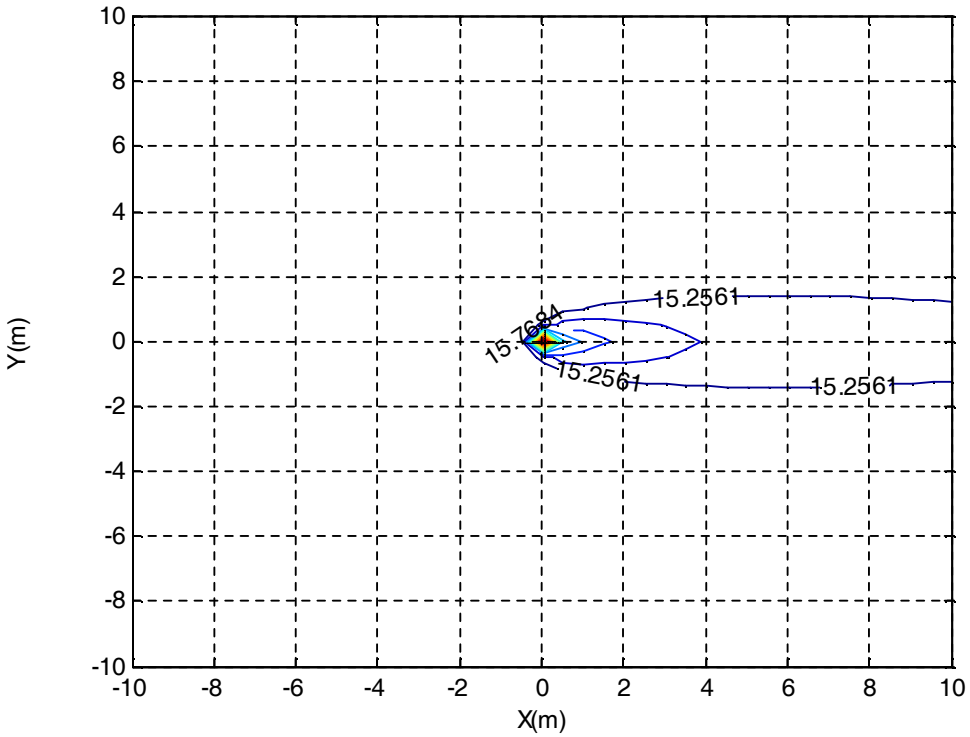


(b) Moving finite line source model

그림 3-2-26 해석모델에 따른 열원 주위 온도 변화 (50m/year)

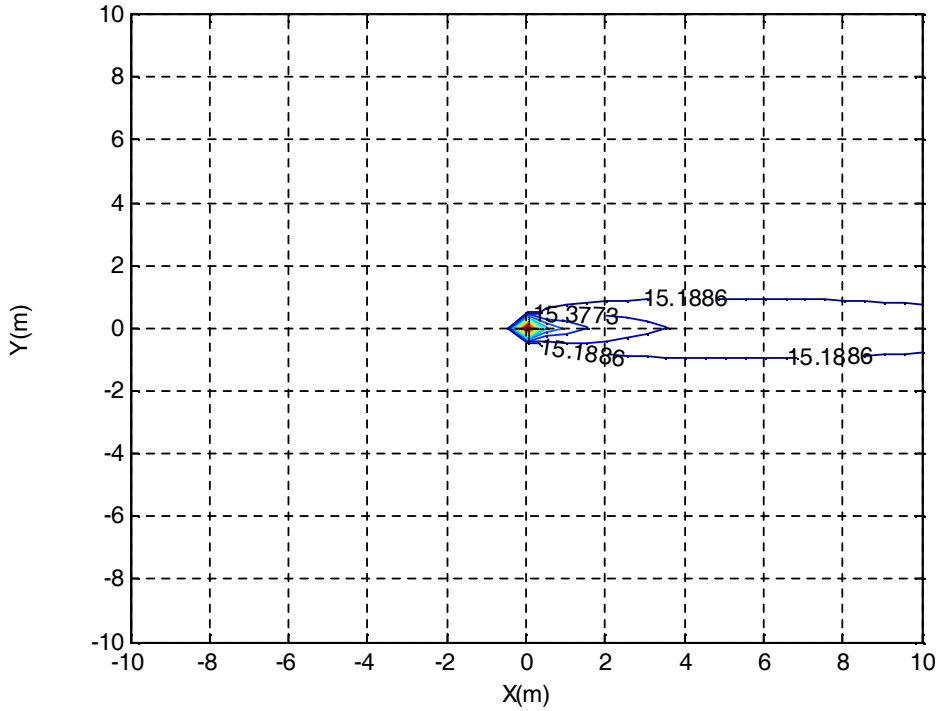


(a) Moving infinite line source model

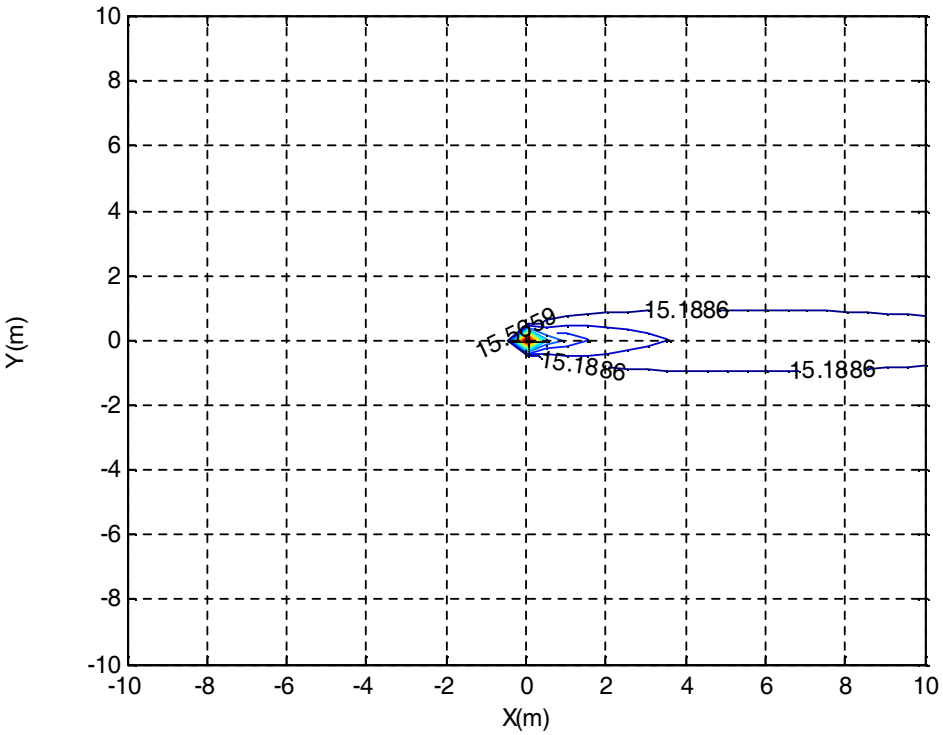


(b) Moving finite line source model

그림 3-2-27 해석모델에 따른 열원 주위 온도 변화 (100m/year)



(a) Moving infinite line source model



(b) Moving finite line source model

그림 3-2-28 해석모델에 따른 열원 주위 온도 변화 (200m/year)

일반적인 지하수 흐름은 그 속도가 0~0.3m/day (0~109.5m/year)일 때, 0.3~0.6m/day (109.5~219m/year)일 때, 0.6~1.0m/day (219~365m/year)일 때로 구분되어 각각 약한, 중간, 강한 정도의 대수층 흐름을 나타낸다(Arslan et al, 2013). 그림에서는 2m/year 정도의 매우 약한 지하수 흐름에 대해서도 등온선이 오른쪽으로 쏠리는 현상을 확인할 수 있었고, 50m/year 이상의 지하수 흐름에서는 확연히 오른쪽으로 쏠려 열 흐름이 오른쪽으로 이동하는 현상을 확인하였다. 초기 온도가 15도임을 감안하였을 때 100m/year 이상의 지하수 흐름에서는 온도 상승폭이 1 아래로 열이 거의 쌓이지 않을 것이라는 것을 알 수 있다.

하지만 두 해석모델 사이에서는 값의 차이가 거의 나지 않았는데 특히 지하수 흐름이 빨라질수록 두 모델의 값은 비슷해진다는 것을 확인하였다. 이는 다른 해석모델을 사용했지만 같은 방법을 써서 지하수 흐름을 모델링하였기 때문이며 또한 해석모델 각각의 특성보다 지하수 흐름이 온도변화에 더 큰 영향을 준다는 것을 의미한다.

이번에는 각각의 지하수 흐름 속도에 따른 지중 열 저항의 변화를 분석하였다. 먼저 해석 년수와 관계없는 R_{gm}과 R_{gd}에 대한 해석 결과가 그림 3-2-29에 나타나 있다.

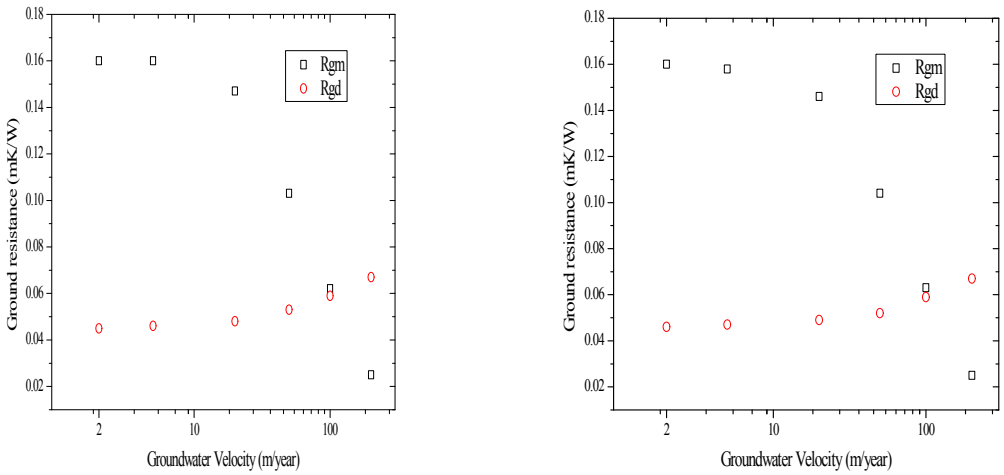
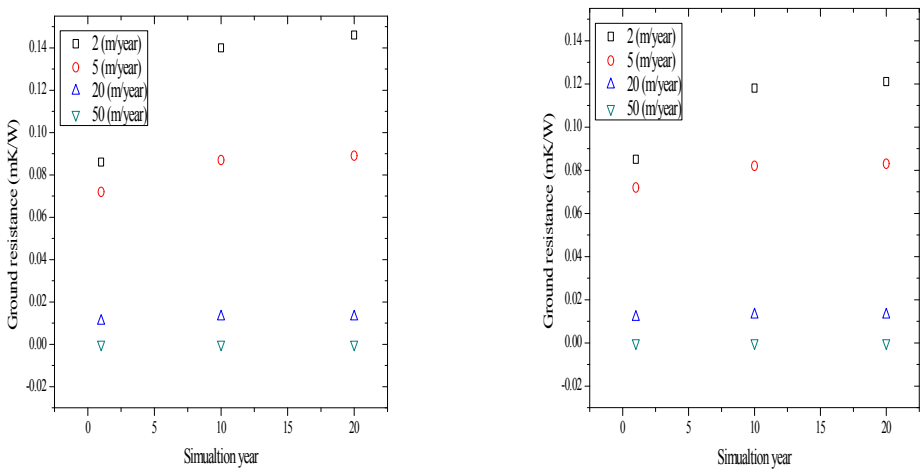


그림 3-2-29 해석 모델에 따른 중기, 단기 지중 열 저항 변화

측정한 지하수 흐름 속도는 2, 5, 20, 50, 100, 200m/year이며 그래프의 편의를 위해 x축은 log scale로 그려졌다. R_{gm}과 R_{gd}의 변화 양상이 완전히 다른 점을 확인할 수 있는데 먼저 R_{gm}의 경우 지하수가 열을 이동시키는 상태 그대로 온도변화가 작아져 20m/year 이상의 속도에서는 저항이 줄기 시작하고, 그 이상의 속도에서는 더욱 현저하게 줄어들어 200m/year 이상에서는 거의 0에 수렴하게 됨을 알 수 있다. 하지만 R_{gd}의 경우에는 매우 짧은 시간을 측정하기 때문에 지하수 흐름에 의해 온도변화가 없어야 할 곳에서도 온도변화가 일어나게 된다. 속도가 빨라질수록 먼 곳에서도 온도변화가 나타나기 때문에 열 저항은 점점 더 커지게 되지만, 빠른 속도가 될수록

온도의 상승 폭도 줄어들기 때문에 상승폭은 줄어들게 된다. 한편 등온선에 이어 열저항에 있어서도 두 해석 모델값의 차이는 1% 미만으로 거의 동일한 결과를 보여주었다.

장기 열 저항인 R_{ga}의 경우에는 1년(단기), 10년(중기), 20년(장기)로 나누어져 해석되었다. 그림 3-2-30에 모델별 결과가 나타나 있다.

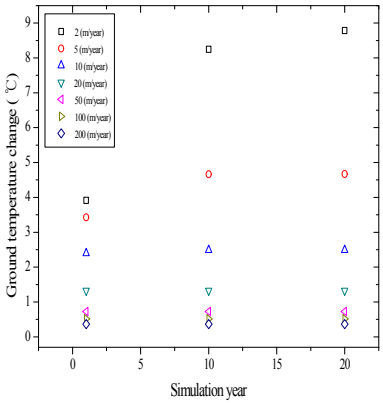


(a) Moving infinite line source model (b) Moving finite line source model

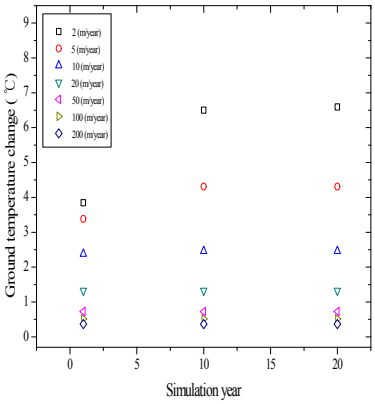
그림 3-2-30 해석 모델에 따른 장기 지중 열 저항 변화

장기 열 저항의 경우에도 중기 열 저항과 같이 지하수 흐름 속도가 증가함에 따라 저항은 감소하였고 그 정도는 더 현저하였다. 50m/year 이상의 속도에서는 저항값이 완전히 0으로 수렴함을 알 수 있는데, 지하수가 해석 년수만큼 계속 쉬지 않고 흘러가는 이상적인 경우이기 때문에 충분히 가능한 수치라고 할 수 있다. 두 해석 모델의 차이에 있어서는 이동 유한 선형 열원 모델이 2m/year의 낮은 지하수 흐름에서도 시간에 따라 열 저항이 증가하는 정도가 이동 무한 선형 열원 모델에 비해 낮았으며 다른 흐름 속도에서도 큰 차이가 나지는 않았지만 같은 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이는 이동 유한 선형 열원 모델이 장기적인 지하수 흐름을 조금이나마 더 민감하게 평가하고 있다고 할 수 있는데, 2m/year의 속도에서 무한 선형 열원 모델의 측정값은 지하수 흐름이 없을 때와 거의 차이가 없었던 반면 유한 선형 열원 모델은 10년 이상의 해석시간에서 확실히 다른 값을 나타내었다.

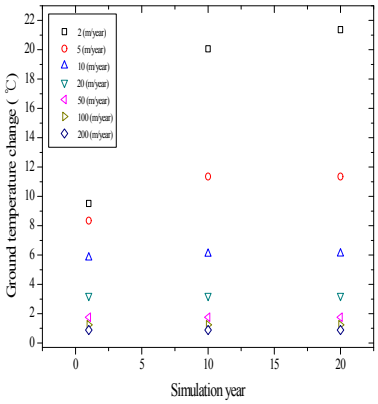
이번에는 T_p를 이용하여 보어홀들의 열 간섭 효과에 따른 지반 온도의 변화를 살펴보았다. 보어홀은 1*16, 4*4의 두 가지 형태로, 보어홀 사이 간격은 3m로, 열량은 20W/m로 가정되어 1년, 10년, 20년간의 해석 시간으로 수행되었다.



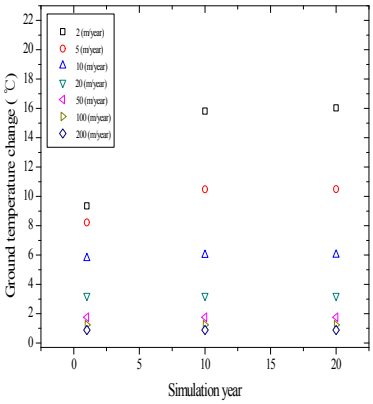
(a) Moving infinite line source model(1*16)



(b) Moving finite line source model(1*16)



(c) Moving infinite line source model(1*16)



(d) Moving finite line source model(1*16)

그림 3-2-31 해석 모델, 보어홀 배치에 따른 지반 온도 변화

그림과 같은 상황에서는 두 가지 보어홀 배치 형태 모두 지하수 흐름이 없거나 10m/year 이하 정도의 흐름 속도에서는 지반의 온도 변화가 너무 극심해서 시간이 흐를수록 지열을 효율적으로 이용하기 어려울 것이라는 것을 예측할 수 있다. 하지만 50m/year 정도 이상의 지하수 흐름은 큰 열이 가해지더라도 지반 온도를 거의 일정한 수준으로 유지할 수 있으며 이는 열교환기의 요구 깊이를 매우 큰 폭으로 줄일 수 있다. 한편 두 해석 모델의 값 차이는 열 저항과 경향이 비슷하였으며 역시 이동 유한 선형 모델이 지하수의 흐름을 조금 더 크게 평가하는 것을 확인할 수 있었다.

이와 같이 지하수 흐름은 지반의 열 흐름을 빠르게 하여 열전도를 높이는 것과 같은 효과를 보인다. 현재 사용하는 설계 방법 안에서는 지중 열 저항과 열 간섭에 관여하며 특히 열 간섭에는 더 큰 효과를 보였는데 물론 지하수의 흐름이 운영기간 내내 지속되는 보장이 없기 때문에 어느 정도 이상의 안전율이 필요하겠지만 이론상으로는 매우 약한 지하수 흐름만 존재한다고 하더라도 시스템 효율 상승에 큰 도움이 되며, 이에 따라

보어홀 사이의 간격을 좀 더 좁혀서 시공할 수 있어 시공 부지에 있어서도 이득을 볼 수 있다. 또한 열 간섭 효과는 주로 연간 냉난방 부하의 불균형으로 인해 쌓이게 되는 열로 인해 일어나게 되는데 지하수 흐름을 잘 이용한다면 냉난방 중 어느 한 쪽으로 치우친 시설에 지열시스템을 시공하더라도 효율적으로 운영할 수 있을 것이다.

다. 코일형 교환기 해석 모델에 대한 지하수 흐름 반영 및 검증

지금까지 제안된 지하수 흐름 관련 해석 모델들은 주로 선형 교환기를 위한 모델로 코일형 교환기를 정확히 반영할 수는 없다. 이에 따라 앞서 제시했던 나선형 코일 열원 모델에도 지하수 흐름에 대한 이론을 적용하여 코일형 교환기가 설치된 지반에 지하수 흐름이 있을 때를 모델링하였다. 현재 존재하고 있는 나선형 코일 열원 모델은 식 (2.3.9)와 같으며 이는 식 (2.2.25)에서 적분을 위한 치환을 하기 전 단계에 해당한다.

$$\theta(u,t)=\frac{Q/L}{\rho c}\int_0^t\int_0^\infty \tilde{G}(u,t;x'=r_0\cos(\omega z'),y'=r_0\sin(\omega z'),z',t')dz'dt'$$
$$=\frac{Q/L}{(4\pi\alpha)^{3/2}\rho c}\int_0^t\frac{1}{(t-t')^{3/2}}\int_0^h e^{-\frac{F(x,y,z')}{4\alpha(t-t')}}\cdot(e^{-\frac{(z-z')^2}{4\alpha(t-t')}}-e^{-\frac{(z+z')^2}{4\alpha(t-t')}})dz'dt' \quad (2.3.9)$$

식 (2.3.9)에 식 (2.3.2)와 같은 지하수 흐름 이론을 적용할 수 있으며 지하수가 +x 방향으로 흐를 때 식은 다음과 같이 변하게 된다.

$$\theta(u,t)=\frac{Q/L}{(4\pi\alpha)^{3/2}\rho c}\int_0^t\frac{1}{(t-t')^{3/2}}\int_0^h e^{-\frac{F(x-U(t-t'),y,z')}{4\alpha(t-t')}}\cdot(e^{-\frac{(z-z')^2}{4\alpha(t-t')}}-e^{-\frac{(z+z')^2}{4\alpha(t-t')}})dz'dt'$$
$$F(x-U(t-t'),y,z')=\{x-U(t-t')\}^2+y^2+r_0^2-2\{x-U(t-t')\}r_0\cos(\omega z')-2yr_0\sin(\omega z') \quad (2.3.10)$$

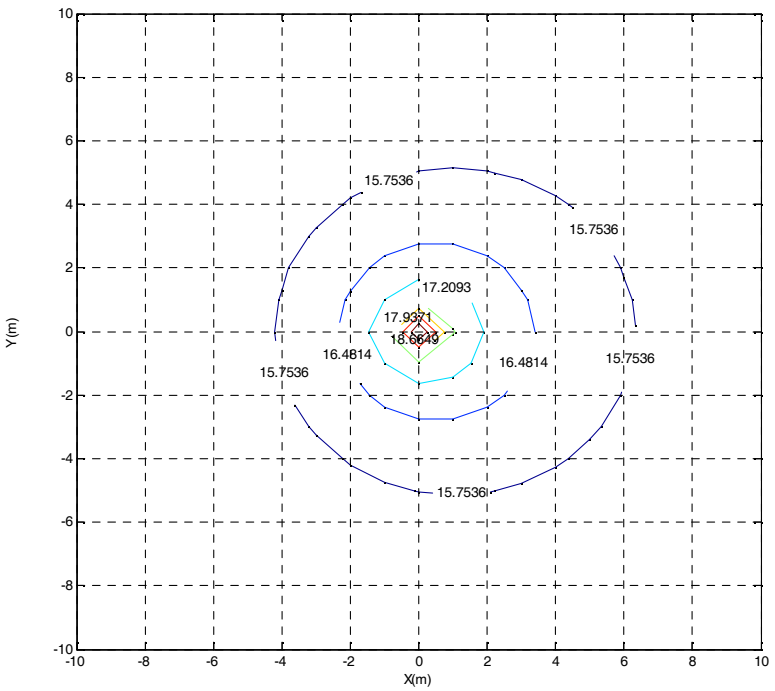
이대로 계산 시 t항 때문에 분모가 0이 되어 적분이 제대로 수행되지 않기 때문에 추가적인 수정이 필요하다. 이에 따라 $\xi=A(u,z')/(2\sqrt{\alpha(t-t')})$로 치환한 후 z, t의 적분 순서를 바꿔 정리하면 최종적으로 식 (2.3.11)을 얻을 수 있다.

$$\theta(x,y,z,t)=\frac{Q/L}{(2\pi)^{3/2}\lambda}e^{\left[\frac{x*U}{2\alpha}\right]}\int_0^h e^{\frac{-U(ro*\cos(wz'))}{2\alpha}}\cdots$$

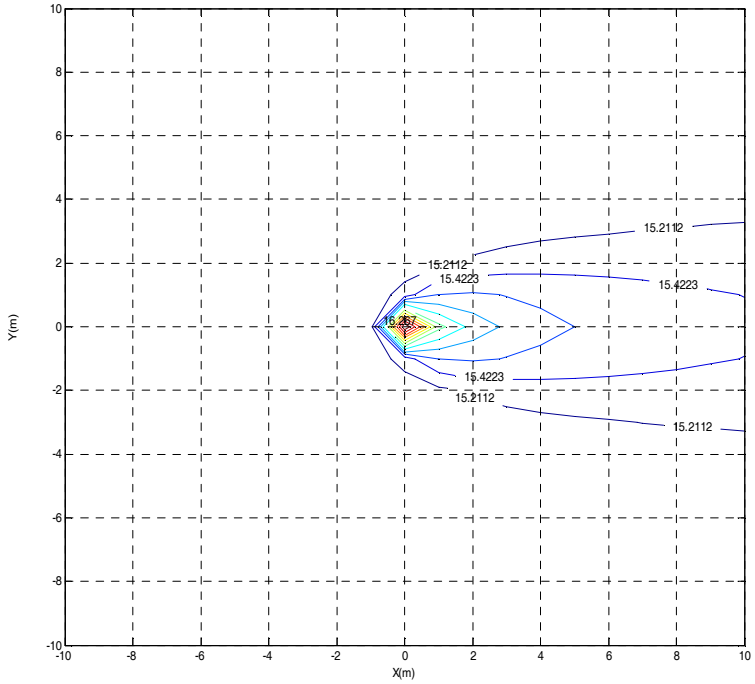
$$\cdot\left[\int_{\frac{A_-(u,z')}{2\sqrt{\alpha t}}}^{\infty}e^{-\xi^2}*\left(\frac{e^{\frac{-1*(\frac{U*A_-(u,z')}{4\alpha\xi})^2}{4\alpha\xi}}}{A_-(u,z')}\right)\mathrm{d}\xi-\int_{\frac{A_+(u,z')}{2\sqrt{\alpha t}}}^{\infty}e^{-\xi^2}*\left(\frac{e^{\frac{-1*(\frac{U*A_+(u,z')}{4\alpha\xi})^2}{4\alpha\xi}}}{A_+(u,z')}\right)d\xi\right]dz'$$

$$A_{\pm}(u,z')=\sqrt{x^2+y^2+r_0^{\,2}-2xr_0\cos(\omega z')-2yr_0\sin(\omega z')+(z\pm z')^2} \qquad (2.3.11)$$

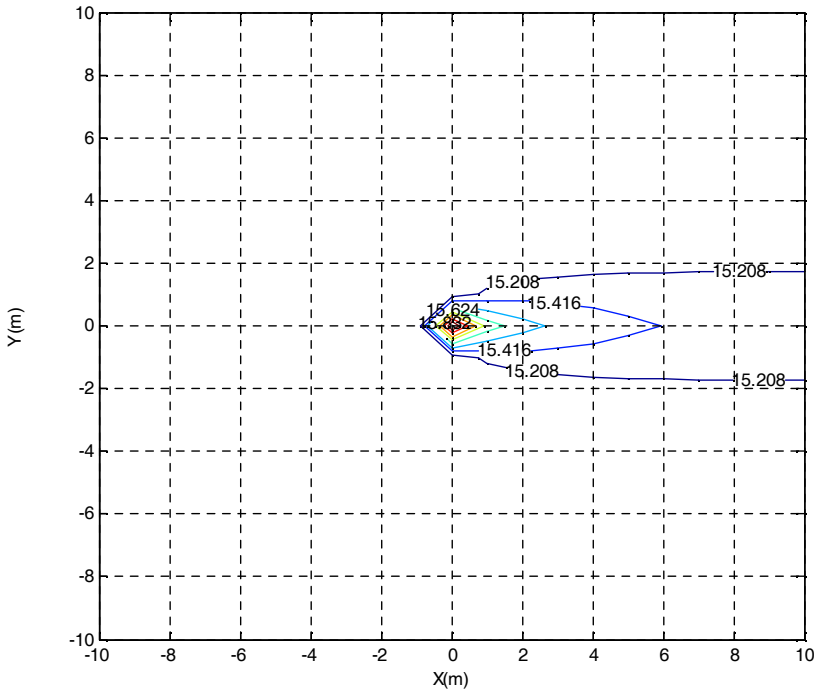
이는 이동 나선형 코일 열원 모델 (Moving spiral coil source model)이라 부를 수 있으며 표 3-2-13의 물성치를 사용하여 나타낸 온도 변화는 그림 3-2-32와 같다.



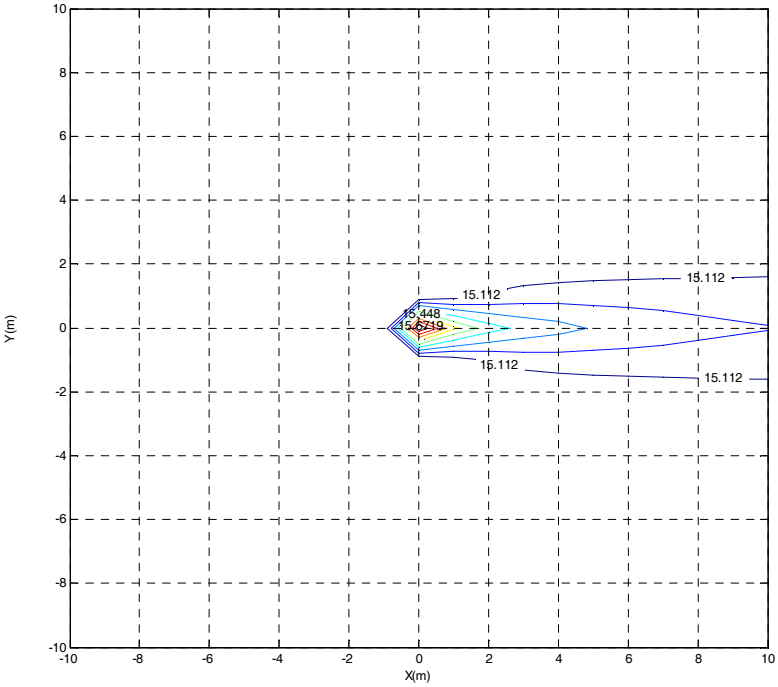
(a) 2m/year



(b) 50m/year



(c) 100m/year



(d) 200m/year

그림 3-2-32 열원 주위 온도 변화 (이동 나선형 코일 열원 모델)

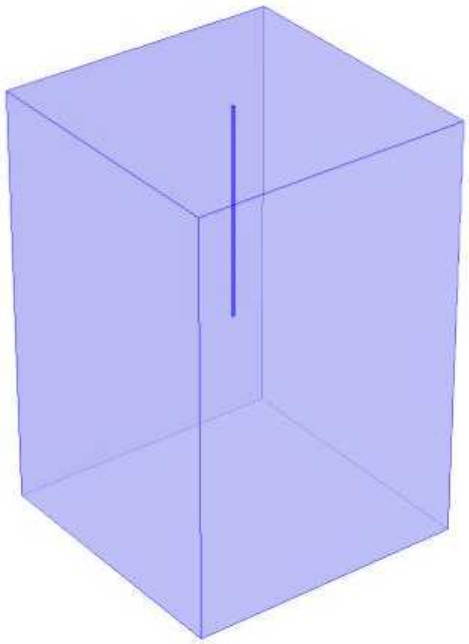
코일의 깊이는 30m, 측정 지점은 중간지점인 15m로 설정하였으며 코일의 피치는 10cm로 가정하였다. 전체적인 열 흐름 상태는 이동 유한 및 무한 열원 모델과 비슷하게 나타났지만 열원에서 2m 이내의 열원과 가까운 지점에서는 이동 나선형 코일 열원 모델에서 온도변화가 더 크게 나타났다. 이는 선형 교환기에 비해 코일형 교환기가 같은 열량을 주입하였을 때도 열 배출 면적이 넓어 온도 상승폭이 크기 때문이며, 지하수 흐름의 영향이 크게 미치는 2m 이상의 지점에서는 선형 모델들과 큰 값 차이가 나타나지 않았다. 설계에서는 지중 열 저항을 지반과 접하는 보어홀 벽면의 온도 변화값을 통해 측정하며, 보어홀의 반지름은 거의 대부분 0.5m 이하라는 것을 감안한다면 열 저항 측정에 있어 상당히 의미있는 결과라는 것을 알 수 있다.

해석 모델의 설계 적용을 위해 유한요소 수치해석 프로그램인 COMSOL Multiphysics 4.3a를 이용하여 해석 모델을 검증하였다. 일반적으로 지하수 흐름이 없거나 투수계수가 매우 낮은 지반의 경우, 대류 또는 이류의 영향은 미미한 것으로 고려할 수 있지만(Rees et al, 2000), 여기서는 지하수 흐름을 모델링하기 위하여 지반은 고체가 아닌 공극이 있는 porous media로 가정되었으며 초기 간극률을 설정한 후 그 간극 사이로 지하수가 흐르게 된다. 해석에서의 지배 방정식은 일반적인 전도 방정식(Incropera and Dewitt, 2000)에 지하수에 의한 대류에 관한 항을 추가한 식으로 이는 식 (2.3.12)와 같다.

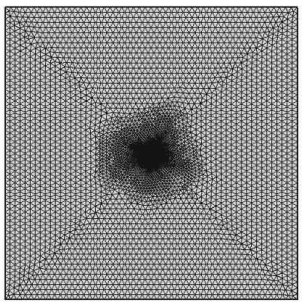
$$(\rho C_p)_{eq}\frac{\partial T}{\partial \tau}+\rho C_p u\cdot\nabla T=\nabla\cdot(\lambda_{eq}\nabla T)+Q$$
$$(\rho C_p)_{eq}=n_p\rho_p C_{p.\mathrm{p}}+(1-n_p)\rho C_p$$
$$\lambda_{eq}=n_p\lambda_p+(1-n_p)\lambda \qquad (2.3.12)$$

여기서 $(\rho C_p)_{eq}$는 매질의 등가 밀도와 비열이고 λ_{eq}는 매질의 등가 열전도도이며 $\partial T/\partial\tau$는 시간에 따른 온도 변화량을, u는 지하수의 속도를, Q는 열원으로부터 발생하는 열을, n_p는 porous media의 간극률을 의미한다. 식 (2.3.12)와 같이 매질 전체의 밀도, 비열, 열전도도는 간극률에 따라 등가의 값으로 결정되게 된다.

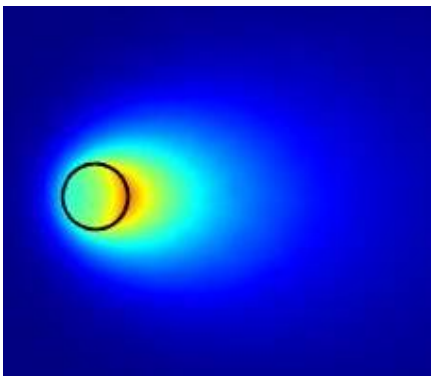
또한 해석 모델과의 비교를 위해 일반적인 CFD 해석이 아닌 열교환기 전체에 정해진 열을 가하는 방식을 적용하였으며 유한요소 모델은 Free tetrahedral 격자망을 사용하였다. 기타 주요 제원은 표 3-2-13의 수치를 그대로 사용하였으며 열 교환기의 깊이는 15m로 설정하고 측정 지점은 중간지점인 7.5m를 사용하였다. 그림 3-2-33은 유한요소 모델과 격자, 해석 결과를 나타낸다.



(a) 유한요소 해석 모델



(b) 격자 (삼각형)



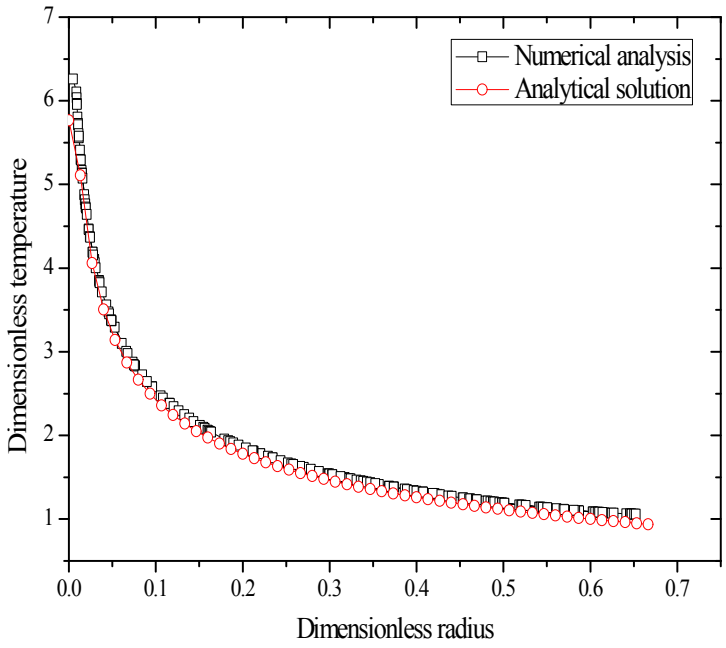
(c) 해석 결과

그림 3-2-33 수치해석 모델

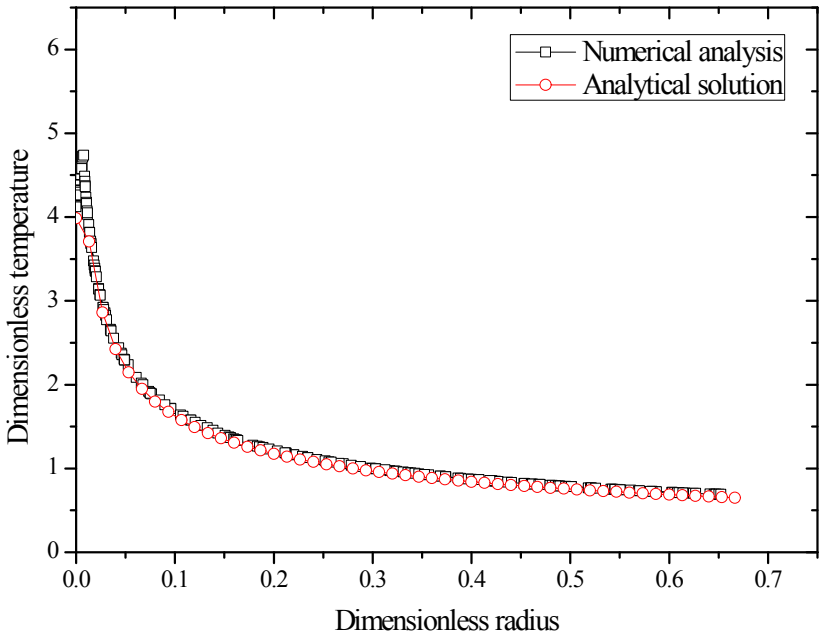
모델의 경계조건은 가로, 세로가 20m, 높이는 30m로 해석되었고 열의 반사를 막기 위해 단열 처리하였다. 수월한 검증을 위해 열원과의 거리 및 온도변화에 대한 무차원 계수를 도입하였으며 이는 식 (2.3.13)과 같다.

$$R=\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{H}, \quad \phi=\frac{4\pi\lambda\triangle t}{Q/L} \tag{2.3.13}$$

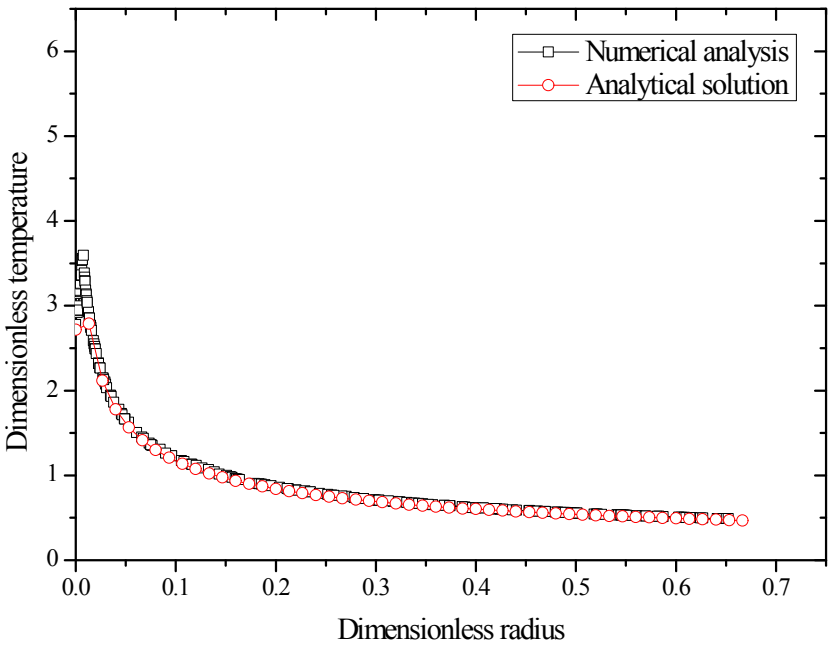
여기서 x, y는 측정하고자 하는 점의 좌표, H는 열교환기의 깊이를 나타낸다. 그림 3-2-24에는 주요 지하수 흐름 속도에 따른 검증 결과가 나타나 있으며 매우 근사한 결과를 보임을 알 수 있다. 특히 흐름 속도가 빨라져 지하수가 열 흐름을 지배하게 될수록 더 일치하는 모습을 보여 지하수 흐름을 잘 반영하고 있다고 볼 수 있다.



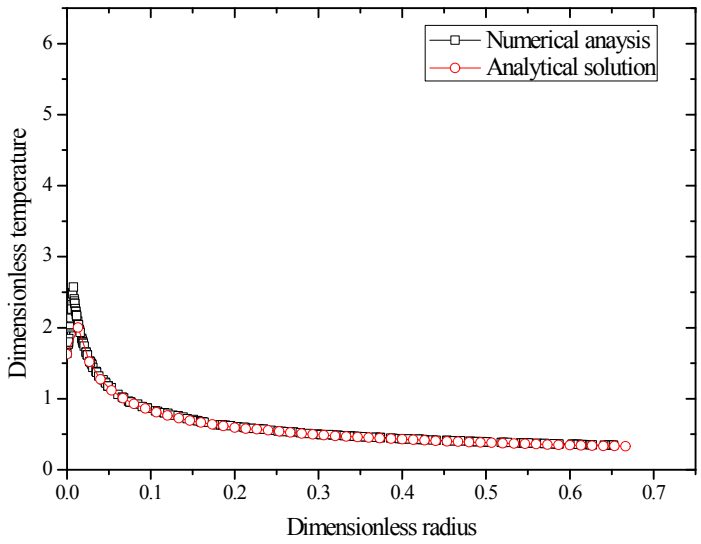
(a) 20m/year



(b) 50m/year



(c) 100m/year



(d) 200m/year

그림 3-2-34 수치해석과의 비교 검증

4. Mockup 실험을 통한 모듈 검증

본 절에서는 현장 실증 실험을 통해 2.2 절에서 소개된 지중 열교환기 열전달 이론들의 적합성을 검증하고자 하였다. 매립지 지반으로 이루어진 인천국제공항 제 2 여객 터미널이 건설될 부지에 수직 밀폐형 지중 열교환기를 설치하였으며 일반적으로 많이 적용되고 있는 U 자형 열교환기 외에도 U 자형보다 넓은 열교환 접촉 면적을 가지는 W 자형과 2U 자형 그리고 코일형 지중 열교환기를 설치하였다. 우선 지반의 열전도도를 산정하기 위해 열교환기 형태별 열응답 실험을 실시하였으며 이를 열전달 해석 모델과 비교하였다. 또한 열교환기 형태별 열효율 값을 산정하기 위해 열성능 실험을 실시하여 열성능을 비교 분석하고 보어홀 열저항 해석 모델의 적절성을 분석하였다.

가. 수직밀폐형 지중 열교환기 설치 조건

본 연구에서는 인천국제공항 제 2 여객터미널 건설 부지에 수직 밀폐형 타입의 보어홀을 시공하였다. 실험지역에 대해 지반조사를 수행한 결과 실트 및 모래질 퇴적층과 풍화암, 연암 등으로 구성되어 있었다(그림 3-2-35).

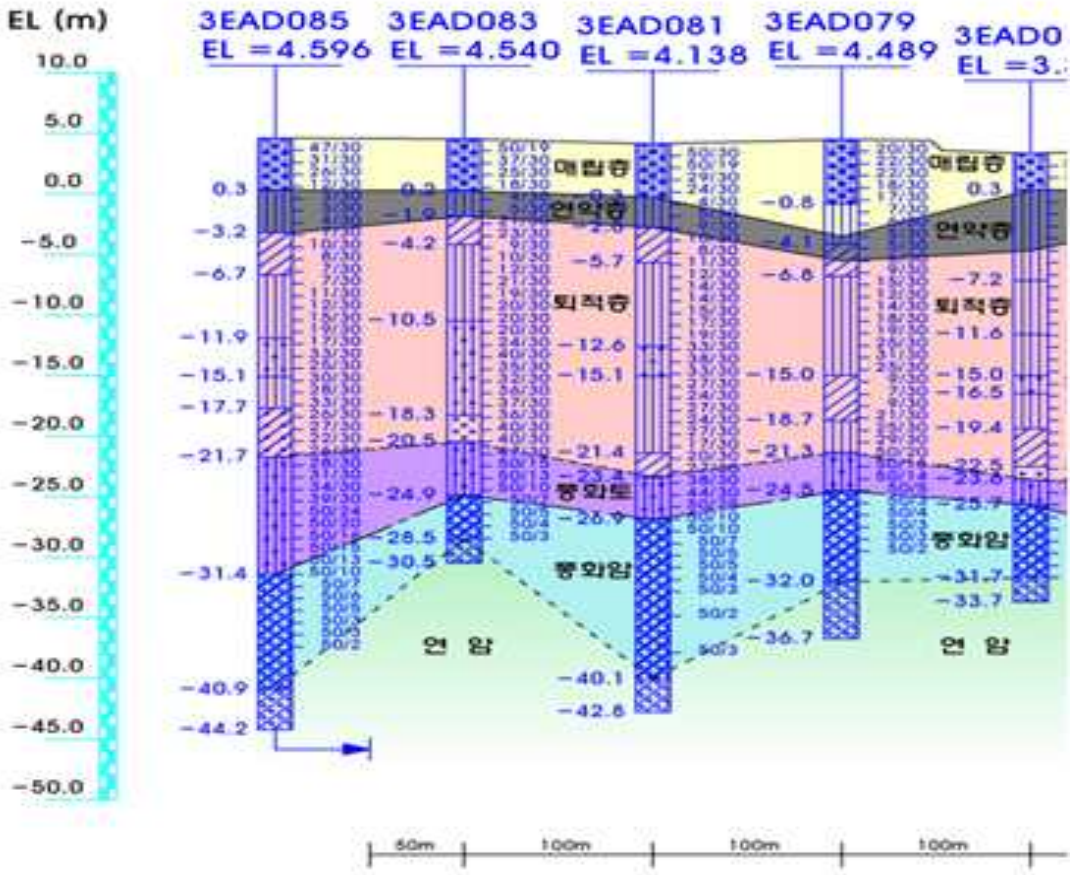


그림 3-2-35 지반조사 결과 지층 구성도

퇴적층은 9/30～33/30 의 N 값을 나타냈다. 지하수위는 지표면에서 GL (-)3.5m 심도에 위치해 있었으며 GL(-)30m 지점부터 풍화암 및 연암이 출연하는 것으로 나타났다. 수직 밀폐형 보어홀에 U 자형과 W 자형 및 2U 자형 지중 열교환기를 15cm 보어홀 직경 내에 수직 깊이 50m 로 설치하였다. W 자와 2U 자형 교환기는 표 3-2-3 에서의 A 와 B case 의 중간 형태로 시공되었다. 또한 코일형 지중 열교환기의 경우 코일의 외경이 28cm 이기에 보어홀 직경은 30cm 였으며 코일 피치 간격 5cm 에 수직 깊이 30m 로 설치되었다. 지중 열교환기는 PB (polybutylene) 소재의 파이프(외경/내경 : 20mm/ 16mm)가 사용되었고 보어홀 내부는 벤토나이트 그라우트를 채운 형태로 구성되어 있으며 열교환기 배치 상태는 그림 3-2-36 와 같다. 보어홀 간 간격은 6m 이다. 그림 3-2-37 의 (a)～(e)는 실험 전 주요 시공과정을 보여주고 있다.

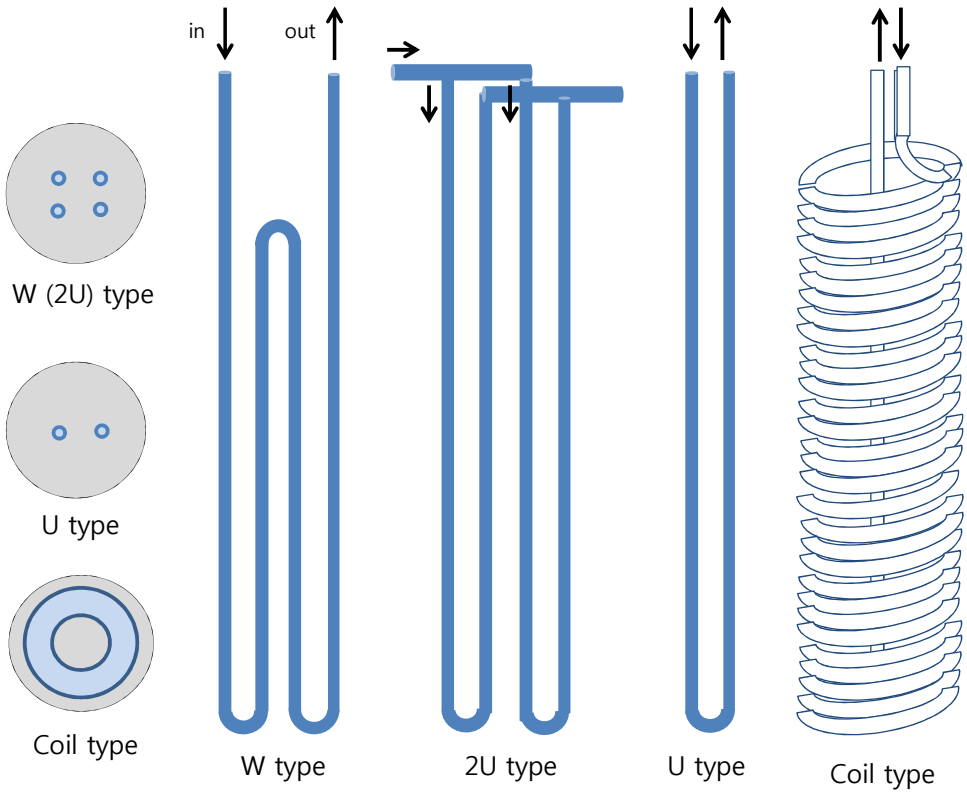


그림 3-2-36 열교환기 형태 및 결속 평면도



(a) 보어홀 천공 (b) 열교환기 설치 (c) 그라우팅



(d) 그라우팅 양생 (e) 장비 연결

그림 3-2-37 지중 열교환기 시공 과정

나. 현장 열응답 실험

(1) 라인형 지중 열교환기 적용시 현장 열응답 실험

현장 열응답 실험을 통해 지반의 열전도도를 도출할 때는 식 (2.2.19)와 같은 무한 선형 열원 모델이 주로 사용된다. 보어홀의 열저항과 순환수 유체 온도로 표현된 식 (2.2.19)는 식 (2.4.1)과 같이 $\ln t$에 관한 1 차식으로 표현될 수 있다.

$$T_f = Ax + B \tag{2.4.1}$$

여기서 $A = \frac{Q/L}{4\pi\lambda}$, $B = A(\ln\frac{4\alpha}{r_b^2} - 0.5772) + \frac{Q}{L}R_b + T_o$이고 $x = \ln t$이며 따라서 지중 열전도도(λ)는 식 (2.4.2)를 사용하여 열응답 시험을 통해 시간에 따른 유체온도를 측정하고 그 결과를 $T_f - \ln t$의 반대수 관계로 도시한 그래프의 기울기(A)를 통해 산출할 수 있다.

$$\lambda = \frac{Q/L}{4\pi A} \tag{2.4.2}$$

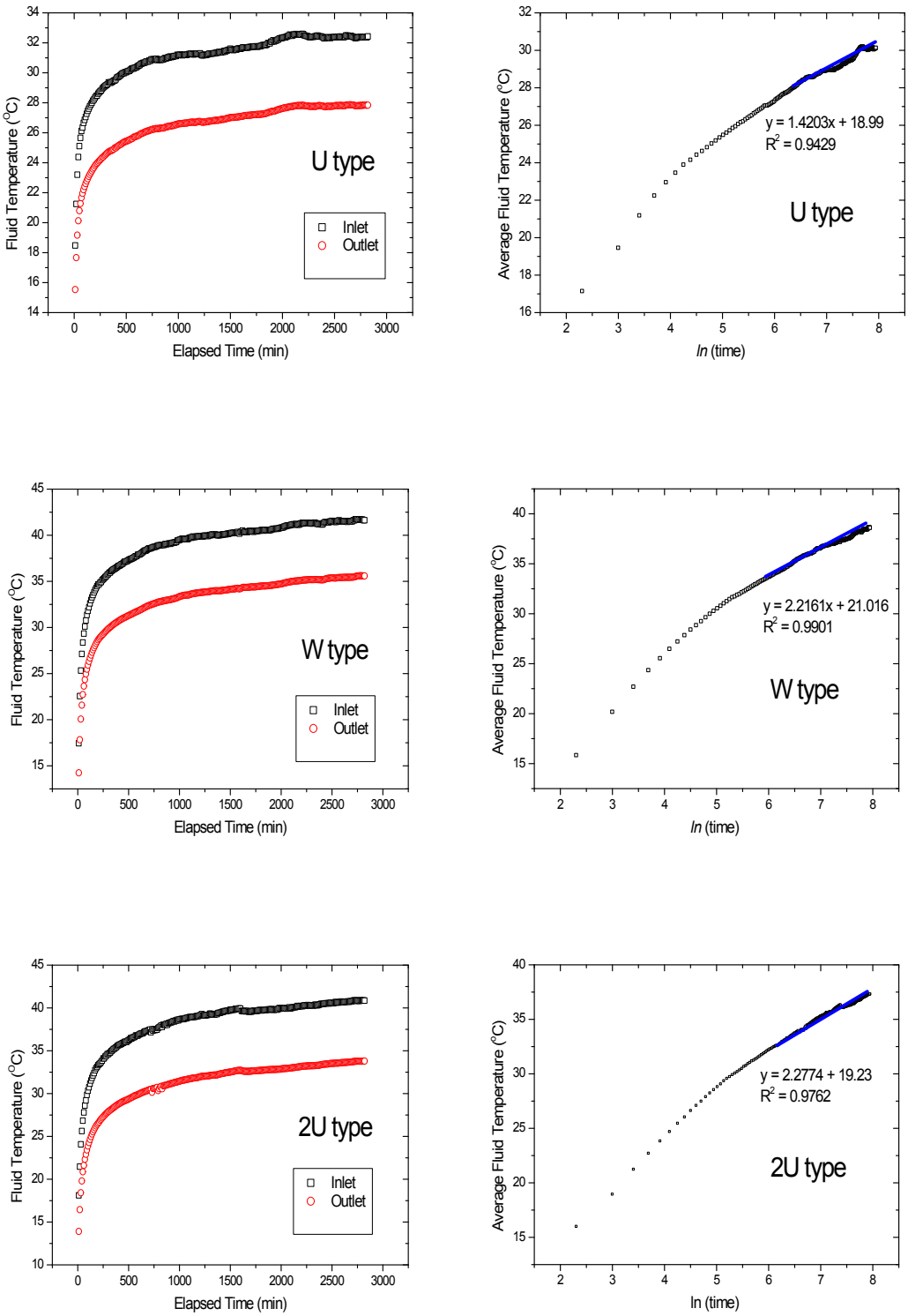
그림 3-2-37 과 같이 지중 열교환기 설치 후 지반의 열전도도를 산정하기 위하여 U, W 그리고 2U 자형 지중 열교환기에 대해 현장 열응답 실험을 실시하였다. 코일형 교환기의 경우 라인 형태가 아니기에 식 (2.4.2)의 무한 선형 열원 모델을 적용하기는 어려운 것으로 알려져 있다(윤석 등, 2012). 지중 열교환기가 설치된 보어홀에 장비를 연결하여 48 시간 동안 현장 열응답 시험을 수행하였다. 히터 투입 전 30 분간 무부하 운전을 통해 도출된 지반의 초기 온도는 15.8~16.5℃ 였으며 실험 시 유량은 난류 조건 형성을 위하여 6~8 lpm 값으로 제어하였고 순환수 온도뿐만 아니라 유량 값도 10 분 간격으로 실시간으로 계측 저장하였다. 48 시간 동안의 열응답 시험 후 초기 열용량이 일정하지 않은 것을 고려하여 초기 12 시간 온도 데이터를 제외하고(임효재와 공형진, 2010) 식 (2.4.2)를 이용하여 지반의 열전도도를 산정하였다. 그림 3-2-38 는 U, W 그리고 2U 자형 지중 열교환기 이용 시 열응답 실험 시간에 따른 순환수 온도 변화를 나타낸다. U, W 그리고 2U 자형 지중 열교환기 이용에 따른 지반의 열전도도는 각각 2.13, 2.15, 2.17 W/mK 값을 보였다. 열교환기 형태별 지반의 열전도도가 1~2% 범위 내에서 차이를 보였으나 이는 지반의 초기온도가 완전히 일치하지 않았기 때문인 것으로 판단되며 따라서 지중 열교환기 형태가 변하더라도 지반의 열전도도는 변하지 않는 고유한 값이라는 것을 알 수 있다.

또한 식 (2.2.35)의 다층 지반의 해석해를 검증하기 위하여 표 3-2-14 과 같이 각 지층별 열전도도를 측정 혹은 경험식을 이용하여 추정하였다. 심도 3.5 m 까지의 자갈층은 지반

조사시 시료 추출 후 실내 탐침법을 수행하여 열전도도를 측정하였다. 그 외 퇴적층, 풍화토 및 풍화암은 시료 보관을 하지 못한 관계로 여러 경험 모델을 이용하여 열전도도를 도출하였다. 본 조사지역의 풍화암은 모암인 화강암이 매우 심하게 풍화된(completely to highly weathered) 상태로 거의 토사와 비슷한 특성을 보였다. 따라서 문헌에서 제시된 2.3~3.5 *W/mK* 의 열전도도 범위에서(GLD Manual, 2010) 대략 2.5 *W/mK* 정도의 열전도도를 가질 것으로 판단되었다. 지층별로 예측된 열전도도 값을 식 (2.2.35)에 대입하여 산정된 열전도도 값은 2.24~2.25 *W/mK* 범위의 열전도도 값을 보였으며 이는 실제 열응답 실험 결과 도출된 열전도도 값과 5% 내로 일치함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제시된 다층 지반의 열전도도 해석해는 실제 지반의 열전도도를 정확하게 예측한다는 것을 알 수 있다.

표 3-2-14 다층 지반 열전도도 분석

지 층		통일분류법	지층심도 (GL. m)	열전도도 도출 방법
매립층		GP (자갈)	0~3.5m	시료 채취 후 탐침 수행 0.211 W/mK
퇴적층	상부 해성층	CL, ML (γ_t=1.807 γ_d=1.331 W=35.7% S=94.55%)	3.5~20.7m (3.5~22.5m)	Kersten 모델 (점토, 실트) 적용 : 2.304 W/mK
	상부 충적층			
	하부 해성층			
	하부 충적층			
풍화토		SM (w=35%, S=95%)	20.7~29m (22.5~35m)	화강 풍화토 경험 모델 (Park et al, 2012) 2.4 W/mK 적용
풍화암		화강풍화암	29m~34m (35m~47.5m)	화강암 : 2.3~3.6 (GLD, 2010) → 2.5 적용
연 암		화강암	34m~50m 47.5m~50m	



(a) 온도 변화 vs 시간 (b) 온도 변화 vs $\ln t$

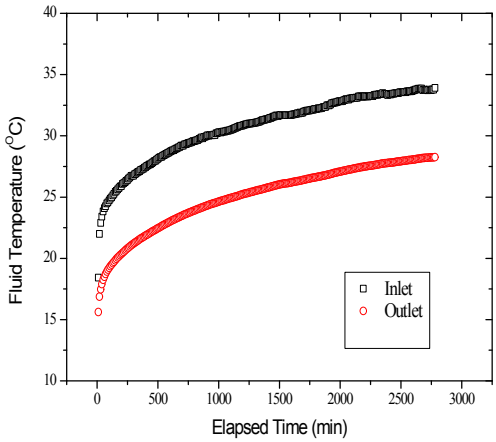
그림 3-2-38 U, W, 2U 자형 지중 열교환기의 시간에 따른 순환수 온도 변화

(2) 코일형 지중 열교환기 적용시 현장 열응답 실험

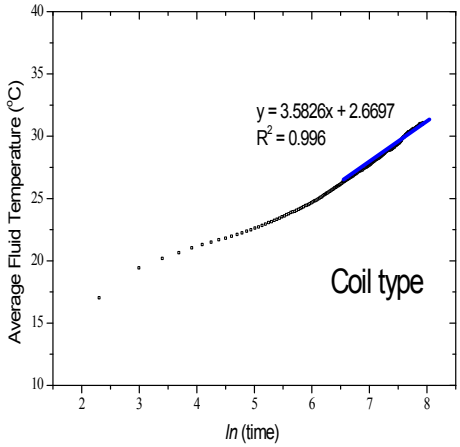
코일형 지중 열교환기 형태는 그림 3-2-36 와 같이 라인 형태가 아니기에 지중 열전도도를 도출하는데 가장 많이 사용되는 무한 선형 열원 모델을 적용하기에는 무리가 있을 수 있다. 하지만 Blackwell and Misener (1951)에 의하면 L/D(L:길이, D:직경), 즉 열원의 길이와 직경의 비가 25 에서 30 이상이면 직경의 영향을 거의 받지 않기에 무한 선형 열원 이론을 적용할 수 있다고 보고하였다. 이는 즉 열원의 길이가 직경의 30 배 이상의 유한한 상태라고 할지라도 큰 무리 없이 무한 선형 열원 이론을 적용할 수 있는 것을 뜻한다.

따라서 본 연구에서는 국내외적으로 거의 연구된 적이 없는 수직 밀폐형 타입의 보어홀에 코일형 지중 열교환기를 설치하여 현장 열응답 실험을 수행하였다. 보어홀 직경이 30 cm 수직 깊이가 30 m 이므로 L/D 는 100 정도의 값을 가졌기에 무한 선형 열원 모델을 이용하여 지중 열전도도를 도출하고자 하였다. 우선 앞에서 소개된 라인형 열교환기를 사용했을 때와 마찬가지로 48 시간 동안 열응답 실험을 수행하였으며 그림 3-2-39 는 코일형 지중 열교환기 이용 시 열응답 실험 시간에 따른 순환수 온도 변화를 나타낸다. 일반 라인형 지중 열교환기 실험과 마찬가지로 48 시간 동안 열응답 실험 온도 데이터 중 초기의 12 시간 온도 데이터를 제외하고 식 (2.2.25)를 이용하여 산정된 지반의 열전도도는 1.86 W/mK 값을 보였다. 이는 실제 지반의 열전도도 값과는 상이한 값을 보임을 알 수 있다. 그림 3-2-39 에서 알 수 있듯이 48 시간 동안의 열응답 실험 동안 순환수 온도는 일정하게 계속 증가하고 있음을 알 수 있다. 코일형 지중 열교환기는 그라우트와의 접촉면적이 넓기에 그만큼 열전달이 원활하게 이루어진 것으로 파악되며 따라서 정상 상태에 도달되는 시간도 길어졌음을 알 수 있다. 즉 코일형 열교환기를 이용하여 지반의 열전도도를 산출할 때는 일반 라인형 열교환기를 적용했을 때와 동일한 조건으로 실험을 수행하면 안 될 것으로 생각되며 따라서 약 60 시간 동안 연속으로 열응답 실험을 다시 수행하였다.

그림 3-2-40 은 60 시간 동안의 열응답 실험 결과 도출된 순환수의 온도분포를 나타낸다. 대략 20 시간 이후 준정상 상태에 도달하는 것을 알 수 있었으며 따라서 초기 22 시간 데이터를 제외 후 식 (2.2.25)를 이용하여 지반의 열전도도를 다시 산정하였다. 산정 결과 지반의 열전도도는 2.17 W/mK 값을 보였으며 이는 실제 30 m 지반의 등가 열전도도와 비슷한 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 현장 실험으로 계측된 순환수 온도를 입력인자로 이용하여 2.2 절에서 소개된 유한요소 해석프로그램인 COMSOL Multiphysics (Verson 4.3)을 이용하여 열교환기 형상에 따른 열적 거동을 해석하였다.

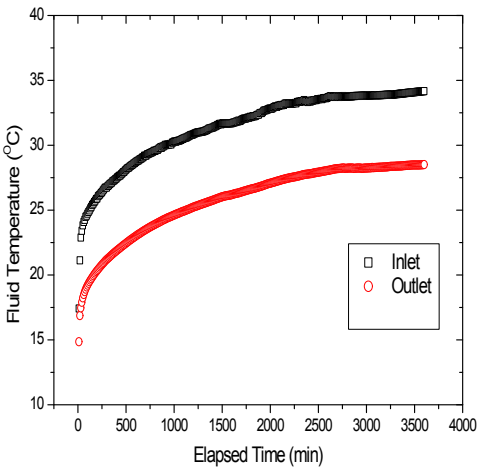


(a) 온도 변화 vs 시간

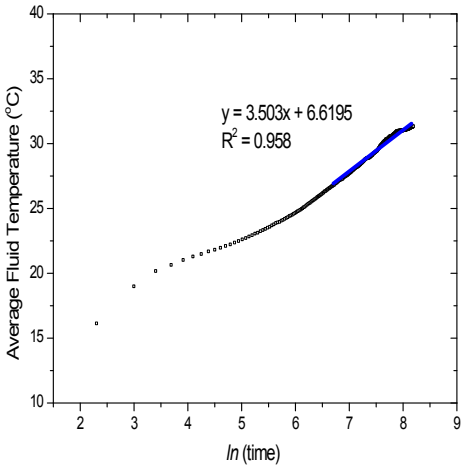


(b) 온도 변화 vs $\ln t$

그림 3-2-39 코일형 지중 열교환기의 시간에 따른 순환수 온도 변화(48 시간)



(a) 온도 변화 vs 시간



(b) 온도 변화 vs $\ln t$

그림 3-2-40 코일형 지중 열교환기의 시간에 따른 순환수 온도 변화(60 시간)

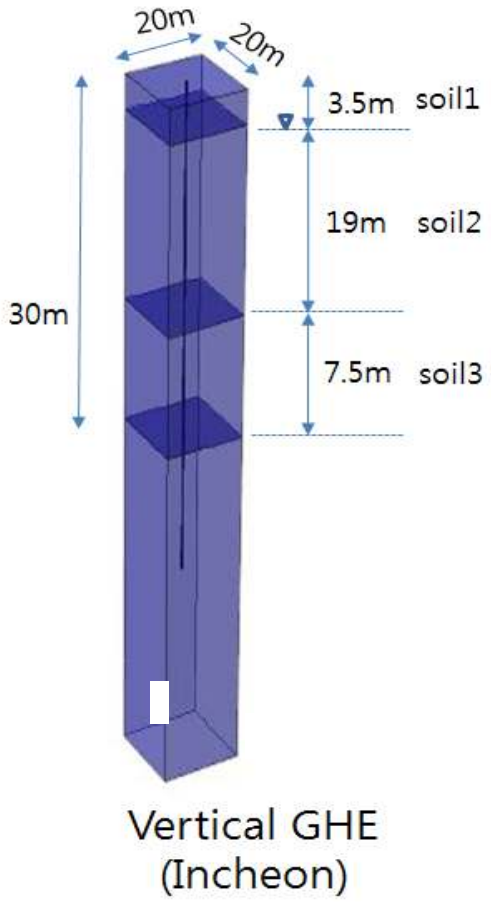


그림 3-2-41 코일형 열교환기 열응답시험 시뮬레이션을 위한 유한요소모델

표 3-2-15 시뮬레이션에 적용된 재료의 열물성

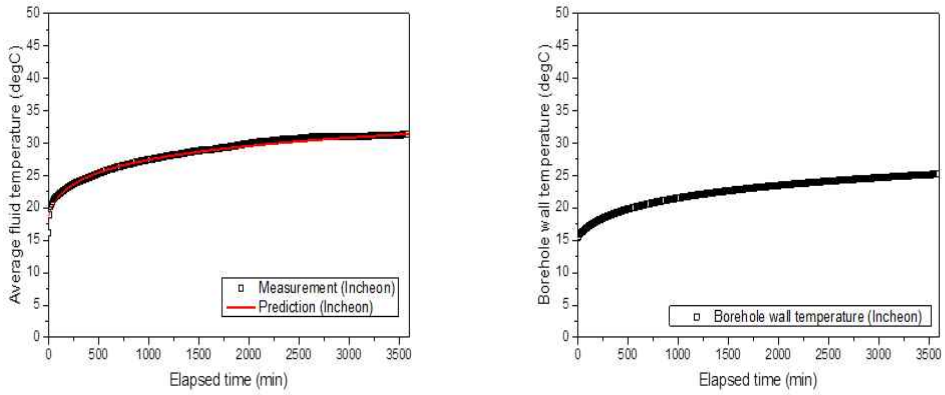
Material	Thermal conductivity (W/mK)	Specific heat (J/kgK)	Density (kg/㎥)
Layer 1	0.21	800	1600
Layer 2	2.30	1300	2100
Layer 3	2.40	1280	2140
Bentonite grout	0.9	380	1580
PB pipe	0.38	525	955
Water	0.57	4200	1000

그림 3-2-41 은 열응답 실험의 시뮬레이션을 위한 유한요소 모델을 보여준다. 보어홀 내부에 설치된 코일타입의 지중 열교환기 형태 및 배치는 보어홀은 외경 0.3 m, 수직깊이 30 m 로 설정하였다. 보어홀을 둘러싸고 있는 지반(2m×2m×15.5m)은 지하수위를 기준으로 불포화층과 포화층으로 나누어져 있으며 말뚝 하반부는 암반층으로 구성되어진다. 수

치해석에 사용된 열물성치는 표 3-2-13 와 같다. Layer 1 은 지하수위 위의 건조시료를 나타내며 현장의 시료를 채취하여 Hukseflux 사의 비정상 탐침(non-steady state probe method) 장비인 TP-08 을 이용하여 열전도도를 측정하였다. 또한 Layer2 는 지하수위 아래로써 Layer2 의 열전도도는 Park et al(2012)이 제안한 현장 함수비와 단위중량에 따른 화강풍화토의 열전도도식을 이용하여 도출하였다. 시멘트 그라우트, PHC 파일, PB 파이프 그리고 순환수의 물성값은 관련 문헌을 참고하였다(정상섬 등, 2010). 또한 순환수온도는 열응답 실험데이터를 근거로 만든 함수식을 사용하여 투입하였다. 그림 3-2-42 은 현장 열응답 실험 시간에 따른 순환수 및 보어홀 벽면의 온도변화를 나타내고 있다. 그림 3-2-42(a)에서와 같이 수치해석과 실험에 의한 온도변화는 거의 일치한 것으로 나타났기에 수치해석을 통한 보어홀 벽면온도의 변화도 실험에 의한 계측값과 동일할 것으로 판단된다. 그림 3-2-42(b)에 의해 산정된 보어홀 벽면 온도값을 이용하여 식 (2.2.25)에 의해 산정된 보어홀 열저항값은 0.067 m·K/W 였다.

코일형 열교환기 열응답 실험 결과를 무한선형열원이론에 대입하여 산정된 지반의 열전도도의 적합성 검증을 위해 코일형 지중 열교환기의 열전달 거동을 적절하게 모사할 수 있는 식 (2.2.39)의 나선형 코일 열원 모델을 이용하여 열전도도를 도출하고자 하였으며 식 (2.2.39)와 식 (2.2.5)의 보어홀 열저항 식을 조합하면 식 (2.4.3)이 도출된다.

$$T_f = R_b q_l + \frac{q_l}{4\pi\lambda}\int_0^h \frac{erfc(A_-(u,z')/2\sqrt{\alpha t})}{A_-(u,z')} - \frac{erfc(A_+(u,z')/2\sqrt{\alpha t})}{A_+(u,z')}dz' + T_o \qquad (2.4.3)$$



(a) 순환수 온도변화 (b) 보어홀 벽면 온도변화

그림 3-2-42 시간에 따른 온도변화

22 시간에서 60 시간까지의 온도 데이터를 식 (2.4.4)와 같은 최소자승 오차의 개념을 도입하여 지반의 열전도도를 산출하였다.

$$SSE = \sum_{i=1}^{n} (T_{f,ex,i} - T_{f,i})^2 \quad (2.4.4)$$

$T_{f,ex,i}$ 는 열교환기 입,출구 유체온도의 평균값이며 $T_{f,i}$는 식 (2.4.3)에 의해 계산된 결과값을 나타낸다. 또한 i는 시간에 따른 측정순번이며 SSE는 자승오차의 합(sum of square error)이 된다. 즉 나선형 코일 열원 모델로부터 도출된 계산 온도와 열응답시험에서의 순환수 평균 측정 온도를 비교하여 두 온도의 차에 관한 자승오차를 계산하였다. 계산된 자승오차의 총합이 최소가 될 때를 기준으로 지반의 열전도도를 식 (2.4.3)을 이용하여 역해석으로 도출한 결과 지반의 열전도도는 $2.25\,W/mK$ 값을 보였다. 이는 식 (2.4.2)의 무한 선형 열원을 통해 도출된 열전도도 값과 거의 일치하였다.

따라서 코일형 지중 열교환기를 이용하여 지반의 열전도도를 산정하는데 있어서 일반 라인형 열교환기를 사용했을 때와 동일한 기준을 적용하면 큰 오류를 범한다는 것을 알 수 있다. 최소 60 시간 이상 연속으로 열응답 실험을 수행하여야 하며 준정상 상태가 도달되는 시간을 적절히 분석 후 초기 제외시간을 산정하여 무한 선형 열원 혹은 나선형 코일 열원을 적용하면 합리적인 열전도도를 산출할 수 있다는 것을 알 수 있다. 하지만 무한 선형 열원식은 식 (2.4.2)와 같이 간소화 될 수 있기에 복잡한 나선형 코일 열원보다는 보다 수월하게 지반의 열전도도를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

다. 현장 열성능 실험

지중 열교환기의 열교환율을 산정하기 위해서는 열전달 매개체의 열저항을 산출하여 열교환율을 산정하여야 한다. 본 연구에서는 실험을 통하여 열교환기로 유입되는 온도를 일정하게 제
어하고 유출수 온도를 측정한 후 식 (2.4.5)를 이용하여 열 교환율을 산정하였다.

$$Q = \dot{m}c\left(T_{f,inlet} - T_{f,outlet}\right)/L \quad (2.4.5)$$

여기서, $\dot{m}$은 순환수의 질량 흐름 속도(mass flow rate, kgs^{-1})이고 c 는 순환수의 비열 그리고 L 은 파일의 길이이다. 본 연구에서 제작된 열성능 실험기는 지중의 보어홀에 매설된 지중 열교환기 내부를 순환수로 공급하고 유체의 온도변화를 감지하는 시스템으로 구성되어져 있다. 지반의 유효 열전도도를 측정할 수 있는 열응답 실험 장치와 같이 순환수를 공급하는 수조 내에 히터를 통하여 일정한 전력을 공급할 수 있다. 또한 히터 내의 온도를 일정하게 제어할 수 있는 온도 제어기가 설치되어 있기에 지중 열교환기로 흘러가는 유입수 온도를 일정하게 유지하고 유출수 온도를 계측하면 지반과의 열교환율을 측정할 수 있는 기능도 탑재되어 있다. 즉 본 장비를 이용하면 지반의 열전도도를 측정할

수 있는 열응답 실험뿐만 아니라 열교환율을 측정할 수 있는 열성능 실험도 가능하다고 할 수 있다. 표 3-2-16 은 열성능 실험기의 제원을 나타낸다.

열응답 실험 후 동일한 지반 조건하에서 U, W, 2U 그리고 코일형 지중 열교환기가 설치된 보어홀에서 현장 열성능 실험을 실시하였다. 냉방 가동시를 모사하기 위해 지반으로 투입되는 온도는 31℃로 일정하게 제어하였으며 100 시간 연속 운영 조건과 부분운영조건(8 시간 운용, 16 시간 대기)으로 5 일간 진행하여 지중 열교환기 형태에 따른 열교환율을 산정하였다. 열응답 실험과 마찬가지로 난류 조건을 형성하기 위하여 유량은 6~8lpm 값으로 제어하였으며 입·출구 온도와 유량은 10 분 간격으로 실시간 계측 저장하였다.

표 3-2-16 열성능 실험 기기 상세 제원

Item	Specification	
Heater	Capacity 5kW	
Water Tank	20L (SUS 304)	
Flow meter	2~20 lpm	
Pump	40m head, 100lpm	
Sensor	RTD	

(1) 100 시간 연속 운전 실험 결과

U, W, 2U 그리고 코일형 지중 열교환기가 설치된 보어홀에 100 시간 동안 연속으로 열성능 실험을 수행한 후 식 (2.4.5)를 이용하여 100 시간 평균 열교환율 값을 산정한 결과 U 자형 열교환기 이용 시 35.71 W/m, W 자형 열교환기 이용 시 40.76 W/m, 2U 자형 이용 시는 39.03 W/m, 그리고 코일형 열교환기 이용 시 76.8 W/m 의 열교환율을 보였다. W 자형과 2U 자형 지중 열교환기 이용 시 U 자형에 비해 10~15% 정도 열교환율이 상승되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 W 자형과 2U 자형 지중 열교환기는 U 자형에 비해 더 넓은 열 교환 접촉 면적을 가지기 때문인 것으로 판단되며 W 자형이 2U 자형보다 4~5% 높은 열교환율 값을 보였으나 서로 간에 상대적인 우월성을 가지지는 않는 것으로 판단된다.

또한 코일형 지중 열교환기 이용 시 나머지 타입들보다 대략 2 배 정도 높은 열교환율을 나타내었는데 코일형 열교환기의 총 길이가 대략 350m 인 것을 감안하면 그만큼 그라우트와의 열 접촉 면적이 넓기에 높은 열교환율 값을 가지는 것으로 판단된다. 기존의 연구결과에서도 코일형 지중 열교환기는 일반 라인형에 비해 열 교환 능력이 우수한 것으로 알려져 있다(Cui et al, 2011; Man et al, 2010). 그림 3-2-43 는 100 시간 열성능 실험에 따른 열교환율을 보여주고 있다. 열교환율 값이 상대적으로 작은 U, W 그리고 2U 자와 같은 라인형 지중 열교환기는 실험 시작 후 대략 1000 분이 지난 후에 열교환율 값이 거

의 일정해지는 정상상태에 도달했음을 알 수 있었다. 하지만 코일형 지중 열교환기의 경우 실험 후 대략 3000 분 정도 지난 후 정상상태에 도달함을 보였는데 이는 코일형의 경우 지반 및 그라우트와의 열전달이 우수하기에 그만큼 라인형 열교환기보다 정상상태에 도달하는 시간이 오래 걸린다는 것을 알 수 있다.

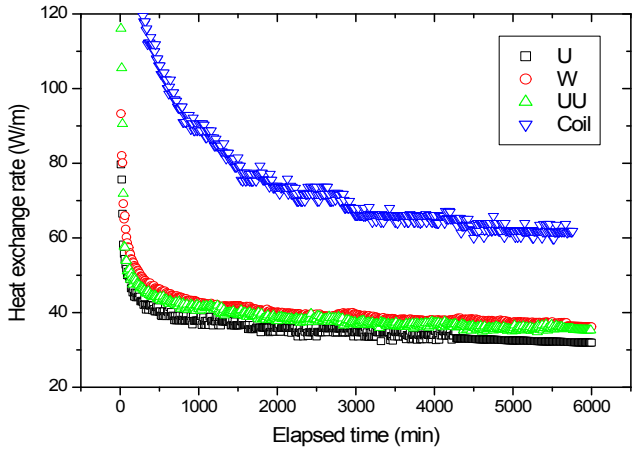


그림 3-2-43 100 시간 연속 운전 시 열교환율

(2) 부분 운전 실험 결과

실제 지열시스템 가동 시 현실적으로 연속 운전 조건보다는 법정 근로시간인 8 시간 운전 16 시간 휴지를 가정한 부분 운전 조건으로 5 일간 열성능 실험을 수행하였다. 연속 운전조건 결과로부터 W 자형과 코일형 지중 열교환기의 열교환율이 우수하게 나타났기에 부분 운전 조건의 열성능 실험에서는 W 자형과 코일형 열교환기에 대해 실시하였으며 유입수 온도 및 유량 등의 실험 조건은 연속 운전과 동일하였다. 그림 3-2-44 은 W 자형과 코일형 지중 열교환기 이용 시 5 일간 부분 운전에 따른 열교환율을 나타낸다. 5 일간의 부분 운전 실험 결과 W 자형 열교환기 이용 시 평균 열교환율 값은 54.16 W/m, 코일형 열교환기 이용 시는 평균 103 W/m의 열교환율 값을 보였다. 부분 운전 조건이 연속 운전 조건에 비해 30~40% 가량 높은 열교환 효율을 유발하는 것으로 나타났다. 이는 연속 운전 조건은 부분 운전 조건에 비해 지반으로 열이 계속 축적되기에 열전달 효율 감소가 크게 나타난 것으로 판단된다.

(3) 6 개월 장기성능 예측 결과

100 시간 연속 운전 실험 결과와 5 일 부분 운전 실험 결과 산출된 열교환율 값을 근거로 추세선 식을 산출하여 6 개월 냉방 가동 시 열교환율 값을 추정하였다. 부분 가동의 경우 W 자형과 코일형 지중 열교환기에 대해서만 수행하였기에 두 가지 형태에 대해서

만 6 개월 장기성능을 예측하였다. 그림 3-2-44 은 지중 열교환기의 6 개월 연속 운전 시 예상되는 열교환율을 나타내고 있으며 그림 3-2-45 는 W 자형과 코일형 지중 열교환기의 6 개월 부분 운전시 예측된 열교환율을 보여주고 있다. 표 3-2-17 는 지중 열교환기 형태별 실험결과와 6 개월 간 예측된 열교환율을 요약하여 보여주고 있다. 시간이 지날수록 지반으로 방출되는 열량이 축적되기에 그만큼 열교환율 값이 감소되는 것을 알 수 있다. 6 개월 예측에서도 부분 운전 조건이 연속 운전 조건에 비해 30~40% 가량 높은 열교환 효율을 유발하는 것으로 나타났다. 일반적인 수직 밀폐형의 열교환율이 40~70 W/m 정도인 것을 감안할 때(European Geothermal Energy Council, 2008) 본 연구에서 계측된 열교환율 값은 코일형을 제외하고는 다소 낮은 값을 나타내고 있다. 이는 설치된 보어홀 수직 깊이가 30~50m 로 얕고 지중 열전도도가 2.15 W/mK 근처로 다소 낮게 측정되었기 때문인 것으로 추정된다.

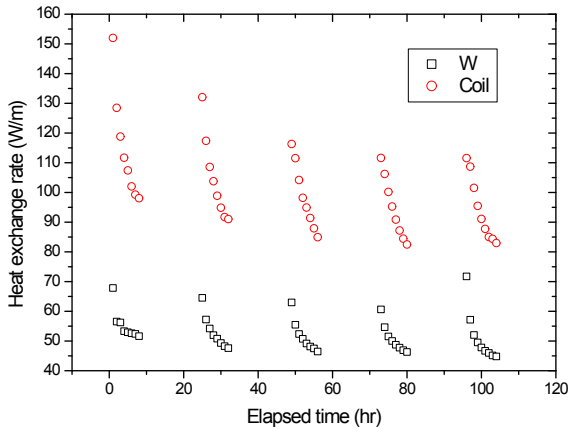


그림 3-2-44 5 일간 부분 운전 시 열교환율

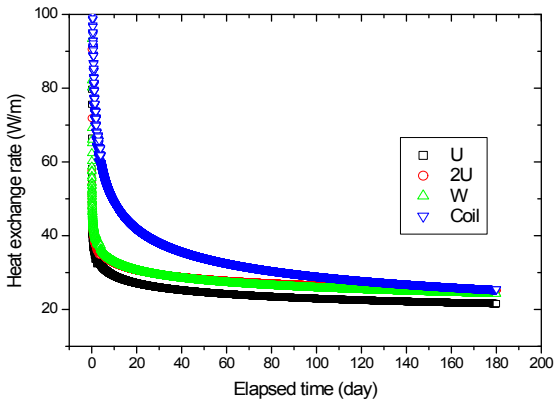


그림 3-2-45 6 개월 연속 운전 시 열교환율

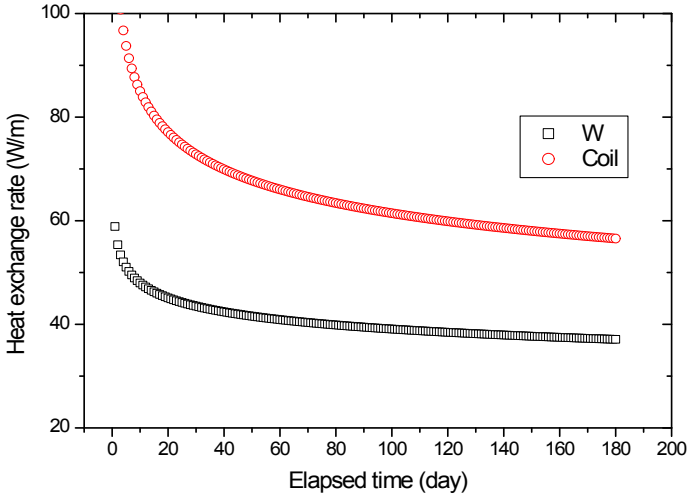


그림 3-2-46 6 개월 부분 운전 시 열교환율

표 3-2-17 열성능 실험 결과 요약

열교환기 종류	연속 운전 시 열교환율 (W/m)		부분 운전 시 열교환율 (W/m)							비 고
	100hr 평균	6개월 평균	1일	2일	3일	4일	5일	5일 평균	6개월 평균	
U자형	35.74	24.10	-	-	-	-	-	-	-	
W자형	40.76	27.11	58.7	55.6	53.6	52.2	50.7	54.2	40.63	부분운전 실험추가
2U자형	39.03	27.62	-	-	-	-	-	-	-	
Coil형	76.8	32.84	117.5	107.1	100.6	96.4	94	103.1	65.6	부분운전 실험추가

라. 보어홀 열저항 산정 모델 검증

앞에서 살펴본 바와 같이 현장 열성능 실험으로부터 지중 열교환기의 열교환율 값을 산정할 수 있다는 것을 알았다. 열교환율은 식 (2.4.6)과 같이 열교환기 내부를 순환하는 순환수 온도의 평균과 지반의 초기온도 차이를 열전달 매개체의 전체 열저항 값으로 나눠준 값이다.

$$q = \frac{\overline{t_f} - t_\infty}{\sum R} = \frac{(t_i + t_0)/2 - t_\infty}{\sum R} \tag{2.4.6}$$

여기서 전체 열저항은 식 (2.4.7)과 같이 보어홀의 열저항과 지반의 열저항의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\sum R = R_b + R_{soil} = R_{cond} + R_{conv} + R_{grout} + R_{soil} \tag{2.4.7}$$

열성능 실험 결과로부터 알 수 있듯이 시간이 지날수록 열전달 매개체로 열이 축적되기에 열저항 값은 증가하며 따라서 열교환율 값은 감소하는 모습을 보인다.

본 절에서는 보어홀 열저항 산정 모델을 검증하기 위하여 식 (2.4.6)을 이용하여 열성능 실험에서 구한 열교환율 값과 이론해로 계산된 열교환율 값을 비교하고자 하였다. 본래 보어홀 열저항은 순환수 온도와 보어홀 벽면의 온도차를 가지고 구할 수 있으나 실증 실험에서 보어홀 벽면에 온도 센서를 설치하는 것은 시공 상 불가능하기에 식 (2.4.6)의 열교환율 값을 산정하여 비교하였다. 식 (2.4.7)의 보어홀의 열저항 값은 2.2 절에서 소개된 보어홀 열저항 모델들에서 언급된 값을 각각 이용하였다. 지반의 열저항은 식 (2.2.20)의 무한 선형 열원 모델 값을 이용하여 산정하였으며 동일한 값을 적용하였다. 보어홀 열저항 모델은 2.2 절에서 소개된 방법들인 Shape factor method(SF), Equivalent diameter method(EQD) 그리고 Multipole method 를 이용하여 보어홀 열저항 값을 산출하였다. 이때 세 가지 모델 모두 보어홀 내부에서 열교환기 파이프 배치가 정확히 고려되어져야 한다. 따라서 U, W 그리고 2U 형과 같은 라인형 열교환기는 파이프 배치가 정확히 고려될 수 있으나 코일형의 경우 코일 피치별 간격에 따라 배치가 정확하지 않기에 보어홀 열저항 모델 값을 적용할 수가 없었다.

(1) Mockup 실증 실험 결과와 해석 모델 비교

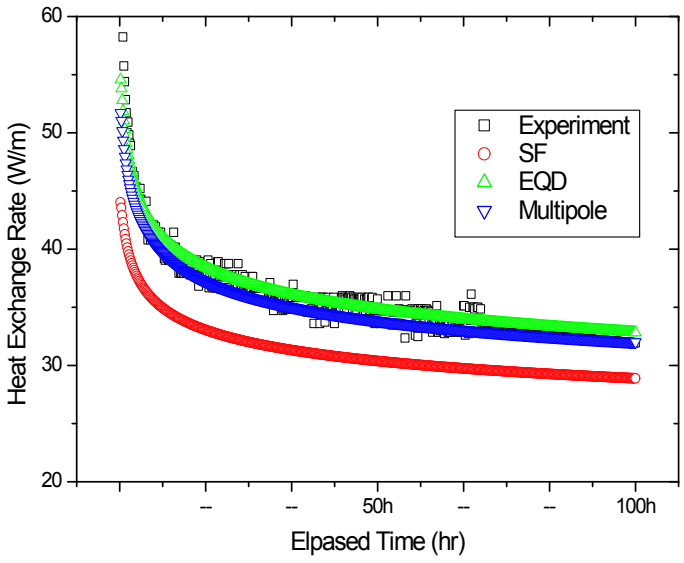
앞에서 소개된 Mockup 100 시간 연속 운전 실험 결과와 보어홀 열저항 이론해를 이용하여 열교환율 값을 산정하였다. 지중 열교환기 타입은 U 자형과 W 자형이 적용되었으며 U 자형의 경우 표 3-2-3 의 B case 처럼 시공되었기에 SF 에 적용된 계수는 B case 의 값을 적용하였다. 그러나 W 자형의 경우 A 와 B case 의 중간 형태로 시공되었기에 W 자형에서 SF 에 적용된 계수는 표 3-2-3 의 A 와 B case 의 값을 근거로 보간법(interpolation)을 적용하여 산정하였다. 이론해와 100 시간 열성능 실험 결과 산정된 평균 열교환율은 표 3-2-18 와 그림 3-2-47 과 같다. 보어홀 열저항 산정 모델의 정확성을 검증하기 위해 표 3-2-19 과 같이 실험값과의 비교를 통해 상대오차와 RMSE(root mean square error)를 도출하였다. 비교 결과 SF 방법은 열교환율 값을 과소평가하며 EQD 와 Multipole method 가 실험값과 비슷한 결과를 나타낸다는 것을 알 수 있다.

표 3-2-18 실증 실험과 해석 모델 결과

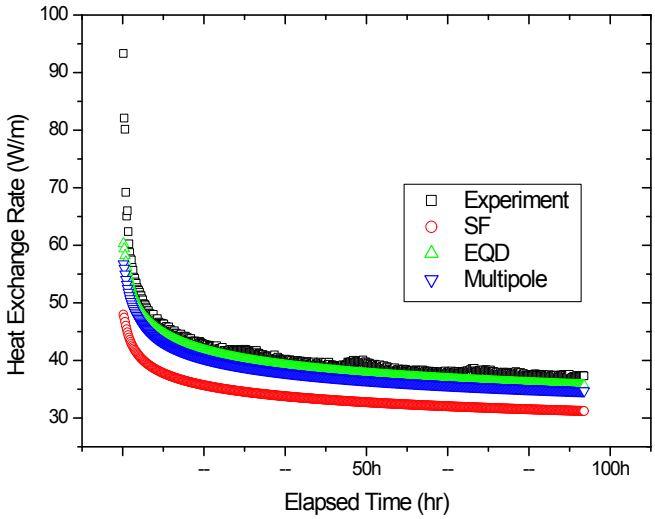
	Heat exchange rate (W/m)			
	SF	EQD	Multipole	실험
U type	31.20	35.96	34.91	35.71
W type	33.78	39.14	37.96	40.76

표 3-2-19 실증 실험과 해석 모델 비교

	Relative error			RMSE		
	SF	EQD	Multipole	SF	EQD	Multipole
U type	0.123	0.021	0.022	5.081	1.724	2.033
W type	0.168	0.037	0.066	7.346	2.522	3.505



(a) U 자형 지중 열교환기



(b) W 자형 지중 열교환기

그림 3-2-47 6 개월 부분 운전 시 열교환율

(2) 모형토조 실험 결과와 해석 모델 비교

앞에서 소개된 Mockup 실증 실험 부지의 지반의 열전도도는 2.1~2.2 W/mK값을 보였으며 보다 낮은 열전도도에서의 보어홀 열저항 모델을 비교 검증하고자 그림 3-2-48 와 같이 5m x 1m x 1m 사이즈의 모형토조를 이용하여 W 자형 지중 열교환기를 매설 후 열응답 실험을 수행하였다. 토사는 주위지반을 시뮬레이션 한 것으로 1 차원 모델과 조화되기 위해서는 모래 영역도 원통형으로 이루어져야 하나 제작상의 어려움으로 인하여 사각형 형태로 만들어졌다. 모형토조 내 토사는 주문진 표준사가 사용되었으며 표준사를 균질하게 조성하는 것이 쉽지는 않았으나 분산 시스템에 근거하여 최적의 낙하높이와 분산체 공칭치수에 맞추어 $\gamma_d = 14.97 KN/m^3$를 갖도록 최대한 균질하게 조성하였으며 실내 실험에서 구해진 열전도도 값은 0.26 W/mK 였다. 주문진 표준사의 기본 물성은 표 3-2-20 과 같으며 그림 3-2-49 는 지중 열교환기를 나타낸다.



그림 3-2-48 모형토조

표 3-2-20 주문진 표준사의 기본 물성

Properties	Value	Properties	Value
Uniformity Coefficient (C_u)	2.06	Maximum Dry Density (KN/m^3)	16.17
Curvature Coefficient (C_c)	1.05	Minimum Dry Density (KN/m^3)	13.49
Specific Gravity (G_s)	2.65	Water Content (%)	0

그림 3-2-49 와 같이 W 자형 지중 열교환기 설치 후 그림 3-2-50 과 같이 원형의 보어홀을 구현하기 위하여 보어홀 벽면 지점에 온도 센서를 설치하여 보어홀 벽면의 온도로 가정하였다. 또한 모형토조에서 구현된 보어홀 내의 물성은 주문진 표준사의 물성과 동일하다고 할 수 있다.



그림 3-2-49 W 자형 지중 열교환기

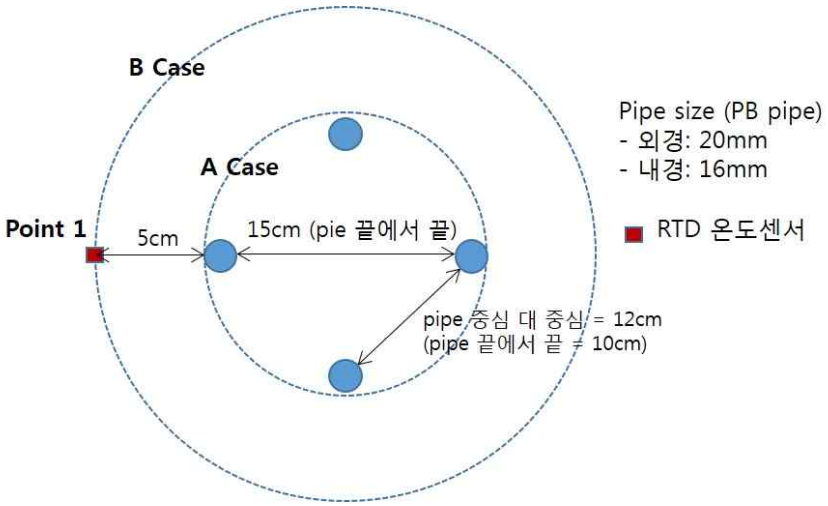


그림 3-2-50 보어홀 벽면온도 배치도

약 24 시간 동안 240W 의 열량을 투입하여 열응답 실험을 진행하였다. 그림 3-2-14 에서 보어홀 가상 벽면에서 측정된 온도 값을 가지고 식 (2.2.)에 대입하여 정상상태에서의 보어홀 열저항 평균값을 산정하였다. 실증 실험과 마찬가지로 보어홀 열저항 모델은 Shape factor method(SF), Equivalent diameter method(EQD) 그리고 Multipole method 를 이용하여 이를 실험 결과를 모사한 수치해석 결과와 비교하였다. 이는 실험 결과만으로는 임의로 설정된 보어홀 벽면의 평균온도를 계산할 수 없기 때문이다. 따라서 그림 3-2-51 과 같이 실험데이터를 유한요소모델에 주입하여 실험과 동일한 거동을 모사하는 수치해석을 개발하였고, 이 수치모델을 통해 보어홀 벽면 온도 및 보어홀 열저항을 간접적으로 계산하였다.

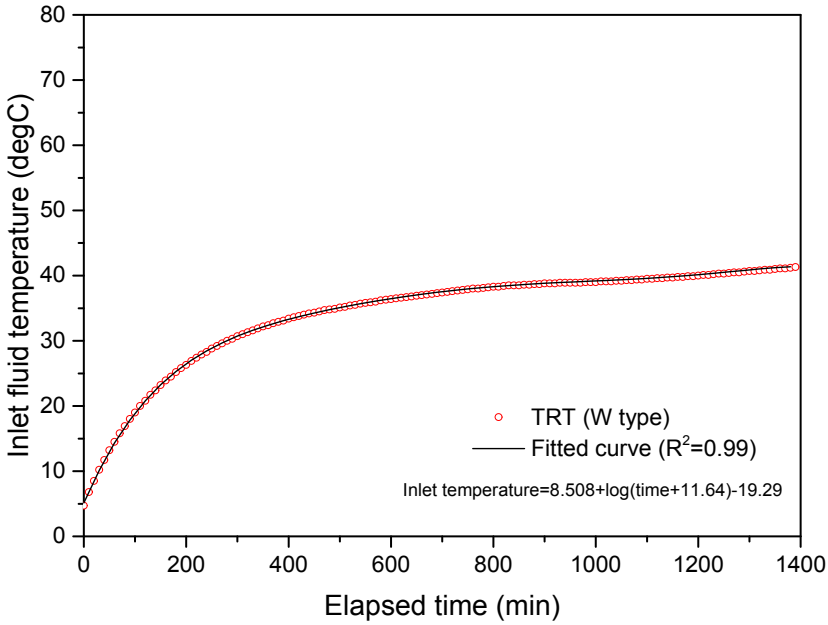


그림 3-2-51 입구 순환수 온도 변화 및 회귀식

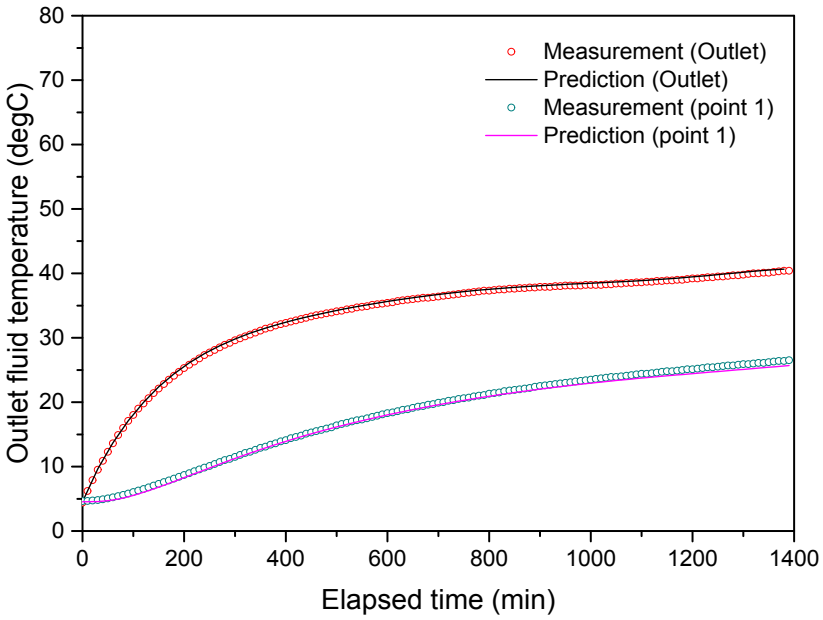


그림 3-2-52 실험 및 수치해석의 온도분포 양상

그림 3-2-52 은 개발된 수치해석이 실험결과를 합리적으로 모사하고 있음을 보인다. 수치해석의 가장 큰 장점 중 하나는 원하는 위치에서의 온도변화를 손쉽게 확인할 수 있다는 것이다. 수치해석 모델을 통해 임의로 선정한 보어홀 벽면의 평균온도를 계산하여 열저항 값을 도출하였다. 표 3-2-21 은 실험을 근간으로 한 수치해석 값이 Multipole 해석해 값과 상대적으로 가장 유사하게 나타냄을 보여준다. 이는 Shape factor method(SF),

Equivalent diameter method (EQD) 방법은 지반의 열전도도를 고려하지 못하나 Multipole 방법은 지반의 열전도도에 따라 보어홀 열저항이 변하는 것을 고려하기 때문인 것으로 파악된다. 하지만 지반의 열전도도가 $2\,W/mK$ 이상인 경우에는 EQD 와 Multipole method 에 의한 결과가 유사하게 나타났기에 두 모델을 적용해도 무방할 것이다. 반면 $1\,W/mK$ 이하인 경우처럼 지반의 열전도도가 낮은 지역에 지중 열교환기를 설치할 경우에는 Multipole method 를 이용하는 것이 보다 정확한 설계 값을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

표 3-2-21 모형토조 실험과 해석 모델 비교

W자형	보어홀 열저항 (mK/W)			
	SF	EQD	Multipole	수치해석
B case	0.467	0.705	0.524	0.542
C case	0.433	0.563	0.227	0.254

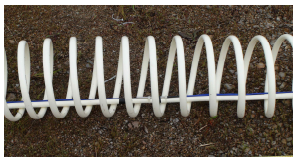
마. 수직밀폐형 Mockup1 경제적 시공평가

(1) 경제적 시공방안 검토

지열 열펌프 시스템(GHPS, ground heat pump system)의 전체 성능은 지중 열교환기(GHE, ground heat exchanger)의 성능에 크게 영향을 받게 된다. 뿐만 아니라, 전체 공사비에서 GHE 시공비용이 가장 큰 비율을 차지하기 때문에 경제적으로도 매우 중요한 부분이다. 결국 시공 측면에서 경제적이고 성능 측면에서 열교환 성능이 우수한 GHE 유형이 적용되어야한다.

따라서 본 장에서는 2 장에서 소개된 2 차년도 Mockup Test 에 적용된 GHE 의 유형별 시공비, 시공성, 열교환 효율에 따른 경제적 시공 방안을 제시하고자 하였다. 이 때 실제 시공비와 열교환율은 정략적 경제성 평가에 사용되었고, 시공성은 정성적 경제성 평가에 사용되었다. 또한 Mockup Test 에 사용된 PB(Polybutylene) 파이프 관경이 일반적인 40(내경)mm PE (polyethylene) 파이프 보다 작기 때문에 GLD(Ground Loop Design) Program 을 이용하여 PE 40mm U 자형과 다양한 관경의 PE W 자형과의 천공 깊이를 비교하여 경제적인 시공 방안을 검토하였다.

표 3-2-22 열교환기 파이프 Type 별 설치 현황

Classification	유형별 사양		
name	U자형	W자형	코일형
System Type	Vertical Closed Ground Loop System		
파이프 Type			
Borehole	Diameter : 150 mm Depth : 50 m	Diameter : 150 mm Depth : 50 m	Diameter : 300 mm Depth : 30 m
파이프	Diameter : 20 mm PB(Polybutylene)	Diameter : 20 mm PB(Polybutylene)	Diameter : 20 mm PB(Polybutylene)
열교환 파이프 설치 깊이	50m	50m	25~30 m
특징	파이프 : 기성 제품 별도의 연결 잭 이용 	파이프 : 기성 제품 별도의 연결 잭 이용 	공장 주문 제작 

GHE 유형별 경제적 시공 방안 검토는 표 3-2-22 와 같이 Mockup Test 를 위해 인천국제공항 제 2 여객터미널 설치부지에 시공된 U 자형, W 자형 그리고 코일 타입의 시공비를 산정하여 각각 비교하였다. 이때 설치된 파이프는 동일 조건에서 열성능 비교 및 코일관 성형을 위해 일반적으로 지중 열교환기로 사용되는 PE 관 대신 성형이 용이한 PB 관을 이용하였다. 또한 코일형 성형이 가능한 관경을 고려하여 모든 열교환 파이프 관경(내관)을 20mm 로 적용하였다.

(2) 정량적 비교 (시공비)

(가) Mockup Test 시공비용

파이프 유형별 시공비용은 표 3-2-23 과 같다. 이를 이용해 시공비 비교와 동시에 Mockup Test 결과(열교환율)를 기준으로 산정된 유형별 천공 깊이에 따른 시공비 산정을 위한 기초 자료로 활용하였다. 표 3-2-23 에서 천공 지름이 300 mm 인 코일 타입의 경우 boring, casing, grouting, 파이프 비용이 U 자형과 W 자형 보다 2 배 이상의 비용이 소요됨을 알 수 있다. 이는 U 자형 대비 W 자형의 경우 1.06 배 이상, 코일형의 경우 1.9 배 이상의 열교환 성능을 가져야 경제성을 가질 수 있다. 하지만 이는 단순한 시공비 부분만을 비교한 결과를 보여주는 것이므로 각 유형별 열교환 성능에 따른 시공비를 표 3-2-23 의 단가를 기준으로 재 산정하여 비교하였다.

표 3-2-23 1차 Mockup Test 시공비

Classification		U자형	W자형	코일형
Movement of Equipment(₩)		1,200,000	1,200,000	1,200,000
Boring	unit cost(₩/m)	30,000 (Diameter : 150 mm)	30,000 (Diameter : 150 mm)	70,000 (Diameter : 300 mm)
	Depth(m)	50	50	50
	Cost(₩)	1,500,000	1,500,000	3,500,000
Casing	unit cost(₩/m)	20,000 (Diameter : 150 mm)	20,000 (Diameter : 150 mm)	50,000 (Diameter : 300 mm)
	Length(m)	30	30	30
	Cost(₩)	600,000	600,000	1,500,000
파이프(₩)		180,000	360,000	600,000
Installation of 파이프(₩)		100,000	150,000	150,000
Grout Material(₩)		200,000	200,000	400,000
Grouting(₩)		150,000	150,000	150,000
Total(₩)		3,930,000	4,160,000	7,500,000

(나) 열교환율에 따른 시공비 비교

실제 지중 열교환기 운영에 있어서 지반에서 얻을 수 있는 연속적인 또는 부분적인 열량이 중요한 인자이다. 따라서 Mockup Test를 통해 지중 열교환기 유형별로 연속 가동 및 부분 가동을 통해 표 3-2-24과 같은 결과 도출하였다. 표 3-2-24의 결과를 이용해 유형별 상대적 천공 깊이를 산정하였다. 이 때 코일 타입의 경우 열성능이 가장 우수하지만 파이프의 제작 및 천공 비용 등 경제적 측면에서 U자형과 비교하여 설치비용 증가(2배) 및 시공의 어려움 등으로 인해 수직 밀폐형 지중 열교환기에는 적용하기 어려울 것이라 판단되어 경제적 시공 방안 검토에서 제외시켰다.

반면 본 시험 조건에서 W자형의 경우 U자형과의 연속가동(연속가동 100시간 및 3개월, 6개월)을 비교하였을 때 약 13~14% 정도 열성능이 높았다. 이 경우 천공 깊이를 약 100m 당 15m 가량 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 부분 가동의 경우 열 성능의 차이가 더 커질 것으로 예상된다. 일반적으로 지열의 경우 대부분 낮 시간에 가동되고 저녁

시간에 휴지되는 경우가 있어 부분 가동에 대한 값이 중요하지만, 공항의 여객 터미널의 경우 24 시간 또는 6 개월 이상의 연속 가동이 예상되기 때문에 연속가동 결과를 비교 검토하였다.

또한 표 3-2-25 와 같이 Mockup Test 와 동일한 조건에서 유형별로 460 개소 설치 시 (인천국제공항 제 2 터미널 설계 대안) GLD program 을 이용한 보어홀 깊이를 계산하였을 때 U 자형 경우 104,688m, W 자형은 89,569m 로 현장 검증 시험과 유사하게 약 14% 정도의 열효율 차이가 발생함을 알 수 있었다.

경제성 부분에서 비교하여 보았을 때, Mockup Test 의 현장 공사비를 참고로 작성한 표 3-2-26 와 같이 천공 깊이를 15m 정도 줄였을 경우 1 공당 U 자형 대비 약 10%(250,000 원) 정도 절감됨을 알 수 있었다. 따라서 수직 밀폐형에서는 W 자형이 적절하리라 판단되며, 에너지파일 같이 별도의 천공비용이 소요되지 않으며 pile depth 가 정해져 높은 성능이 필요한 곳에는 코일 타입이 적절하리라 판단된다.

표 3-2-24 열교환기 형태별 열성능 평가

Classification	U자형	W자형	코일형	Note
열전도도	2.13	2.15	2.17	
Borehole Thermal Resistance	0.215	0.208	-	
연속가동 (계측 100시간)	35.74 W/m	40.76 W/m (W)	76.8 W/m	100시간 연속운전 (Tin=30도)
연속가동 (3개월/6개월)	3개월 : 25.90 W/m 6개월 : 24.10 W/m	3개월 : 29.19 W/m 6개월 : 27.11 W/m	3개월 : 38.35 W/m 6개월 : 32.84 W/m)	100시간 연속운전 추세선 예측
부분가동 (계측 5일)	-	54.16 W/m	103 W/m	8hr 가동 16hr 휴지
부분가동 (3개월/6개월)	-	3개월 : 43.15 W/m 6개월 : 40.63 W/m	3개월 : 72.10 W/m 6개월 : 65.58 W/m	추세선 예측

표 3-2-25 GLD Program 기본 입력 변수

Classification	U자형	W자형
Annual Equivalent Full-Load Hour (hr)	▪ Cooling : 884, ▪ Heating : 1,030	
Heating Pump	▪ COP : 4.4(Cooling), 3.8(Heating) ▪ Flow Rate : 10.4 (L/min)/3.5kW	
Unit Inlet (℃)	▪ Cooling : 30, ▪ Heating : 5	
Solution Properties	▪ Fluid Type : Ethanol, 20% ▪ Specific Heat : 4.124 kJ/K・kg ▪ Density : 969.1 kg/㎥	
Ground Condition	▪ Ground Temperature : 16.7 ℃ ▪ Thermal Conductivity : 2.46 W/m・K ▪ Thermal Diffusivity : 0.051 ㎡/day	
Modeling Time Period (yr)	20	
Borehole Thermal Resistance (m・K/W)	0.215	0.208
Borehole Diameter (mm)	150 mm	
Back fill Thermal Conductivity (W/m・K)	0.99	
Vertical Grid Arrangement	▪ Borehole Number : 460, ▪ Rows Across : 23 ▪ Rows Down : 20, ▪ Borehole Separation : 6 m	
Boreholes per Parallel Circuit	U-Tube Singe	U-Tube Double
파이프 Parameters	파이프 Resistance : 0.061	파이프 Resistance : 0.041
	▪ 파이프 Type : SDR 11, ▪ Flow Type : Turbulent ▪ 파이프 Size : 3/4 in. (20 mm) ▪ Outer Diameter : 26.70 mm ▪ Inner Diameter : 21.80 mm	

표 3-2-26 U 자형, W 자형 1 공당 비용 분석

Classification		U자형	W자형	Note
Bore hole		Diameter : 150 mm Depth : 100 m	Diameter : 150 mm Depth : 85 m	100hr 열교환율 실험 데이타 근거 견적 : 50홀 이상 기준 (실행가)
Movement of Equipment (\)		1,200,000	1,200,000	
Boring	unit cost (\/m)	30,000	30,000	
	Depth (m)	100	85	
	Cost (\)	3,000,000	2,550,000	
Casing	unit cost(\/m)	20,000	20,000	
	Length (m)	30	30	
	Cost (\)	600,000	600,000	
파이프 (\)		330,000	580,000	
Installation of 파이프 (\)		300,000	300,000	
Grout Material (\)		300,000	250,000	
Grouting (\)		200,000	200,000	
Total (\)		5930,000	5,680,000	

(다) 열교환 성능에 따른 GLD를 이용한 경제성(U, W 자형) 검토

본 연구의 Mockup Test는 동일한 조건(PB관, 관경 20mm)에서의 파이프 유형별 열교환 성능을 비교하였다. 따라서 일반적으로 사용되는 U자형(40mm PE관)과의 비교를 위해 파이프 Resistance, 파이프 Size만을 표 3-2-27와 같이 변경하여 GLD Program을 이용해 천공 깊이를 산정하였다. 이 때 W자형의 보어홀 지름 150mm에 파이프 지름 20mm, 25mm, 32mm가 각각 설치된 경우와 보어홀 지름 150mm에 파이프 지름 40mm U자형 경우를 비교하였다. 그 결과는 표 3-2-28와 같다.

파이프 지름을 20mm로 하였을 때는 그림 3-2-53와 같이 보어홀 총길이가 90,321.9m(U자형) 89.569m(W자형)으로 약 0.8% 정도의 길이가 줄어 실제 시공시 W자형의 시공성 및 Zoning 구성의 어려움으로 경제적이지 못함을 알 수 있었다.

표 3-2-27 파이프 Type별 GLD Program 입력변수

Classification	U자형 Borehole Diameter 150 mm	W자형 Borehole Diameter 150 mm
Boreholes per Parallel Circuit	U-Tube : Singe	U-Tube : Double
Borehole Thermal Resistance (m · K/W)	0.176	0.175 (20 mm) 0.158 (25 mm) 0.142 (32 mm)
파이프 Parameters	파이프 Resistance : 0.061	파이프 Resistance : 0.041
	파이프 Size : 1 1/2 in. (40 mm) Outer Diameter : 48.3 mm Inner Diameter : 39.40 mm	파이프 Size : 3/4 in. (20 mm) Outer Diameter : 26.70 mm Inner Diameter : 21.80 mm
		파이프 Size : 1 in. (25 mm) Outer Diameter : 33.40 mm Inner Diameter : 27.30 mm
		파이프 Size : 1 1/4 in. (32 mm) Outer Diameter : 42.20 mm Inner Diameter : 34.50 mm

표 3-2-28 GLD Program 열교환기 유형별 해석결과

파이프 Type	파이프 Size (mm)	Borehole Number	Total Length (m)	Borehole Length(m)	Ground Temperature Change(℃)
U자형	40	460	90,322	196	Cooling : +0.7, Heating : +1.0
W자형	20	460	89,569	195	Cooling : +0.7, Heating : +1.0
	25	460	84454	184	Cooling : +0.7, Heating : +1.0
	32	460	79852	174	Cooling : +0.7, Heating : +1.1



그림 3-2-53 U(40 mm), W 자형(20 mm) 파이프 관경별 GLD 해석 결과

반면, W 자형 파이프의 지름이 25mm, 32mm 인 경우에는(GLD Program 에서 제시한 파이프 지름 : 20, 25, 32, 40mm) 그림 3-2-54, 그림 3-2-55 와 같이 각각 84,453m, 79,852m 로 총 천공 길이가 상당히 줄어든다. W 자형 파이프 지름이 25mm 경우 약 6,000m 절감효과가 있었고 이를 공당 수직 길이 200m 로 환산하면 약 30 공을 절감할 수 있다. 이 때 보어홀 길이를 더 줄일 수 있는 32mm 관은 보어홀 관경이 150mm 의 경우 그라우팅재료의 시공성 등이 문제가 될 수 있을 것으로 사료되어 25mm 의 파이프 직경으로 시공하는 것이 시공적면이나, 경제적, 효율적인 면에서 40mm U 자형 열교환 파이프보다는 우수할 것이라 판단된다.



그림 3-2-54 W 자형(25 mm)
파이프 관경 GLD 해석 결과



그림 3-2-55 W 자형(32 mm)
파이프 관경 GLD 해석 결과

(3) 정성적 비교 (시공성)

GHE 의 경제적인 시공 방안 제시를 위해 시공비용 및 효율뿐만 아니라 시공성 및 운영 등에 대한 평가가 병행되어야 한다. 따라서 본 장에서는 시공과정에서 확인할 수 있었던 열교환기 파이프 유형별 시공성과 전문가 및 현장 실무자들의 자문을 토대로 유형별 시공성에 대한 정석적인 평가 결과를 제시하였다.

(가) 열교환기 타입별 시공성 검토

열교환기 파이프 유형별 시공성 평가는 파이프의 설치(Mockup Test)에 따른 작업성 비교를 통해 이루어졌으며 이를 정성적 결과로 제시하였다. 평가 대상은 일반적으로 시공되는 40mm U 자형, 20mm W 자형, 20mm 코일형으로 각각의 설치 작업의 난이도 정도를 평가하였다.

각 유형별 설치 작업에 대한 계략적 내용은 다음과 같다. 일반적으로 시공되는 40mm U 자형의 경우 그림 3-2-56 와 같이 보어홀에 들어가는 첫 부분이 곧게 들어갈 수 있도록 사전처리한 후 설치하게 된다.

W 자형의 경우 일반적인 40mm U 자형의 설치와 비슷하게 진행되며 작업 난이도 역시 U 자형과 비슷한 난이도를 보였다. 하지만 W 자형 적용 시 U 자형 배관 2 개를 삽입하고 상부배관을 연결하는 공정이 추가되며 설치비용등에서 추가비용이 발생할 수 있고, 시공이 어려울 수 있기 때문에 이에 대한 충분한 고려가 필요하다.



그림 3-2-56 U 자형(40 mm) 설치 작업



그림 3-2-57 W 자형(20 mm) 설치 작업

코일 타입의 경우 파이프가 보어홀에 잘 삽입될 수 있도록 사전에 적정 길이에 맞게 펼쳐 놓아야 하며 삽입 시 파이프가 적정 간격을 둘 수 있게 hole 입구에서 조절하여 주입해야 하기 때문에 별도의 인원과 파이프의 뒷부분을 잡아주는 추가적인 인원이 필요하였다. 따라서 앞에서 언급한 U 자형과 W 자형의 작업보다는 상대적으로 작업이 어려웠다. 또한 깊이가 더 깊어지면 작업이 더 어려워질 것으로 판단되어 이는 일정한 깊이가 정해진 에너지파일이나 50m 이하의 수직 밀폐형에 적용하는 것이 적당하리라 판단된다.

각 유형별 작업에 대한 난이도를 평가하기 위해 일반적인 40 mm U 자형의 설치 난이도를 상-중, 상, 중, 하로 규정하고 이를 기준으로 W 자형, 코일 타입 유형에 대한 난이도를 확인 할 수 있게 작업에 참여했던 인원에 대해 평가 조사를 실시하였다. 그 결과 표 .3-2-29 과 같이 W 자형의 경우 U 자형과 동일한 난이도인 하 정도로 평가되었고, 코일형의 경우 중 또는 상으로 평가되었다.

따라서 파이프 유형별 시공성을 평가하였을 때 코일 타입의 경우 성능은 우수하지만 별도의 천공작업이 없는 에너지 파일에 적합하리라 판단된다. 하지만 W 자형의 경우 현재 주로 적용되는 U 자형과 비슷한 시공성을 보였다.



그림 3-2-58 코일 타입(20 mm) 설치 작업

표 3-2-29 파이프 유형별 작업성 평가

평가인원	U자형 (40mm, 20mm)	W자형 (20 mm)	코일형 (20 mm)
현장 작업자-1	하	하	중
현장 작업자-2		하	상
현장 작업자-3		하	중
시공 관계자-1		하	상
시공 관계자-1		하	중
현장 감독자-1		하	상
현장 감독자-2		하	상
평균	하	하	상-중

(나) 시공 및 운영시 검토 항목

U 자형과 시공성이 비슷하고 경제적인 W 자형의 현장 적용 및 운영서 고려사항을 지열 시공 및 설계 전문가의 자문을 통해 다음과 같이 정리하였다.

- W 자형 상부 연결부 Air-Pocket 현상

W 자형 적용시 그림 3-2-59 와 같이 상부 연결된 부분에서 에어포켓 현상이 발생할 수 있으므로 순환수의 순환이 잘 되지 않는 경우가 발생할 수 있어 순환수가 적정한 수압을 가져야 한다. U 자형의 경우 일정 수압으로 난류를 형성해야 하는데 W 자형 적용 시 난

류형성이 가능한 적정한 수압을 검토하여야 할 필요가 있다. 단 상부 에어포켓 현상의 경우 U 자 관을 서로 연결하지 않고 U 자 2 개(2U)를 한 보어홀에 설치하는 형태로 이 문제를 해결할 수 있으리라 판단되며, 이때 열성능 대한 별도의 검증이 이루어져야 한다.

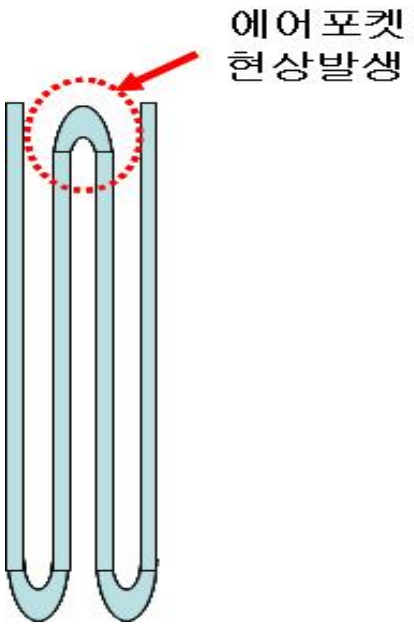


그림 3-2-59 AirPocket

- 시공시 그라우팅 트리미관 공간 확보 검토

150 mm 보어홀에 W 자형 설치 및 그라우팅 시 그림 3-2-60 과 같이 그라우팅 트리미관에 필요한 공간이 확보되어야 하는데 외경 34mm 관이 사용될 경우 그림 3-2-61 와 같이 보어홀 표면에 열교환 파이프가 닿게 되면 트리미관 삽입 공간 확보가 어려울 수 있어 보어홀을 200 mm 로 키워야 하는 경우가 발생할 수도 있다. 이는 그림 3-2-62 과 같이 실제 40mm U 자형 파이프 설치 시 여유 공간 및 트리미관 주입 작업이 이상 없이 진행되었음을 감안하면 작업에 지장이 없으리라 판단되지만, 실제 상황을 모사하여 평가할 필요가 있다.

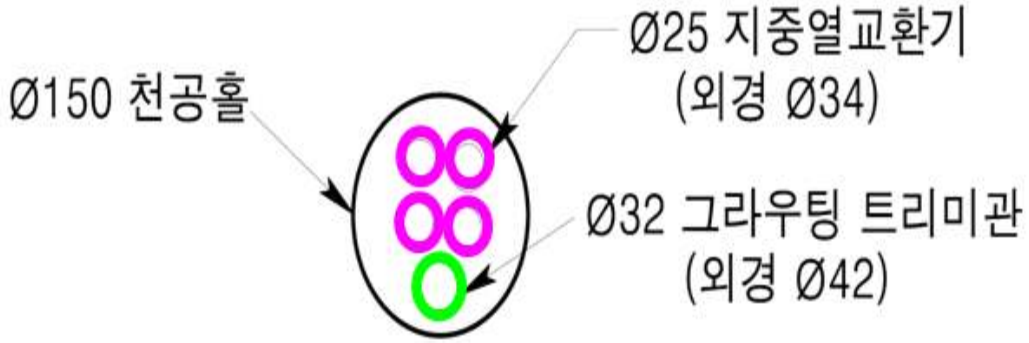
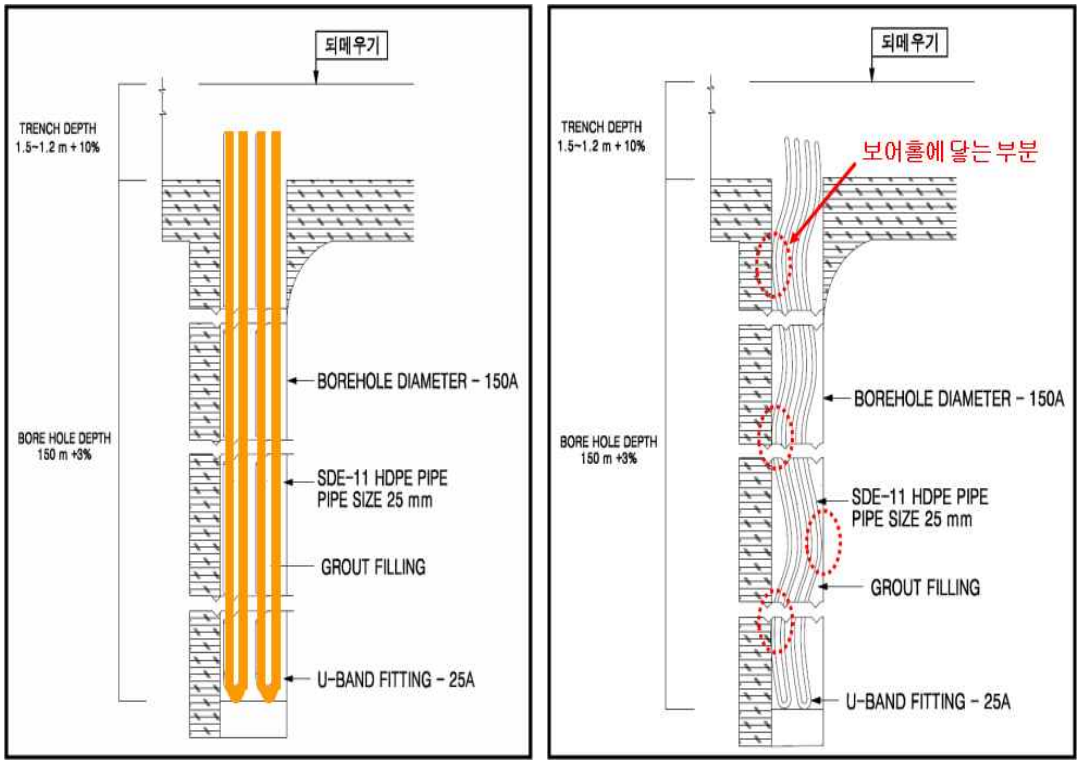


그림 3-2-60 W 자형 파이프(25 mm) 설치 Plane view



(a) 이론적인 상태 (b) 실제 시공 상태

그림 3-2-61 W 자형 파이프(25 mm) 설치 Plane view



그림 3-2-62 U 자형 파이프(40 mm) 트리미관 삽입 모습

(다) 시공 및 운영시 검토 항목

앞에서 언급한 W 자형 시공 대안으로 본 연구에서는 시공 시 파이프의 위치와 그에 따른 시공방안을 제시하고자 한다. W 자형 적용 시 그라우팅 작업을 위한 공간 확보를 위

해 그림 3-2-63 와 같은 파이프 및 트리미관 배치가 적절하리라 판단되며 이 때 열교환기 파이프의 경우 서로 붙어있는 것보다는 보어홀 벽면에 최대한 밀착한 상태로 설치해야 더 큰 성능을 발휘할 수 있으리라 판단되다. 이와 같은 상태로 시공이 가능하다면 보어홀의 직경 확장 없이 시공이 가능하리라 판단된다. 또한 그림 3-2-61 에서 알아본 바와 같이 직선으로 파이프 시공이 어려울 경우 그림 3-2-64 과 같이 간격재 등을 이용한 시공방법을 적용하는 것이 적절하리라 판단된다.

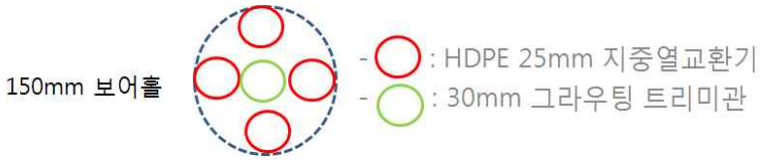


그림 3-2-63 W 자형 파이프(25 mm) 배치 도면



그림 3-2-64 간격재를 사용한 W 자형 설치

바. 에너지파일을 이용한 현장 열응답 시험

(1) 현장 열응답 시험

본 연구에서는 에너지파일을 이용한 Mockup2 지열시스템을 가동하고자 한다. 시스템 가동 및 개요에 대한 자세한 설명은 6 절에서 하고자 한다. 표 3-2-30 은 에너지파일이 설치된 지반의 특성 및 지반조사 결과를 나타내주고 있다. 본 지역의 토질의 비중은 2.664~2.678 의 값을 보였으며 함수비는 21.8%~30.6%의 값을 나타내고 있다. 에너지 파일은 PHC 파일 내부에 PB 소재의 파이프(외경/내경: 20mm/16mm)를 코일 형태로 결속

한 후 내부에 시멘트 그라우트를 채운 형태로 구성되어 있다. 파일의 외경은 500mm 였으며 설치 깊이는 15m 이다. 또한 코일형 열교환기 직경은 28cm 이고 코일의 양 끝에서의 피치 간격은 5cm 정도로 유지되었으며 수직밀폐형 열교환기와 마찬가지로 열교환기 입출구 부위에 RTD 센서를 설치하였다. 그림 3-2-65 은 에너지파일을 이용한 열응답 실험 과정을 나타내주고 있다. 일반적인 수직밀폐형의 경우 열응답 실험은 48 시간동안 진행되지만 본 조건을 에너지파일에 그대로 적용할 수는 없다. 열응답시험 시간은 열교환기의 직경 및 지반의 조건에 따라 준정상상태 분포시간이 달라질 수 있기 때문이다(Florides & Kalogirou, 2008). 따라서 본 연구에서는 파일의 직경과 일반적인 지반의 열확산도 범위를 가정하여 240 시간 동안 연속으로 열응답 실험을 실시하였다.

표 3-2-30 지반 시추 주상도

Depth (m)	Layer	Description	USCS	SPT N blow
1.0	매립층 (Ⅰ)	중립질 모래 습윤 담갈색 보통조밀 자갈 소량 혼재	SP	11/30
(1.8)	(Ground Water Table)	실트질 점토 젖음 담갈색 내지 담회색 매우연약 내지 보통 견고	CL	13/30 5/30 1/30
4.6	퇴적층 (Ⅱ)			
8.8	퇴적층 (Ⅲ)	점토 젖음 암회색 매우연약 내지 연약	CL	3/30 4/30 8/30
15	화강 풍화토 (Ⅳ)	실트질 모래 습윤 담갈색 보통조밀 내지 매우조밀	SM	15/30 42/30 48/30 50/24 50/13



(a) 열교환기 설치 (b) 그라우팅 (c) 열응답 시험 장비 연결

그림 3-2-65 에너지파일 열응답 실험 과정

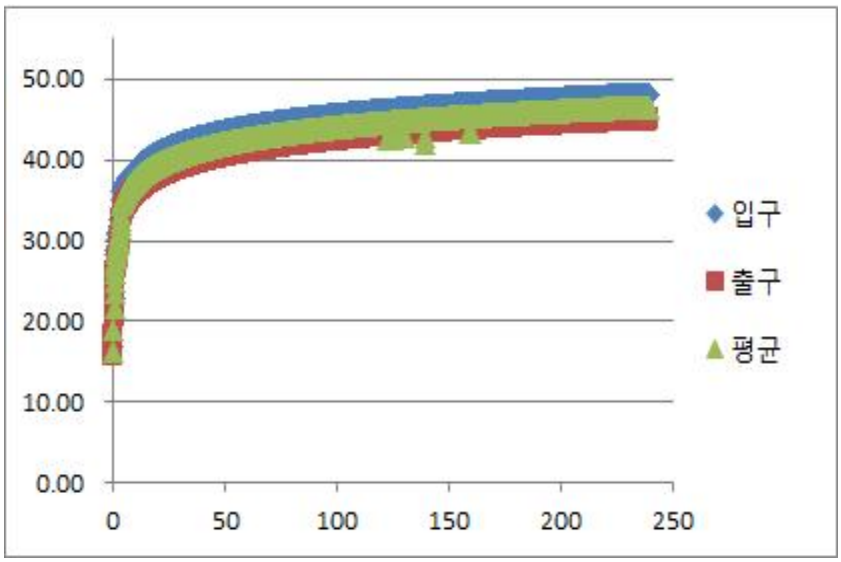


그림 3-2-66 시간에 따른 순환수 온도 분포

무한 선형 열원 이론을 적용하기 위한 L/D(L:길이, D:직경), 즉 열원의 길이와 직경의 비가 25에서 30 이상이면 충분하기에 본 에너지파일도 무한선형열원이론을 적용하는데 큰 무리가 없을 것으로 판단된다. 또한 앞서 2.4절에 의하면 코일형 열교환기를 사용하더라도 무한선형 열원 이론과 코일형 열원 이론을 모두 적용할 수 있는 것으로 나타났기에 보다 간편하고 손쉽게 이용할 수 있는 무한 선형 열원 이론을 적용하여 코일형 열교환기 에너지파일 적용시, 지반의 열전도도를 도출하고자 하였다. 그림 3-2-66는 240시간 동안의 열응답 시험의 시간에 따른 순환수의 분포를 보여주고 있다. 실험전 30분간의 무부하 운전을 통하여 계측된 지반의 초기온도는 15.65°C 였으며 순환수의 입출구 온도는 10분 간격으로 계측되었다. 지반으로 투입된 전력은 1,200W 였으며 난류의 흐름을 유발하기 위한 평균 유량은 5.64 *lpm*(liter per minute)였다. 240시간 동안의 열응답 실험 데이터를 이용하여 초기 100시간 데이터는 제외한 후 식 (2.4.2)를 이용한 지반의 열전도도는 2.145 W/m·K으로 측정되었다.

(2) 실내 열물성 실험

현장 열응답 실험으로부터 산출된 지반 열전도도 값의 적합성을 검증하기 위하여 표 3-2-30에 제시된 지층별 시료를 채취하여 실내 탐침법으로 각 지층별로 지반의 열전도도와 열확산율을 측정하였다. SPT (Standard penetration test) 시험시 교란 시료를 실내로 운반하여 현장 물성에 맞게 시료를 성형하였으며 그림 3-2-67은 험에 이용된 실내 탐침 장비 및 실험과정을 보여주고 있다. 본 실험에서는 Decagon사의 비정상 탐침 장비인 KD2 Pro가 사용되었으며 비정상 상태법은 선형 열원 이론에 기반하여 매우 가는 금속선에 전류를 흘려 시간에 따른 금속선의 온도 상승 경향으로부터 열전도도를 측정하는 방법으로써, 시험방법이 간편하고 측정시간이 짧은 장점이 있다(박현구 등, 2012). 실험에 사용된 탐침장비의 사양은 표 3-2-31과 같다.



그림 3-2-67 탐침 실험 과정

표 3-2-31 KD2 Pro 센서 제원

Size	2.4 ㎜ diameter × 100 ㎜ long
Range	0.10 to 4.00 W/(m·K) (thermal conductivity) 25 to 1000 ℃·㎝/W (thermal conductivity)
Accuracy(conductivity)	±10% from 0.2 - 4 W/(m·K) ±0.02W/(m·K) from 0.1 - 0.2 W/(m·K)
Cable length	0.8 m

크게 네 개 층으로 구성된 시료중 지표면에서 1m의 매립층의 경우 현장에서 탐침장비를 지반에 꽂아 열물성을 측정하였으며 그 밖에 세 개 지층은 그림 3-2-65와 같이 실험을 수행하였다. 지하 4.6m 까지의 두 번째 퇴적층의 경우 함수비를 달리하며 탐침 실험을 수행하였으며 현장 함수비 30.6% 일때의 현장 열물성 값으로 채택하였다(표 3-2-32). 세 번째 지층은 풍화토의 경우는 현장 함수비 28.5%에 맞춰서 열물성을

계측하였으며 열전도도는 1.863 W/m·K, 열확산율은 0.848mm²/s로 측정되었다. 하지만 네 번째 지층인 화강풍화토의 경우 건조단위중량이 높기에 현장 함수비와 간극비에 맞게 시료를 조성하는데 어려움이 있었다.

표 3-2-32 함수비에 따른 퇴적토(Ⅱ층) 열전도도 측정값

함수비	열전도도 (W/mK)	열확산율 (㎟/s)
15%	1.618	0.431
18%	1.643	0.518
20%	1.720	0.651
30.6%	1.783	0.685

표 3-2-33 함수비에 따른 화강풍화토(Ⅳ층) 열물성 측정값

함수비	열전도도 실험값 (W/mK)	열전도도(W/mK) Lee(2010)	열확산율 (mm²/s)
0%	0.407	0.2633	0.297
5%	1.071	0.6283	0.722
6.8%	1.474	0.7597	1.078
10%	1.839	0.9933	1.290
21%	1.958	1.7963	1.411
22.4%	2.063	1.8985	1.458
30.6% (시료조성 불가)		2.4971	

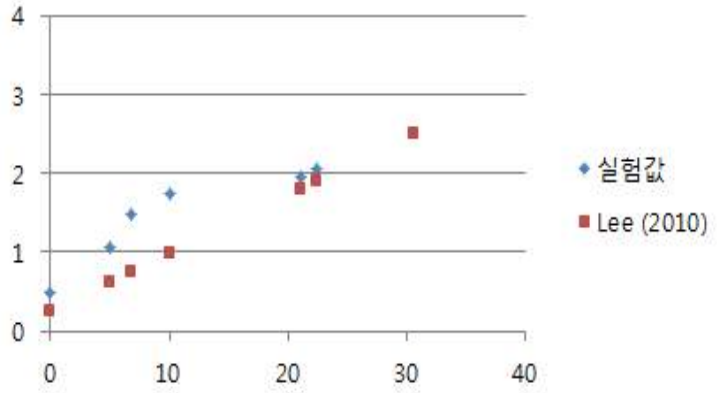


그림 3-2-68 화강풍화토 열전도도 실험결과

따라서 화강풍화토의 경우도 현장 함수비를 달리하면서 열물성을 측정하였으며 다른 기존 연구 결과와 상호 비교하여 현장에 맞는 열물성을 예측하고자 하였다. 표 3-2-33은 함수비에 따른 실험결과와 경험식에 의한 결과값을 보여주고 있다. 이강자(2010)는 식 (2.4.9)와 같이 화강풍화토의 함수비와 건조밀도를 독립변수로 하여 열전도도 값을 예측할 수 있는 경험식을 제시하였다.

$$\lambda = (0.42\rho_d - 0.62)w + 0.2633 \tag{2.4.9}$$

여기서 ρ_d는 건조밀도이며 w는 함수비를 뜻한다. 함수비 10%까지는 실험값과 경험식 간의 차이가 발생하였지만 20%이상에서는 거의 일치함을 알 수 있다(그림 3-2-68). 따라서 현장 함수비인 30.6%일때의 열전도도는 이강자(2010) 모델을 이용하여 추정하였다. 또한 열확산율은 계측된 실험 데이터를 근거로 회귀분석을 수행하였으며 함수비 30.6%일 때의 값은 1.62 mm^2/s 로 추정되었다. 4개의 지층으로 구성된 다층 지반은 단일지반으로 환산하여 식 (2.2.35)와 같이 등가의 열물성 값을 도출할 수 있다(그림 3-2-69). 또한 표 3-2-34은 지층별 열물성값과 등가 열물성 값을 보여주고 있다. 신·재생에너지 설비의 지원 등에 관한 기준 및 지침에 의하면 에너지 파일 이용시 열전도도 측정기준은 '파일 설치 위치의 토양에 대해 서로 상이한 공학적 특성을 가진 모든 층에 대해 채취한다' 라고 기술되어져 있으며 열확산계수의 경우 '열확산계수를 측정한다' 라고만 서술되어져 있다. 하지만 본 연구에서와 같이 에너지파일을 이용했을 경우도 현장 열응답 실험을 통해 충분히 지반의 등가 열전도도를 도출할 수 있었으며, 이는 등가의 단일 지반 열전도도로 환산된 값과 5% 이내에서 일치하였다. 열응답 시험 결과를 이용하여 산정된 보어홀 열저항 값은 0.0079 mK/W로써 표 3-2-10의 다중 선형 회귀분석으로 도출된 값과 3% 이내에서 일치함을 알 수 있었다. 또한 상이한 지층에 대해 시료를 채취하더라도 각 지층에 따라 열전도도와 열확산율을 동시에 계측하여 식 (2.2.35)와 같이 지층별 두께에 따른 가중평균한 열물성 값을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 열확산계수의 경우도 임의 지점의 값을 계측하는 것이 아닌 열전도도와 마찬가지로 지층별로 계측된 값을 근거로 등

가로 환산된 값을 설계에 적용한다면 보다 정확하고 합라적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

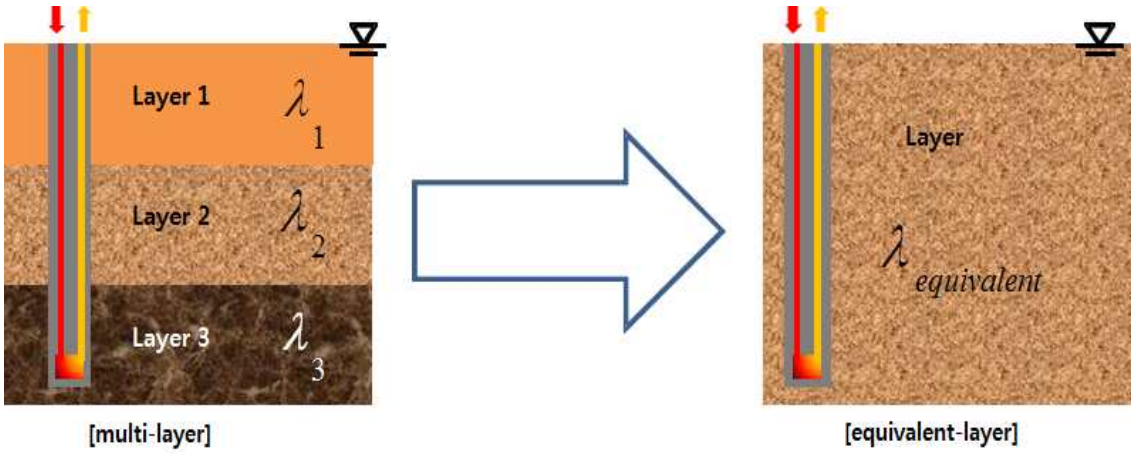


그림 3-2-69 등가 열물성 모식도

표 3-2-34 지층별 열물성 실험값

지층(깊이)	열물성	측정방법
매립층 (0~1m) SP	Λs = 1.1 W/mK α = 1.151 ㎟/s	현장 측정
퇴적층 (1~4.6m) CL	Λs = 1.783 W/mK α = 0.685 ㎟/s	실내탐침 및 추정 (현장에 맞게 시료 조성)
퇴적층 (4.6~8.8m) CL	Λs = 1.863 W/mK α = 0.848 ㎟/s	
풍화토 (8.8~15m) SM	Λs = 2.497 W/mK α = 1.620 ㎟/s	
등가환산 값	Λs =2.055 W/mK α = 1.148 ㎟/s	현장 TRT Λs =2.145 W/mK

3 절. 광대역 지반의 장기 열저장/전환 거동 해석

지중의 열적 물성치를 추정하는 방법은 최근에 상당한 연구가 진행되고 있으며, 지하수 흐름이 있는 지반에서 효과적인 물성치 추정에 대한 연구도 병행되고 있다. 일반적으로 현장에서 평가된 물성치가 넓은 측정 범위나 현장조건을 고려할 수 있다는 측면에서 실내실험에 의한 결과보다 더 현실적인 값으로 평가되고 있다 (예, 열응답 시험 등). 하지만

현장실험 결과를 이용하여 열물성를 평가하기 위해서는 다양한 열전달 모델(heat transfer model)을 사용하는데, 열전도에 대한 Fourier 법칙에 기반하고 지하수의 흐름에 대한 효과를 고려하지 못하고 있다. 따라서 지하수의 영향이 포함된 현장 자료를 이용하여 지반의 열적 물성치를 평가하게 되면 실제값 보다 과다하게 평가하게 되어(그림 3-3-1), 지중 열교환기 길이를 과소 산정할 수 있다 (Chiasson et al. 2000).

지중 열교환 시스템에서 지하수의 흐름은 전도에 의한 열확산(conduction)과 더불어 지하수의 흐름에 의한 열이송(advection)의 결합된 물리적 과정을 포함하여 적절한 지중열교환기의 설계를 어렵게 한다. 일반적으로 지하수 흐름은 보어홀 주위의 열축적을 완화시켜서 밀폐형 지중열교환기의 열적 성능을 향상시키는 것으로 알려져 있다. 하지만, 지중열교환기는 개별이 아닌 그룹으로 설치되기 때문에 열교환기의 상호 작용으로 인하여 전체 열교환 시스템의 열성능을 평가하기는 대단히 어렵다.

본 연구에서는 개발된 THM (Thermo-Hydro-Mechanical) 현상에 관한 유한요소 프로그램을 이용하여 지하수 흐름에 대한 기존의 이론식과의 비교 검증, 지하수가 흐르는 지반에 설치된 단일 열교환기에 대한 TRT(Thermal Response Test)와 지열시스템의 열 성능을 평가를 위한 TPT(Thermal Performance Test)을 수행하였다. 그리고 그룹으로 설치된 열교환 시스템의 지하수 유동 속도에 대한 수치해석을 수행하고 지하수의 흐름을 고려한 합리적인 열성능 평가 방안을 제시하고자 한다.

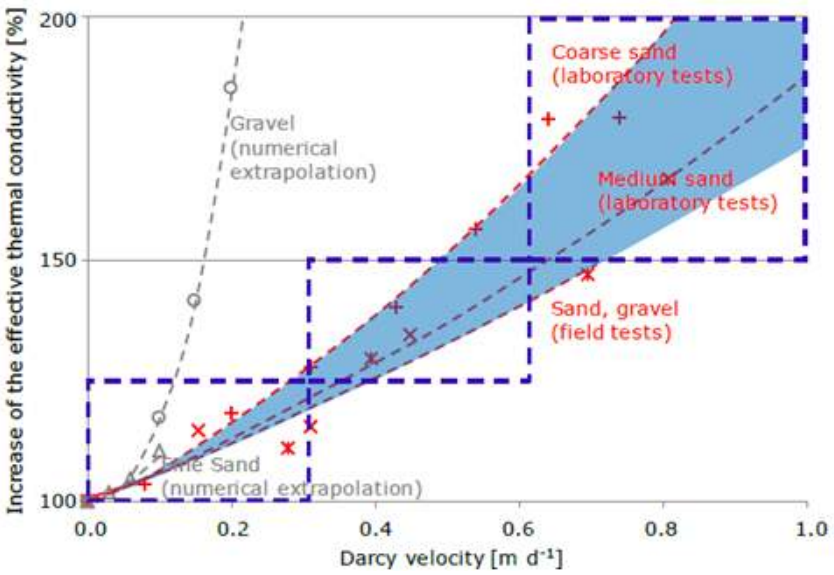


그림 3-3-1 실내모형실험에서 지하수 유동 속도에 따른 유효 열전도도의 변화(Ulvi & Heiko, 2013)

1. SUPG 수치기법

유한요소법에서 수치해석 결과의 정확도는 보간함수(interpolation)와 시험함수(test

function)의 선택에 의존한다. 보간함수는 주 변수의 표현 가능한 수식을 결정하고, 시험함수는 미분 방정식의 적용 방식을 결정한다. 보간함수가 시험함수와 동일한 Galerkin 수식화는 이송이 지배적인(advection-dominated) 흐름문제에서 어려움에 직면할 수 있다. 일반적인 대칭(symmetric) 시험함수는 절점간 진동(node-to-node oscillation)의 비대칭(antisymmetric)의 공간 도함수를 감지하지 못하기 때문이다(Berger & Stockstill, 1995). 이 문제를 해결하는 방법은 시험함수가 대칭 뿐만 비대칭 함수의 특성을 갖도록 정하여 유사 진동을 감지하고 가중 평균을 통하여 제거하는 것이다. 보간함수와 다른 시험함수를 사용하는 것을 일반적으로 Petrov Galerkin 접근법이라 한다(Brooks & Hughes, 1982).

본 연구에서는 SU/PG (Streamline Upwind/Petrov-Galerkin) 기법을 적용하여 열의 이송(advection)에 의한 유사진동을 최소화하도록 하였다 (Berger & Stockstill, 1995).

$$V_i = N_i + \alpha\left(\Delta x\,\hat{A}\frac{\partial N_i}{\partial x} + \Delta y\,\hat{B}\frac{\partial N_i}{\partial y}\right) \tag{3.1.1}$$

여기서, $\Delta x = 2\sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \xi}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \eta}\right)^2}$ $\Delta y = 2\sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial \xi}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \eta}\right)^2}$ 이다.

그림 3-3-2은 지하수 흐름이 있는 대상 지반의 중앙에 열원이 존재하여 열이 전도와 이송에 의하여 확산되는 경향을 보여주는 비교 수치해석이다. 일반적인 Galerkin 수식화는 오른쪽 경계조건에서 심각한 진동을 갖는 온도 분포를 가지는 반면, 본 연구에서 사용한 SU/PG 수치기법에 의한 수치해석 결과는 이러한 유사 진동을 최소화함을 알 수 있다.

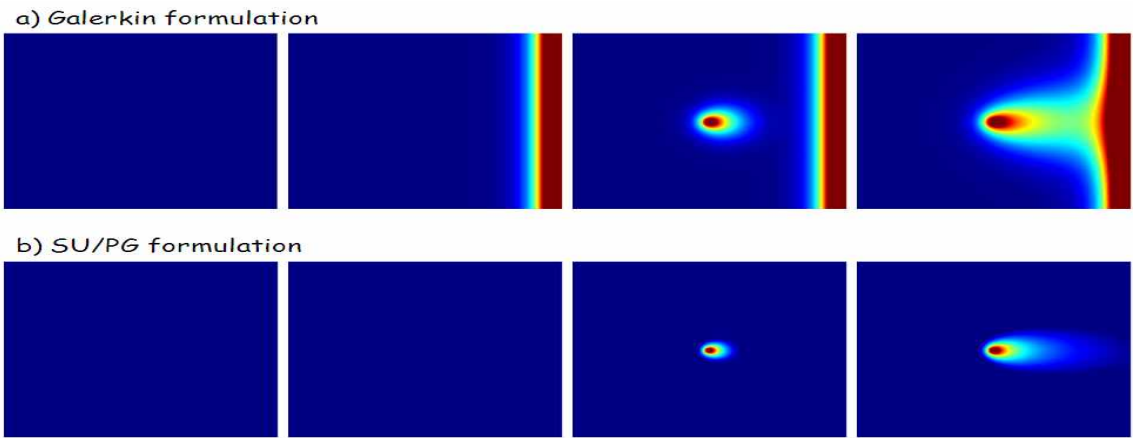
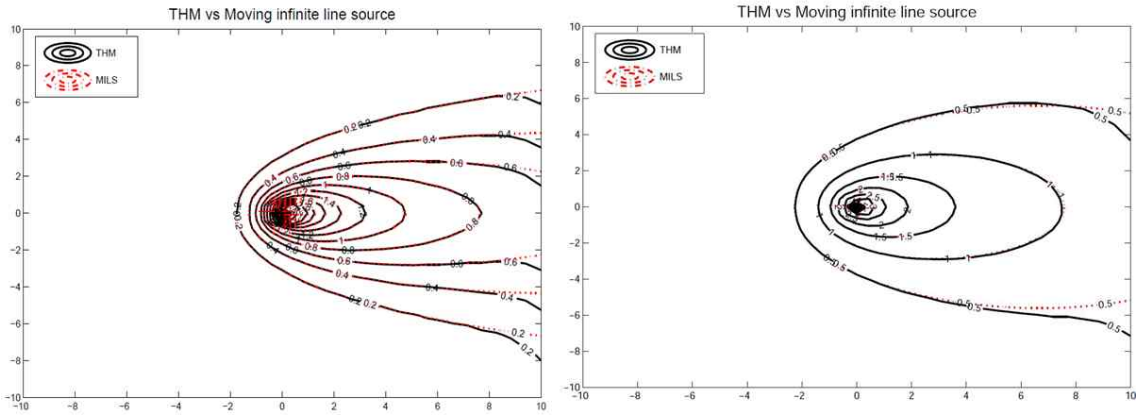


그림 3-3-2 지하수 흐름(왼쪽→오른쪽)의 열원 확산에 대한 영향 수치예적. a) 일반적인 Galerkin 수식화, b)SU/PG 수식화

2. 지하수 흐름에 대한 개발된 THM 코드의 비교 검증

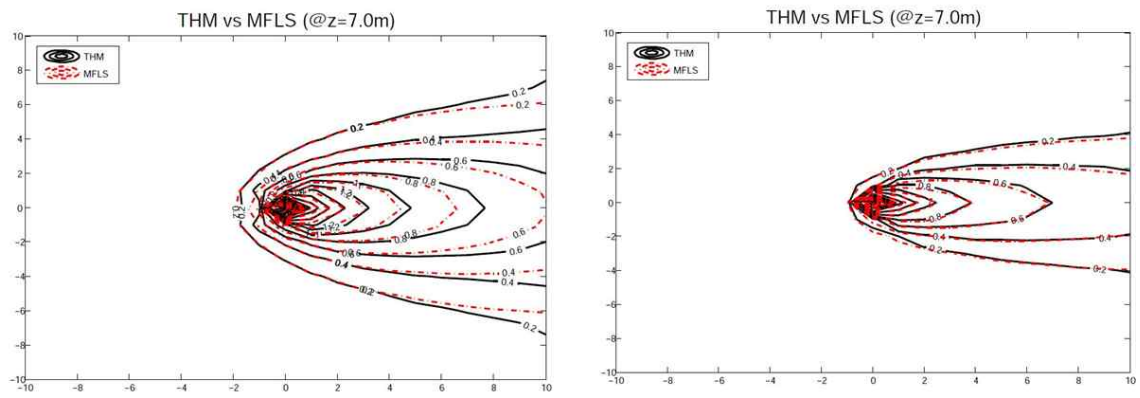
본 절에서는 지하수 흐름에 대해 개발된 THM코드의 적합성을 판단하기 위해, 상용 프로그램(COMSOL)과 기존 분석해의 결과와 비교하였다. 각 수치해석 모델은 지하수 흐름이 있는 경우, U형과 coil형 수직 밀폐 열 교환기를 대상으로 하였다. 실제 수직 밀폐형 열교환기의 거동을 모사하기 전에, 열교환기의 길이에 대한 해석 지반의 영역이 무한함을 가정한 무한열원모델과 비교를 수행하였다. 그림 3-3-3은 무한열원을 가지는 지반에 대한 이차원 해석의 결과를 보여주고 있다. 유속의 변화에 따른 열적 등고선의 변화가 해석해와 기존 무한열원에 대한 분석해의 결과와 거의 동일함을 확인할 수 있다.



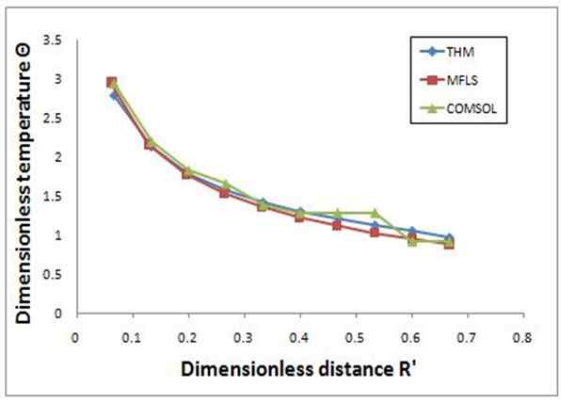
a) 20m/year　　b) 40m/year

그림 3-3-3 지하수 흐름(왼쪽→오른쪽)의 이차원 무한열원 확산에 대한 비교

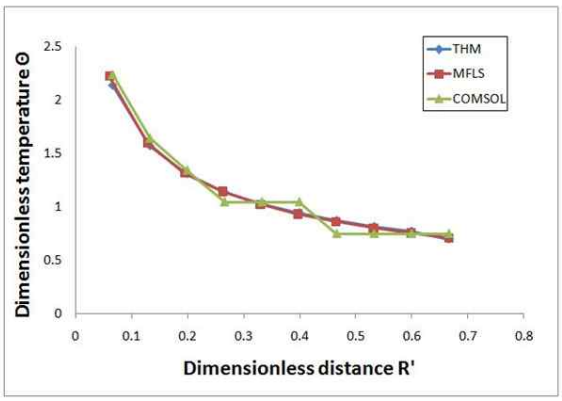
해석영역의 경계에서 약간의 오차가 존재하나 이는 수치해석적인 문제로 기인한다. 이차원 모델의 적합성을 바탕으로 실제 열교환기의 거동을 확인가능한 삼차원 유한열원에 대한 적합성을 평가하였다. 적합성의 기준은 상용프로그램과 기존 분석해의 결과에 대한 상대오차 10%로 산정하였다. 그림 3-3-4는 U형의 열교환기에 대한 열원 확산 예적과 무차원 반경에 대한 무차원 온도변화에 대한 결과를 보여준다.



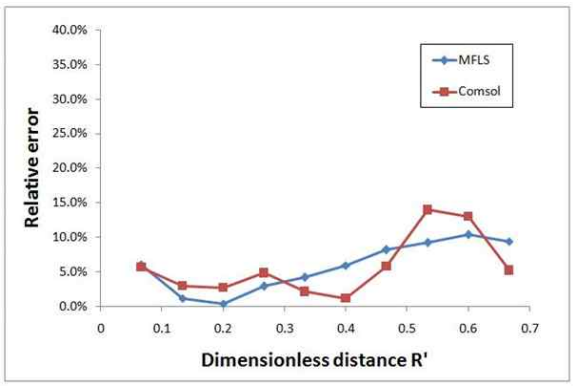
a) 열원확산 (20m/year)　　b) 열원확산 (40m/year)



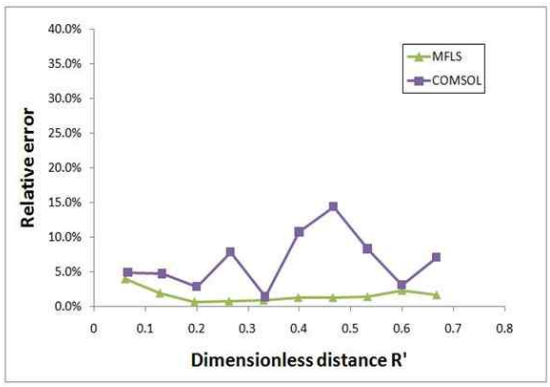
c) 무차원 온도변화 (20m/year)



d) 무차원 온도변화 (40m/year)



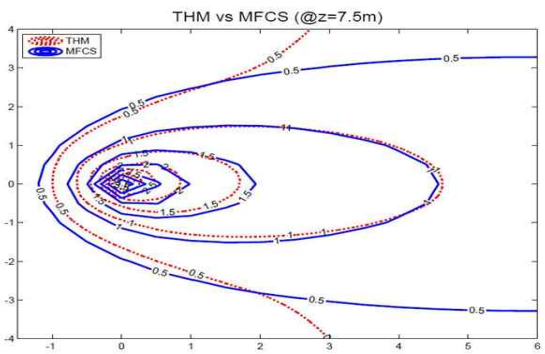
e) 상대오차 (20m/year)



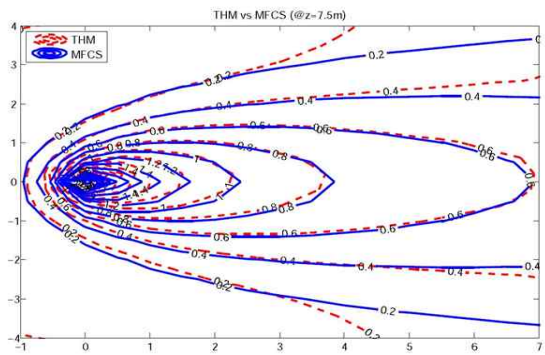
f) 상대오차 (40m/year)

그림 3-3-4 지하수 흐름(왼쪽→오른쪽)의 삼차원 유한 U형 열원 확산에 대한 비교

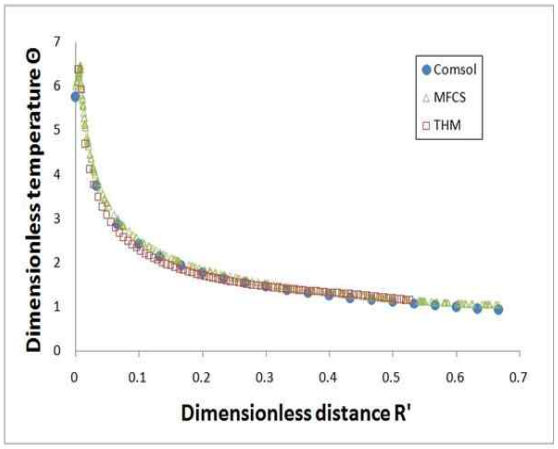
각 적합의 기준인 상대오차는 유속 20m/year일 경우 평균 기존 분석해 대비 5.799%, 상용 프로그램 대비 5.769%를, 유속 40m/year일 경우 평균 기존 분석해 대비 1.605%, 상용 프로그램 대비 6.479%로 허용기준인 10%내로 만족하는 결과를 보인다. 그림 3-3-5은 코일형의 열교환기에 대한 열원 확산 예적과 무차원 반경에 대한 무차원 온도변화에 대한 결과를 보여준다.



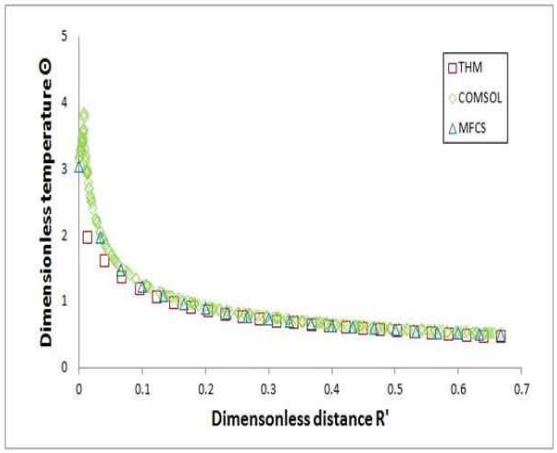
a) 열원확산(20m/year)



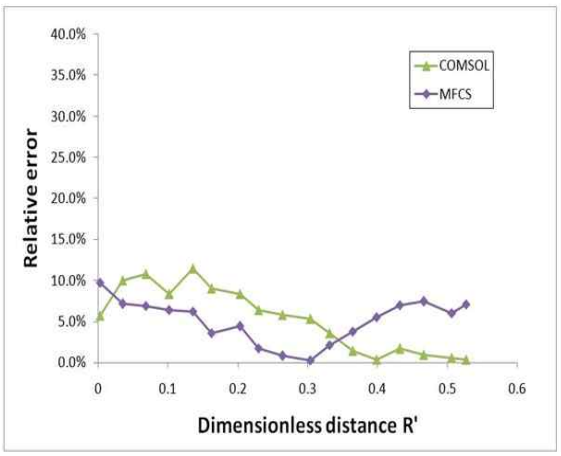
b) 열원확산(40m/year)



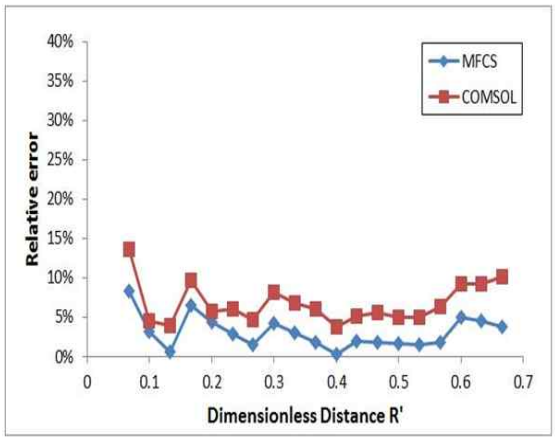
c) 무차원 온도변화(20m/year)



d) 무차원 온도변화(40m/year)



e) 상대오차 (20m/year)



f) 상대오차 (40m/year)

그림 3-3-5 지하수 흐름(왼쪽→오른쪽)의 삼차원 유한 coil형 열원 확산에 대한 비교

코일형에 대한 상대오차는 유속 20m/year일 경우 평균 기존 분석해 대비 5.060%, 상용 프로그램 대비 5.300%를, 유속 40m/year일 경우 평균 기존 분석해 대비 3.092%, 상용 프로그램 대비 6.785%로 허용기준인 10%내로 만족하는 결과를 보인다.

3차원 U형, 코일형 열교환기에 대한 열적 거동 해석에 대한 개발된 THM코드의 적합성은 상대오차가 10% 이내로 만족을 하나, 오차 발생의 이유는 다음과 같다. 미세적인 원인으로는 해석영역의 범위가 상이하다는 점이다. 동일한 해석영역에 대해 동일한 격자의 수, 동일한 격자의 크기로 수행이 되어야 하나 THM코드의 복잡성과 이로 인한 수치해석상의 소요시간으로 차이를 두게 되었다. 또한 열적 거동의 비교를 위해 열적 궤적을 이용함에 있어 내삽(interpolation)을 이용함으로써 오차가 생기게 되었다. 거시적 원인으로는 수치해석상 적용되는 SUPG기법에 사용되는 변수와 THM코드의 열적 거동과 수리적 거동의 완전 연계 해석방법의 차이로 나타난다.

3. 단일(Single) 열교환 시스템에서 지하수 흐름의 영향(TRT, TPT)

지중 열교환 설계에서 가장 중요한 지중의 유효 열전도계수는 일반적으로 현장 열응답 시험(TRT, Thermal Response Test)을 통하여 지반의 대표적인 물성치를 산출하게 된다. 하지만, 현장 열응답 시험결과로부터 지반의 대표 열전도도를 산정하는 방법은 열전도도만을 고려한 이론 모델식을 사용하고 지하수에 의한 열유동을 고려할 수 없다. 따라서 본 절에서는 지하수 유동이 열응답 시험결과에 미치는 영향을 분석하고 지하수 유동을 고려한 유효 열전도도 계수 평가방법에 대한 수치해석을 수행하고자 한다. 또한 지하수가 지중 열교환기의 열 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 단일 열교환기에 대한 열성능 시험(TPT, Thermal Performance Test)을 수행하였다

열응답 시험을 수행하기 위하여 지중 열교환기가 설치된 지반에 지표면 히트펌프에 일정한 열량을 주입하면서 파이프내 유체의 온도와 지중온도 변화에 대한 수치해석을 수행하였다.

지하수의 흐름 조건은 0m/yr, 10m/hr, 20m/yr, 50m/yr, 그리고 100m/yr 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다. 지중 열교환기는 U-type 으로 이격거리는 10cm 이고 파이프내의 유속은 1m/s 이다. 지속적으로 열을 공급해주는 열원($Q=50\,W$)은 지표면의 유출공과 유입공 사이의 절연된 pipe 요소를 통하여 공급되었다. 지반의 열전도도는 파이프 유체의 온도 변화로부터 선형열원모델 이론식을 이용하여 평가하였다.

그림 3-3-6~3.3.3 은 지하수의 흐름 속도에 따른 TRT 시험 중 지중의 온도변화 나타내고 있다.

지하수의 흐름이 없는 경우는 온도구배에 의한 열의 전도만이 발생하여 원형 모양의 온도 분포를 갖게 된다. 하지만 지하수 흐름이 있는 경우, 지하수의 흐름에 의한 열의 이송에 의하여 타원모양의 온도 분포를 갖게 되어, 지하수 흐름 반대방향으로는 온도구배가 증가하고 흐름 방향의 온도 구배는 감소함을 알 수 있다. 그리고 지하수 속도가 더욱 증가할수록 지중 파이프에 의하여 전달된 열이 지하수 흐름에 쓸려 내려가는 형상을 볼 수 있다.

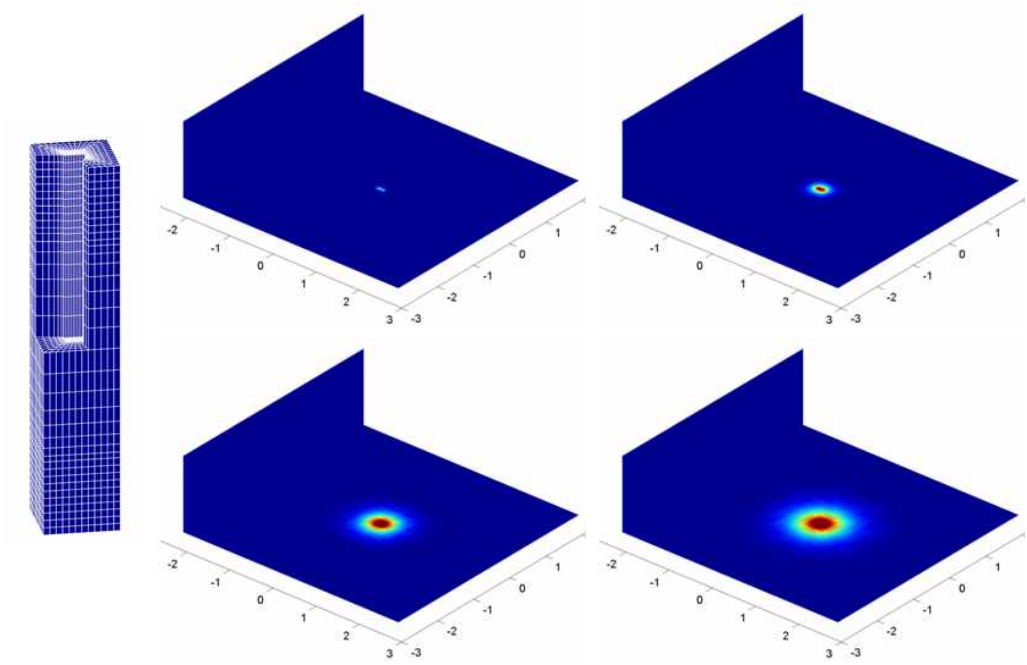


그림 3-3-6 열응답 시험에 대한 수치해석(지하수 흐름 속도=0m/yr). a) 단면 해석 영역, b) 1 시간 경과후의 온도분포, c) 10 시간 경과후의 온도분포, d) 50 시간 경과후의 온도분포, e) 100 시간 경과후의 온도분포 (Red=15°C, Blue=10°C)

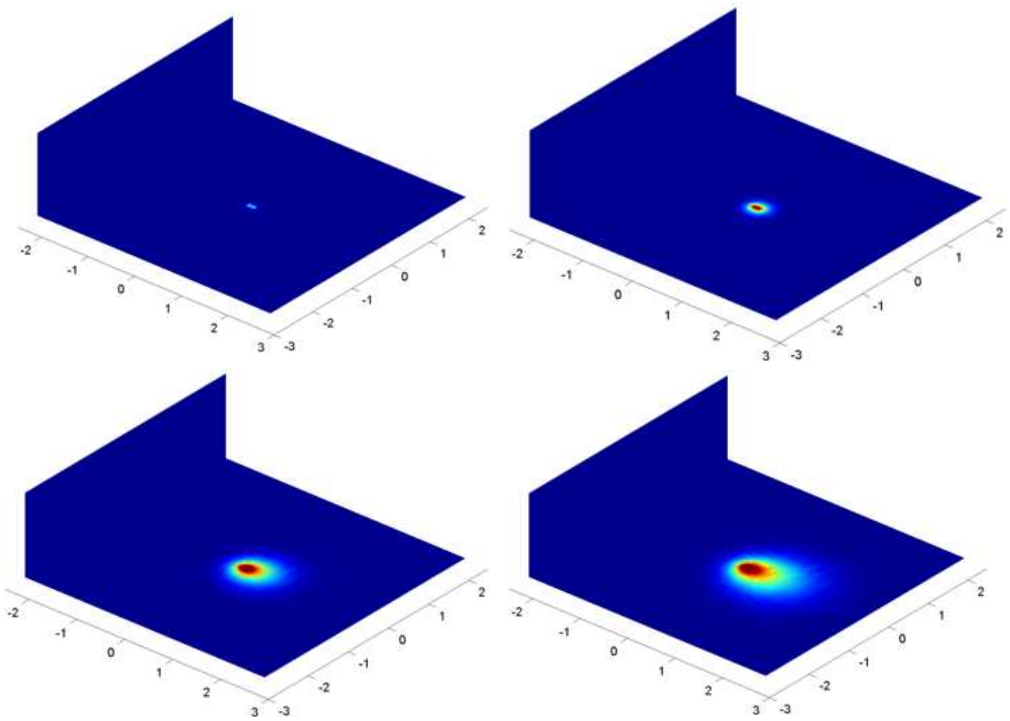


그림 3-3-7 열응답 시험에 대한 수치해석(지하수 흐름 속도=20m/yr). a) 1 시간 경과후의 온도분포, b) 10 시간 경과후의 온도분포, c) 50 시간 경과후의 온도분포, d) 100 시간 경과후의 온도분포 (Red=15°C, Blue=10°C)

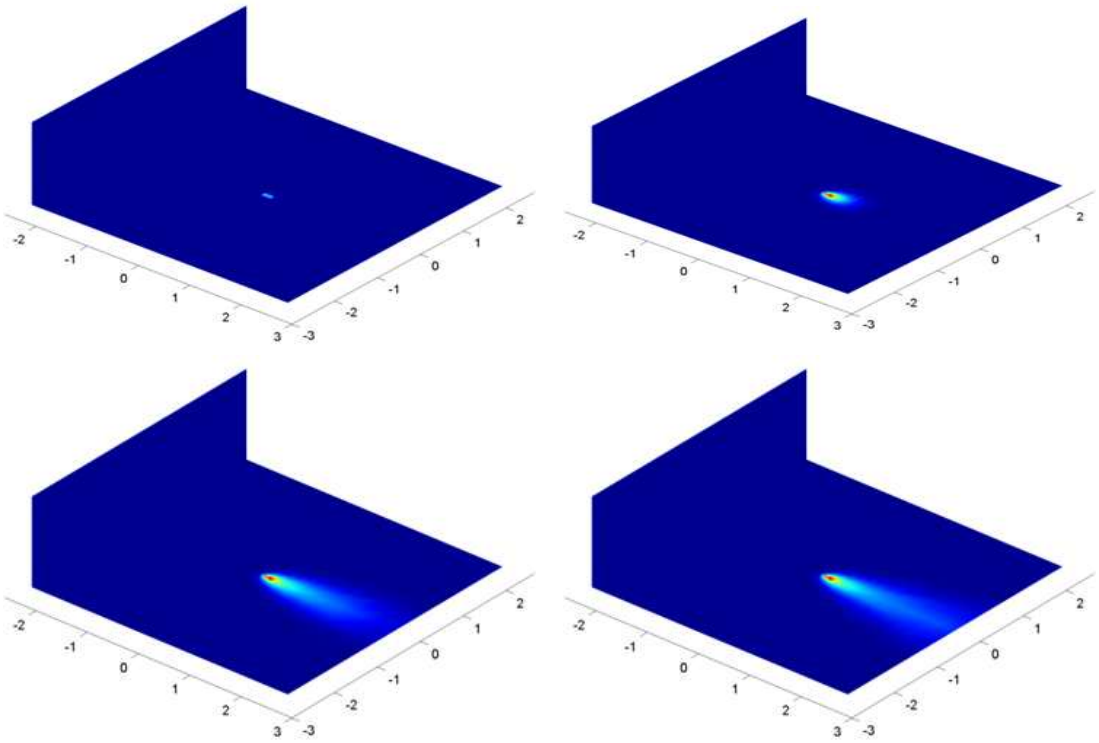


그림 3-3-8 열응답 시험에 대한 수치해석(지하수 흐름 속도=100m/yr). a) 1 시간 경과후의 온도분포, b) 10 시간 경과후의 온도분포, c) 50 시간 경과후의 온도분포, d) 100 시간 경과후의 온도분포 (Red=15°C, Blue=10°C)

그림 3-3-6~3-3-11 은 지하수의 흐름 속도에 따른 TRT 시험 중 파이프의 입출구부의 온도변화에 수치해석 결과를 나타내고 있다. 그리고 입출구의 평균온도로부터 선형열원모델식을 이용하여 유효 열전도도를 평가하였다. 지하수의 흐름속도가 증가하더라도 입출구부의 온도차는 거의 변화가 없으나, 지하수 속도가 증가할수록 입출구부 온도가 수렴하는 경향을 보이고 있다. 또한 모델식을 이용한 Log 시간축에서의 평균온도 변화는 지하수의 흐름이 없는 경우 선형적인 관계를 갖게 되지만, 지하수 흐름이 있는 경우 시간이 경과한 후반부에서 평균온도가 더 이상 증가하지 않고 수렴함을 알 수 있다. 따라서 현장 실험에서 파이프 입출구부의 평균 온도 변화로부터 지하수 흐름에 의한 유무를 사전에 판단할 수 있을 것으로 사료된다.

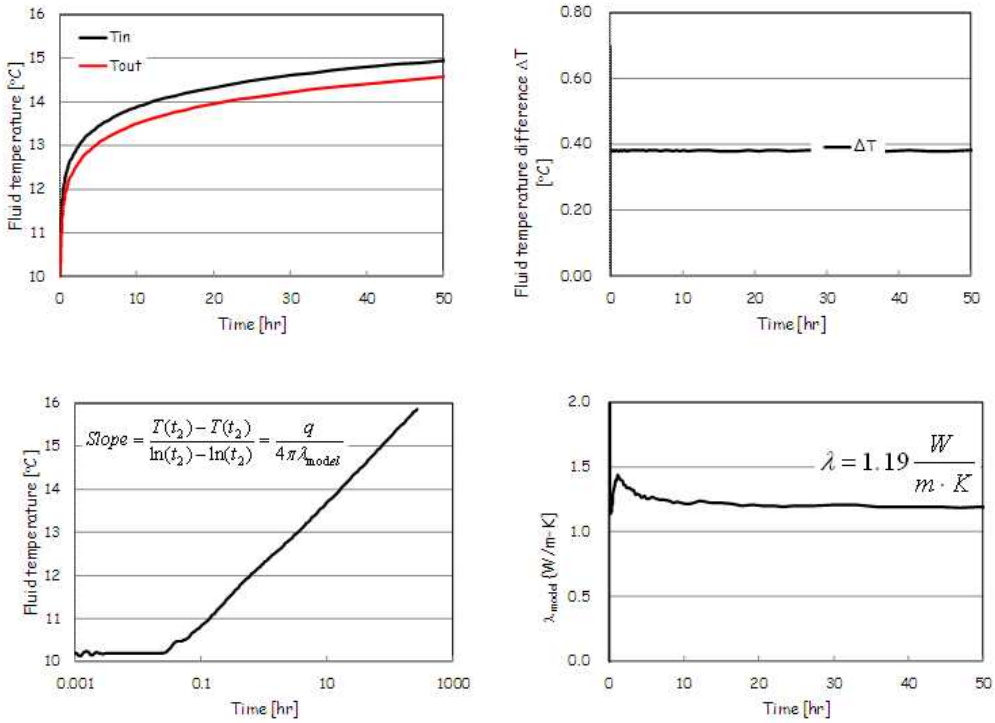


그림 3-3-9 시간경과에 따른 파이프내 유체의 온도와 이론식에 의한 등가 열전도도의 평가(지하수 흐름 속도=0m/yr)

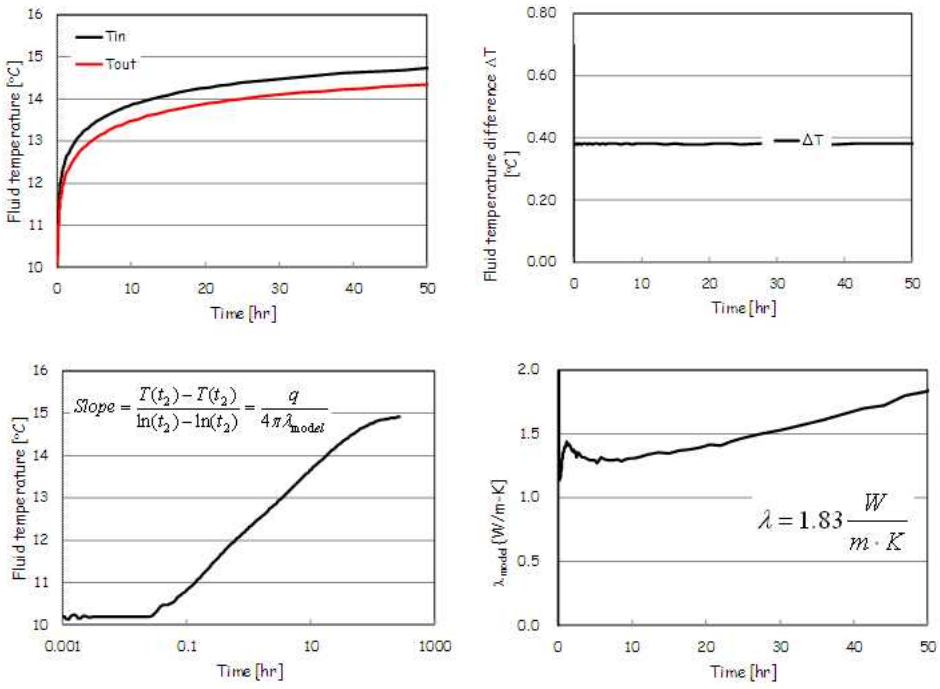


그림 3-3-10 시간경과에 따른 파이프내 유체의 온도와 이론식에 의한 등가 열전도도의 평가(지하수 흐름 속도=20m/yr)

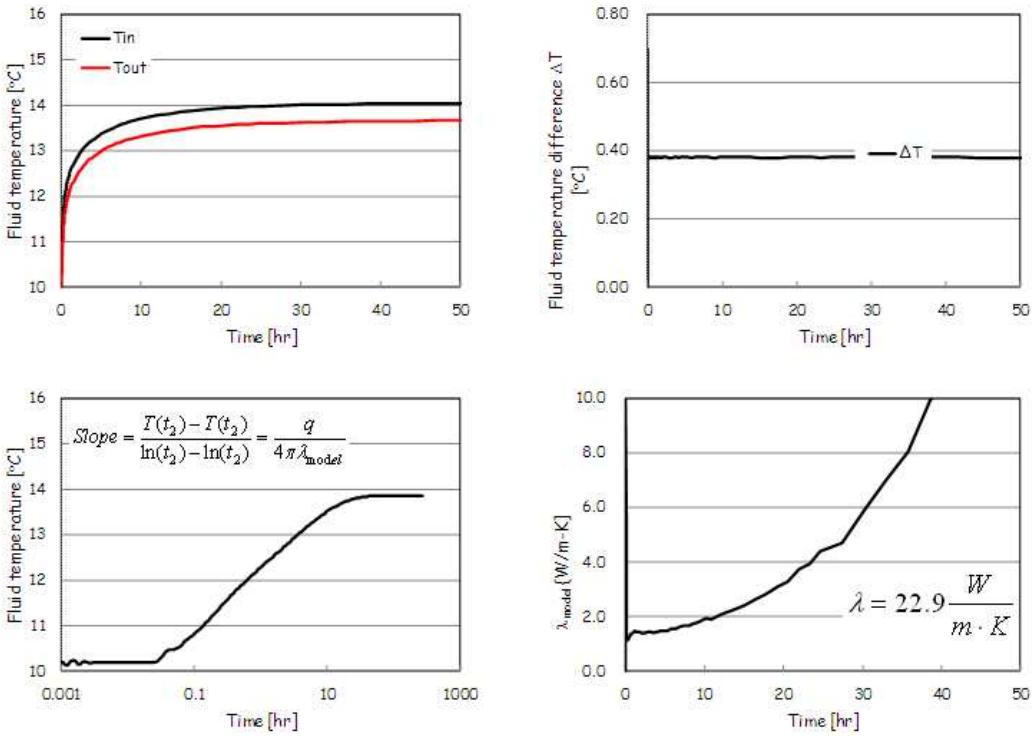


그림 3-3-11 시간경과에 따른 파이프내 유체의 온도와 이론식에 의한 등가 열전도도의 평가(지하수 흐름 속도=50m/yr)

지하수 흐름에 의한 열전달율을 정량화하기 위하여 Peclet number(Pe)를 이용하였으며, 그림 3-3-12 은 Pe 에 따른 선형모델식을 이용한 유효 열전도도의 변화를 나타냈다.

$$Pe = \frac{q_{advection}}{q_{conduction}} = \frac{\rho C_p u_{gw}}{\lambda_{ground} / D_{pipe}} \tag{3.3.1}$$

Pe 가 0.4 보다 작은 경우 평가된 열전도도는 실제 지반의 열전도도에 대하여 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 하지만, Pe 가 0.4 보다 커지면 열전도도비가 급격히 증가함을 알 수 있다. 다만, 지반의 간극비는 열전도도비에 대한 영향이 미비한 것으로 나타났다.

지하수 흐름속도에 대한 유효 열전도도비는 다음식과 같이 정리할 수 있다.

$$\lambda_{ratio} = \frac{\lambda_{water\ flow}}{\lambda_{ground}} = 1 + 27.6 \times Pe^{2.46} \tag{3.3.2}$$

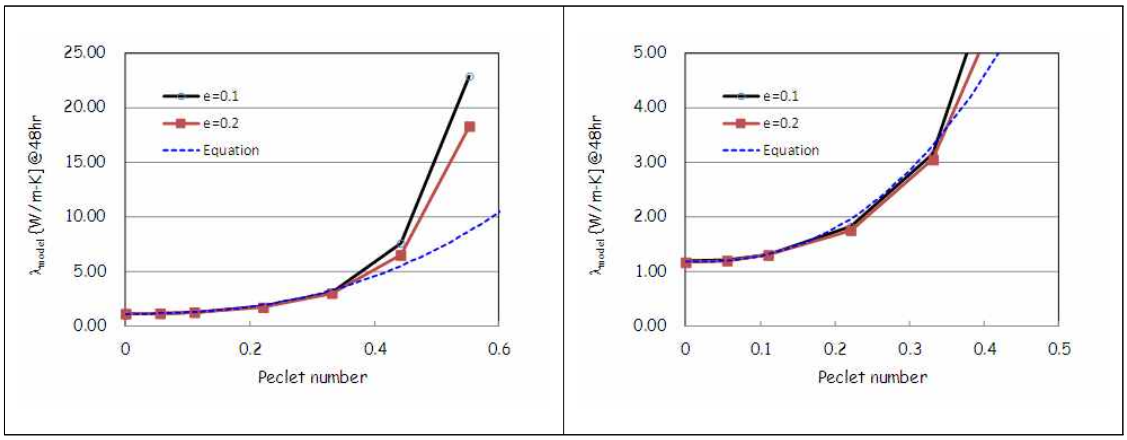


그림 3-3-12 지하수 흐름에 의한 Peclet number 에 따른 선형 모델식을 이용한 지반의 유효 열전도도의 예측

기존의 연구에서 Pe<0.04 인 경우 지하수 흐름에 의한 지중 열교환기의 열전달률에 변화가 거의 없고, Pe>0.04 인 경우 열전달율이 급격하게 증가함을 보여주고 있다(그림 3-3-13). 하지만, 해석결과에서 Pe 가 log 축에서 작성되어 해석결과의 정확한 경향성을 파악하기 힘들어, 다양한 지하수 흐름속도에 따른 지중 열교환기에 의한 지중 열전달률에 대한 수치해석을 수행하였다.

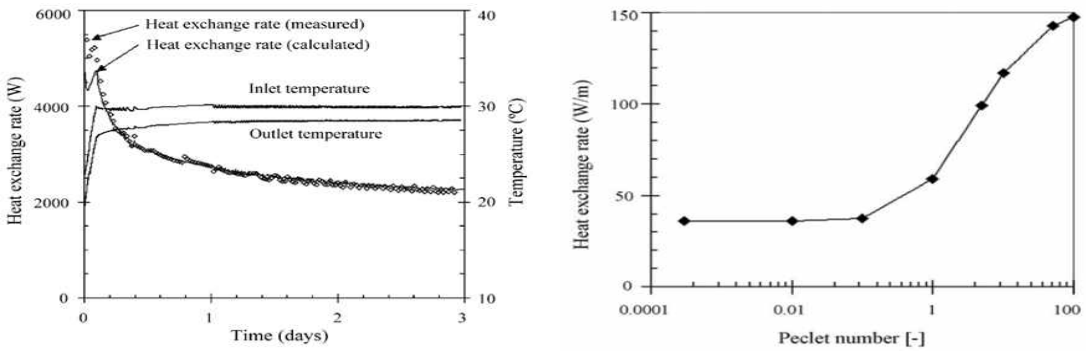


그림 3-3-13 지하수 흐름에 의한 열전달율의 변화 (Fujii, et al. 2005)

그림 3-3-14 는 지하수의 흐름속도 = 0m/hr 와 20m/yr 에 대한 수치적인 열성능 실험 (TPT, Thermal Performance Test)을 수행한 결과를 보여주고 있다. 지하수의 흐름이 열성능 실험 결과에 대한 전체적인 경향성에 대한 영향은 미비한 것으로 나타났다.

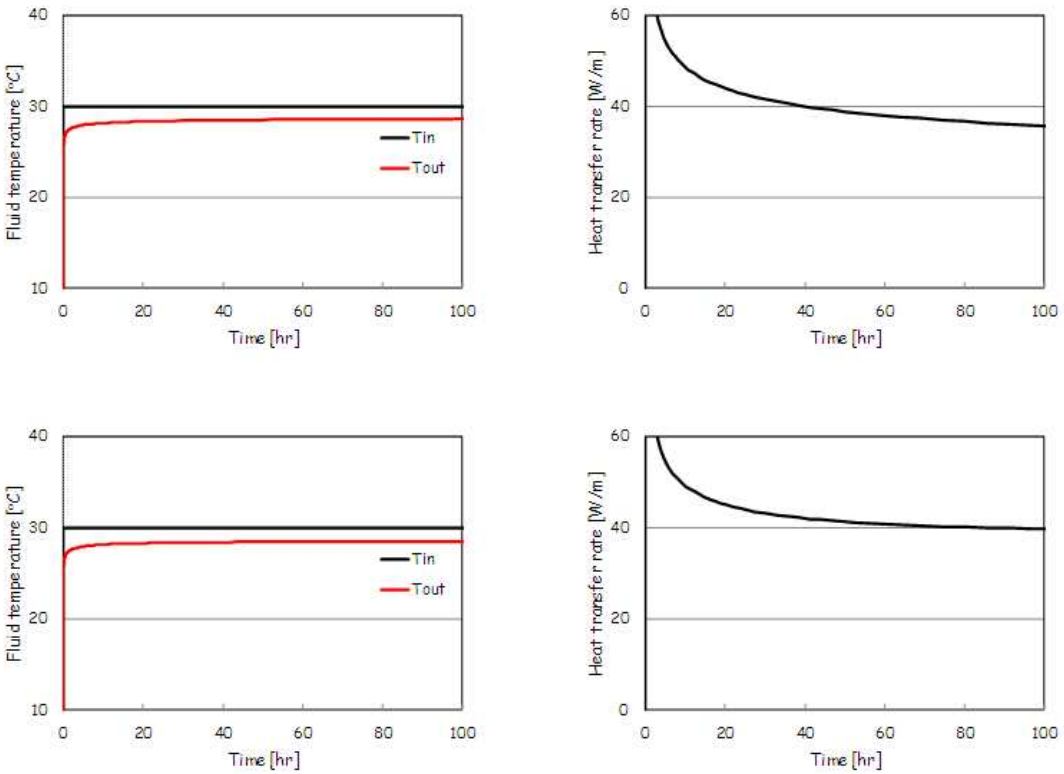


그림 3-3-14 단일 열교환 시스템의 TPT 실험에서 시간경과에 따른 파이프내 유체 온도와 열전달율의 변화: a) 지하수의 흐름속도 = 0m/yr, a) 지하수의 흐름속도 = 20m/yr.

따라서 지하수의 흐름 속도에 따른 열성능을 비교하기 위하여 다양한 흐름조건에 대한 시간경과에 따른 열전단률을 산정하였다.

$$q_{ratio} = \frac{q_{water\ flow}}{q_{ground}} = 1 + 1.23 \times Pe^{1.72} \tag{3.3.3}$$

수치해석 결과는 지중 열전달율의 변화는 유효 열전도도에 비하여 지하수의 흐름속도가 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 따라서 현장 열응답 시험을 통한 열전도도 식 (3.3.2)를 이용하여 열교환기를 설계하는 것을 과소한 설계가 될 가능성이 높음을 알 수 있다. 그리고 기존 연구결과와는 달리 지중 열전달률이 흐름속도의 전 영역에서 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다(그림 3-3-15).

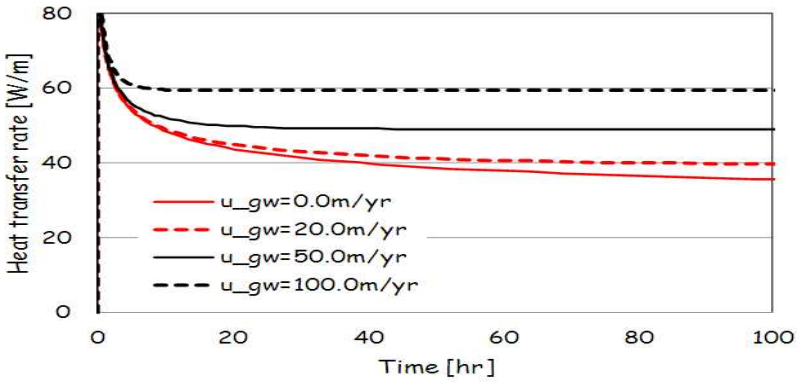


그림 3-3-15 단일 열교환 시스템에서 지하수의 흐름속도에 따른 열전달율의 변화

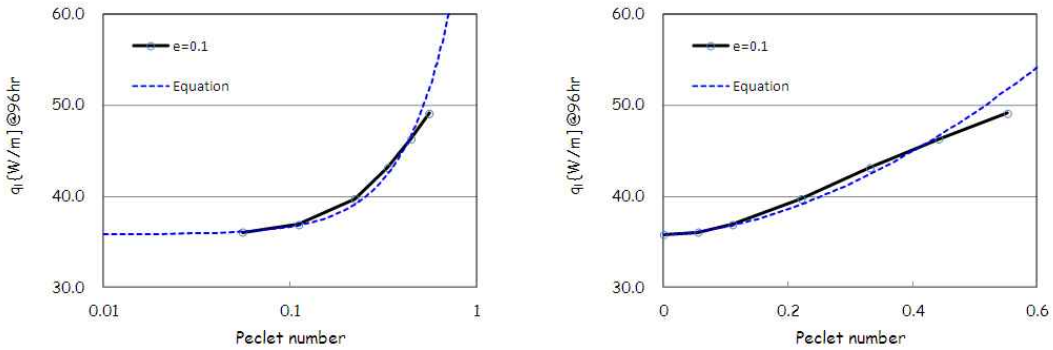


그림 3-3-16 단일 열교환 시스템에서지하수 흐름에 의한 Pe 변화에 따른 지중의 열전달율의 변화

4. 그룹(Group) 열교환 시스템에서 지하수 흐름의 영향

지중에 그룹으로 설치된 지중열교환기는 교환기의 배치에 따라 다른 열적 상호간섭의 영향을 받는다. 일반적으로 이러한 열교환기간의 열적 상호작용은 교환기의 성능을 저하시키는 것으로 알려져 있다. 그리고 지하수 흐름이 존재하는 지중의 열교환기에 열성능에 대한 연구결과는 미비한 편이다.

따라서 본 연구에서는 지하수 흐름에 있는 지중에 그룹 열교환 시스템(3×3)을 설치하여, 열간섭에 의한 열성능 변화에 대한 정량적인 평가를 수행하였다.

그림 3-3-17~3-3-18 는 지하수 흐름이 있는 지중에 그룹으로 설치된 열교환 시스템의 열성능 시험(TPT)에 의한 지중의 온도분포의 변화를 보여주고 있다. 지하수의 흐름이 없는 경우, 초기에 단일 지중열교환기와 마찬가지로 원형 모형의 온도분포양상을 보인 후, 시간경과 후 열교환기 간의 열 중첩이 발생하는 것을 알 수 있다. 지하수의 흐름이 있는 경우, 초기에 지하수의 흐름에 의하여 타원 모양의 온도 분포양상을 보인 후, 지하수 흐름 상부의 열교환기에서의 열원이 하부의 열교환기에 추가적인 열원을 공급하여 열성능을 저하시키는 것을 확인할 수 있다.

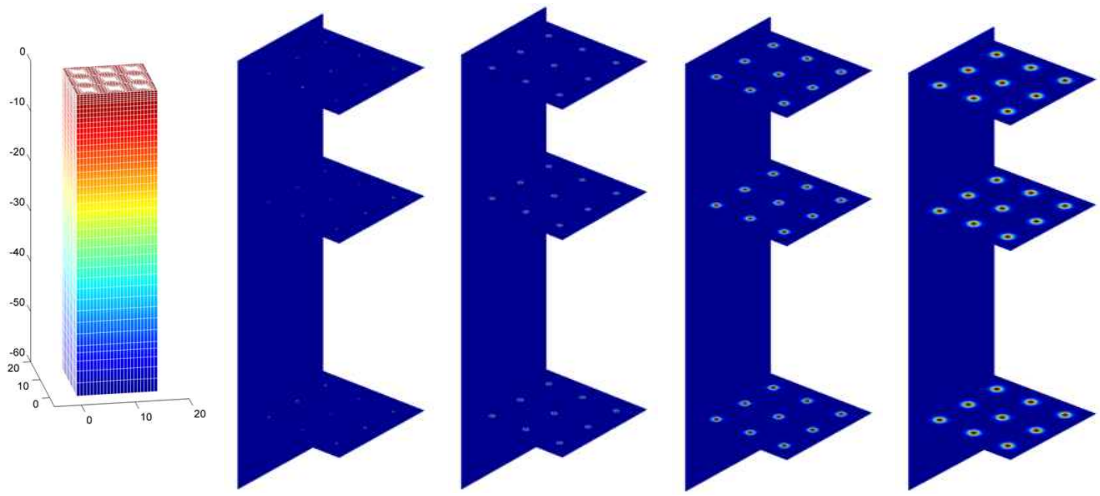


그림 3-3-17 그룹 열교환 시스템에서 지하수의 영향 (TPT 시험, 지하수의 흐름속도 = 0m/yr). a) 해석 영역, b) 1 시간 경과후의 온도분포, c) 10 시간 경과후의 온도분포, d) 50 시간 경과후의 온도분포, e) 100 시간 경과후의 온도분포 (Red=15°C, Blue=10°C)

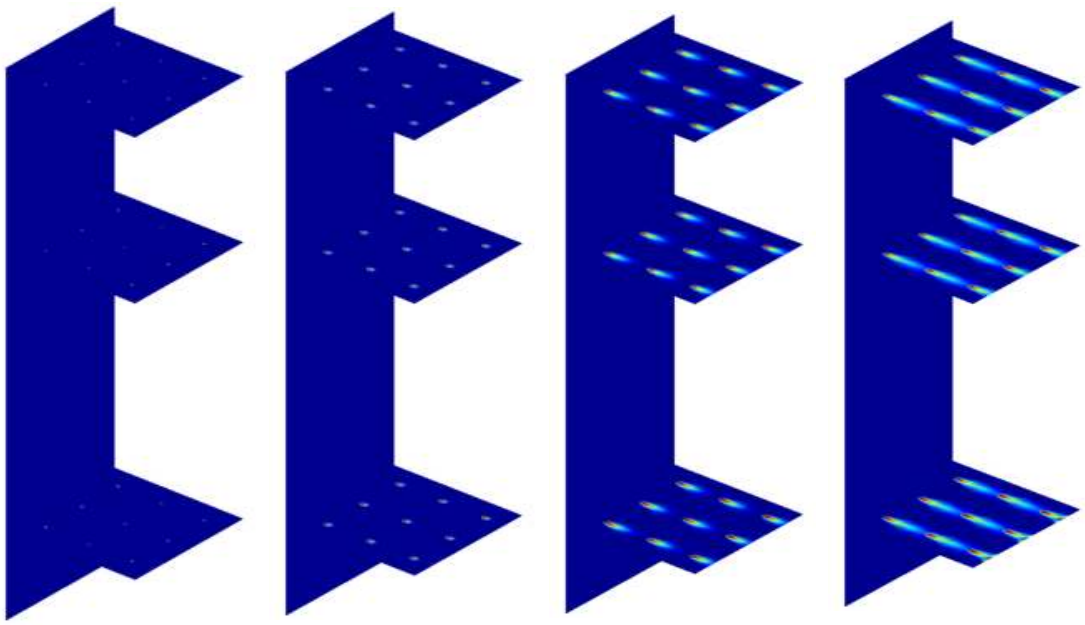


그림 3-3-18 그룹 열교환 시스템에서 지하수의 영향 (TPT 시험, 지하수의 흐름속도 = 100m/yr). a) 1 시간 경과후의 온도분포, b) 10 시간 경과후의 온도분포, c) 50 시간 경과후의 온도분포, d) 100 시간 경과후의 온도분포 (Red=15°C, Blue=10°C)

그림 3-3-19 은 그룹으로 설치된 열교환 시스템의 각 열교환기별 열성능, 즉 열전달률의 변화를 나타내고 있다. 지하수 흐름방향과 평행한 중앙부에 위치하는 교환기, 즉 4 번, 5 번, 그리고 6 번의 시간경과에 따른 열성능 변화를 평가하였다. 지하수 흐름이 없는 경우,

30 일이 경과할 때까지 열교환기별 열성능의 차이가 거의 없었으나, 그 이후 열간섭에 의하여 중앙부에 위치한 5 번 교환기의 성능이 저하되게 시작하는 것을 알 수 있다.

지하수 흐름이 있는 경우, 지하수의 상류측에 있는 교환기(4 번)는 주위 교환기로부터 열축적이 미비하게 발생하여 열 성능이 수렴함을 알 수 있다. 하지만, 중앙부(5 번)와 하류측(6 번)에 열교환기는 상류측에 위치한 열교환기(4 번)에서 이송되는 열에 의하여 주위 지반의 온도가 상승하여 열성능이 크게 저하됨을 알 수 있다.

지하수의 흐름에 의한 전체 열교환 시스템의 열성능 평가결과는 열교환기 주변에서의 이송에 의한 열성능 향상과 지하수의 흐름에 의한 추가적인 열간섭으로 인하여 시간경과에 따라 수렴함을 보여 주었다. 다만 지하수 흐름속도가 증가할수록 평균 열전달률도 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

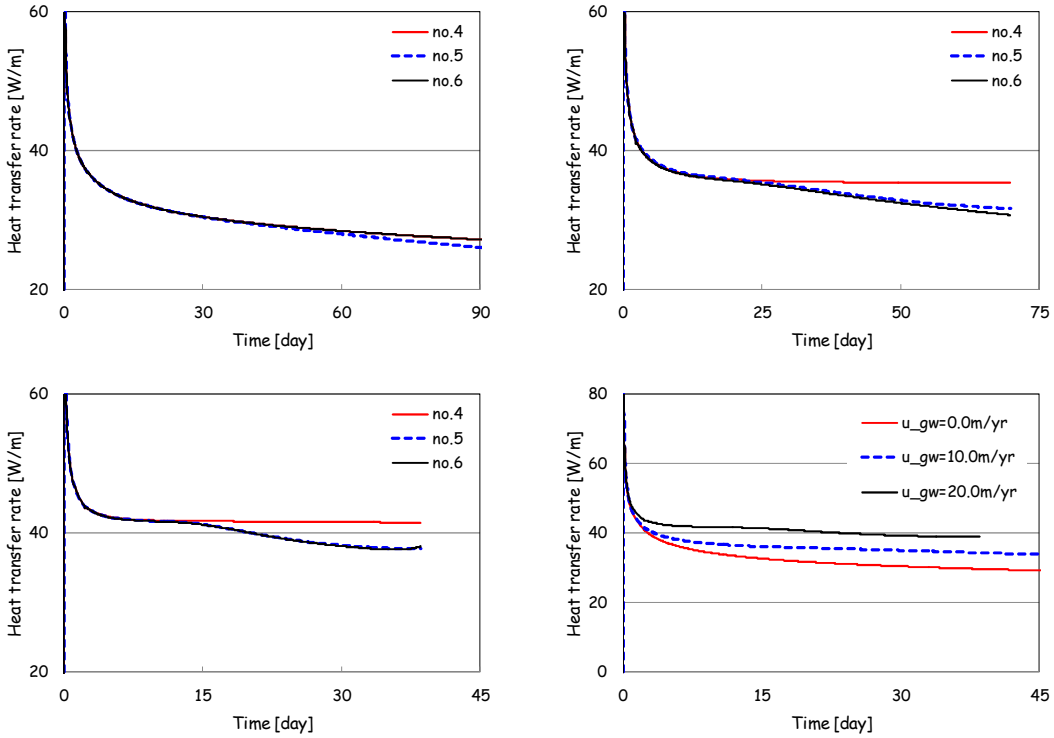


그림 3-3-19 그룹으로 설치된 열교환시스템의 지하수에 의한 열성능의 변화. a) 지하수 흐름방향에 있는 열교환기들의 열교환률(TPT, u=0m/yr), b) 지하수 흐름방향에 있는 열교환기들의 열교환률(TPT, u=10m/yr), c) 지하수 흐름방향에 있는 열교환기들의 열교환률(TPT, u=20m/yr), d) 지하수 흐름속도에 따른 전체 열교환기의 평균 열전달률

지하수 흐름 영향에 의한 그룹 열교환기 시스템의 평가는 열교환 평가와 함께 보어홀을 이용한 열에너지 저장 기술 역시 적용 가능할 것으로 판단된다. 더불어 THM 현상을 이용하여 고온의 열을 이용하는 열에너지 저장 시스템의 지반 안정성 평가에 중요한 역할을 한다.

4 절. UTECUS 스마트 모니터링 네트워크 개발

지열냉난방시스템이 본격적으로 국내에 도입되고 정부의 대체에너지 의무화제도 실시에 따라 적용 사례도 점차 증가되고 있는 추세다. 그러나 기술 도입 초기에 여러 설계 시공 문제가 발생되었으며 이에 따라 성능 인증 및 운전 성능 평가가 중요한 문제로 떠오르고 있다. 표 3-4-1 과 표 3-4-2 는 신·재생 에너지 설비의 지원 등에 관한 기준 및 지침에 의한 계측 설비의 요구 사항과 측정 및 모니터링 기준을 나타낸다.

지열의 경우 식 (2.3.3)을 통해 지중 부하를 계측하여야 한다. 이를 위해 지중 열교환기 입출구 부위에 온도 센서를 설치하여 입출구 온도차를 계측하여야 한다. 그리고 지중 부하와 히트 펌프 및 순환 펌프 소요 전력을 이용하여 지열 히트 펌프 및 전체 시스템의 성능계수 (Coefficient of Performance)를 측정할 수 있다. 또한 정확한 성능 평가를 위하여는 표 3-4-1과 같은 계측 설비의 정확도가 유지되어야 한다. 특히 대규모의 지열냉난방 시스템에서는 보다 많은 계측 설비들의 측정이 요구될 수 있다. 이 때 지중 열교환기별로 지중 부하를 계측하기 위해서는 각각의 열교환기 입출구 부위에 온도 센서를 부착하면 지중 열교환기 각각의 성능을 측정할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 최근 교량, 터널 및 사면안정 등과 같이 광범위한 분야의 실시간 계측에서 우수성을 보이고 있는 광섬유 센서를 기반으로 하는 스마트 모니터링 시스템이 지중 열전도도 측정에 효율적으로 적용될 수 있는지를 분석하였다. 이를 위하여 2절에서 소개되었던 실내 모형토조 내에 지중 열교환기를 설치하였고 열교환기 입출구에 광섬유 온도 센서를 부착하여 실내 열응답 실험을 수행하여 이의 적용성에 대해 살펴보았다.

또한 지중 열교환기 파이프 내의 순환수의 열적 특성에 의해 유발되는 파이프의 변위량을 계측하여 허용 변위와 비교하였다. 즉 순환수의 흐름이 파이프 내에 변위를 유발하는지를 모형 토조 실험을 통해 살펴보았다.

표 3-4-1 계측설비별 요구사항

계측설비	요구사항	확인방법
인버터	CT 정확도 3% 이내	· 관련 내용이 명시된 설비 스펙 제시 · 인증 인버터는 면제
온도센서	정확도 ±0.3℃(-20~100℃)미만	· 관련 내용이 명시된 설비 스펙 제시
	정확도 ±1℃(100~1000℃)이내	
유량계, 열량계	정확도 ±1.5% 이내	· 관련 내용이 명시된 설비 스펙 제시
전력량계	정확도 1% 이내	· 관련 내용이 명시된 설비 스펙 제시

표 3-4-2 측정 및 모니터링 항목

구분	모니터링 항목	데이터(누계치)	측정 항목
태양광, 풍력 수력, 폐기물 바이오	일일발전량(kWh)	24개(시간당)	-인버터 출력
	생산시간(분)	1개(1일)	
태양열	일일열생산량(kW)	24개(시간당)	- 열교환기-축열조 입출구 온도 - 축열부 유량(열량)
	생산시간(분)	1개(1일)	
폐기물, 바이오	일일열생산량(kW)	24개(시간당)	- 부하측 입출구 온도차, 유량
	생산시간(분)	1개(1일)	
지열	일일열생산량(kW)	24개(시간당)	- 물-물 방식 ・부하측 입출구 온도차, 유량 - 물-공기(냉매)방식 ・지열원측 입출구 온도차, 유량 -전력소비량 ・히트펌프, 축열&지중 펌프
	생산시간(분)	1개(1일)	
	전력소비량(kWh)	24개(시간당)	
수소・연료전지	일일발전량(kWh)	24개(시간당)	-인버터 출력
	일일열생산량(kW)	24개(시간당)	
	생산시간(분)	1개(1일)	
해수온도차	일일열생산량(kW)	24개(시간당)	- 물-물 방식 ・부하측 입출구 온도차, 유량 - 물-공기(냉매) 방식 ・해수열원측 입출구 온도차, 유량 - 전력소비량 ・히트펌프, 해수취수펌프
	생산시간(분)	1개(1일)	
	전력소비량(kWh)	24개(시간당)	

1. 광섬유 센서의 원리

가. 광섬유 센서

광섬유 센서의 경우 측정할 물리량이 있는 곳에 손쉽게 빛을 전달하는 역할뿐 아니라, 광섬유를 구성하고 있는 유리를 매개로 빛과 측정하고자 하는 외부신호 사이에 상호작용을 일으키게 하는 역할을 한다. 대부분의 광섬유 센서에서는 광섬유에 가해지는 외부 물리량의 변화(신호)에 의해 광섬유 속을 진행하는 빛에 유도되는 여러 가지 특성 변화를 측정하게 되는데, 외부에서 가해지는 신호에는 온도, 압력, 전기장, 자기장, 회전, 화학물질의 농도, 기계적인 움직임 등 거의 모든 종류의 물리량들이 포함된다. 이러한 신호들에 의해 변화되는 빛의 성질에는 세기, 위상, 편광, 파장 등이 있으며, 이들의 미세 변화를 측정할 수 있는 여러 가지 방법들이 동원된다. 좀 더 구체적으로 빛의 성질을 변화시키는 물리적 현상의 예로는 굴절률 변화(온도, 압력, 인장력, 화학물질의 농도 등), 편광 상태의 변화(전기장, 자기장, 압력 등), 파장에 따른 광손실의 변화(화학물질의 농도, 구부림 등) 등 다양하다. 이와 같은 여러 가지 빛의 특성 변화를 읽어, 원하는 외부 물리량의 변화를 측정하는 것이 광섬유 센서의 기본 원리이다.

광섬유 센서가 다른 센서들에 비해 갖는 장점들은 전자소자 대신에 빛을 이용해 측정한다는 사실과, 이 측정신호의 전달 역시 빛으로 하고 있는 데서 기인한다. 우선 전기가 통

하는 전도체가 포함되어 있지 않으므로 주변의 여러 장치에서 발생할 수 있는 전자파 장애에 의한 잡음이 없고, 전기적인 접지, 누전, 감전 등의 염려가 없다. 크기가 작고 가벼우며, 거의 모든 종류의 물리량 측정에 이용할 수 있다. 특히 파장이 매우 짧은 빛을 기준으로 측정하게 되어 매우 높은 감도를 보장하고 있다. 뿐만 아니라 통신의 경우와 마찬가지로 광손실이 적고 정보전송 대역폭이 넓어 많은 수의 센서를 광섬유 한가닥에 연결하여 동시에 측정할 수 있는 배열형 센서가 가능하며, 수십 km 떨어진 거리에서도 원격측정을 할 수 있고, 위치에 따른 물리량의 분포를 측정하는 분포계측이 가능하다. 또한 광섬유 센서를 이용하면 기존의 기술로는 센서의 동작이 불가능한 환경에서도 사용할 수 있다. 예를 들면 전자파 장애가 많은 환경(발전소, 변전소, 전기용접 등이 이루어지는 공장 등), 전자레인지 내부, 환자 혈액의 실시간 모니터링, 고온 다습 고압력의 환경, 폭발위험이 있는 환경 등이 있는 곳에 광섬유 센서는 특별한 어려움 없이 사용될 수 있다.

나. FBG 센서의 원리

FBG(Fiber Bragg Grating)센서는, 한 가닥의 광섬유에 여러 개의 광섬유 브래그 격자를 길이에 따라 새긴 후, 주변 온도나 인장 강도에 따라 각 격자에서 반사되는 빛의 파장이 달라지는 특성을 이용한 센서이다. 광섬유 브래그 격자는 광섬유 코어의 굴절률을 주기적으로 변화시킨 것을 말한다. 이 격자는 브래그 조건을 만족하는 파장만을 반사하고, 그 외의 파장은 그대로 투과시키는 특징을 갖는다. 격자의 주변 온도가 바뀌거나 격자에 인장이 가해지면, 광섬유의 굴절률이나 길이가 변화되므로 반사되는 빛의 파장이 변화된다. 따라서 광섬유 브래그 격자에서 반사되는 빛의 파장을 측정함으로써 온도나 인장, 또는 압력, 구부림 등을 감지할 수 있다. 그림 3-4-1은 FBG 센서의 구조를 나타낸다.

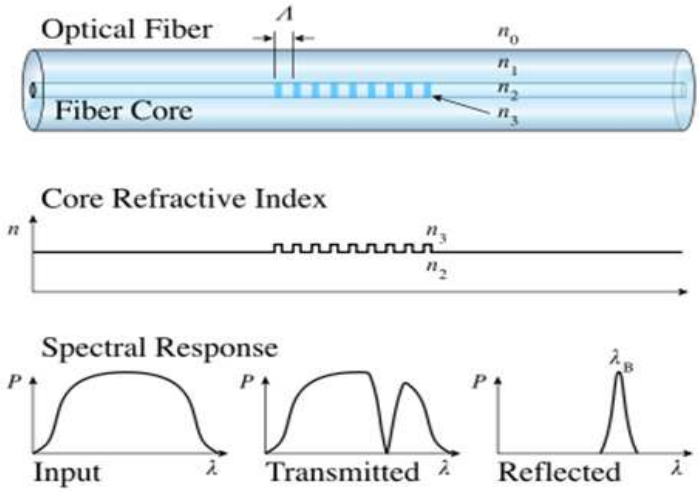


그림 3-4-1 Fiber Bragg Grating의 구조

광폭 스펙트럼을 광섬유에 입사 시킬 경우 굴절률이 변하는 경계면에서 빛이 반사하는

데 이들 중 다음의 식 (4.1.1)과 같은 브래그 조건(Bragg condition)에 의해서 결정된 파장 성분은 보강 간섭을 일으켜 광섬유 브래그 격자 부위에서 반사되며 나머지 파장 성분은 통과하게 된다.

$$\lambda_B = 2n_e\Lambda \tag{4.1.1}$$

여기서, n_e는 광섬유 격자의 유효 굴절률, Λ는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격(grating period)이다. 위의 브래그 조건에서 보듯이 격자에서 반사되는 브래그 파장은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이다. 그리고 유효 굴절률과 격자의 주기는 온도와 변형률의 함수이므로 광섬유 브래그 격자에 온도나 변형 등의 외란이 가해지면 이들 값이 변하여 브래그 파장이 달라진다. 브래그 조건에서 브래그 파장을 전미분을 취한 후 온도, 변형률과 유효 굴절률, 격자 간격의 식을 대입하면 식 (4.1.2)를 얻을 수 있다. 변화된 브래그 파장을 정밀하게 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 온도나 변형률을 식 (4.1.2)를 통하여 계산해 낼 수 있으며, 이것이 광섬유 브래그 격자가 센서로 사용될 수 있는 기본 원리이다.

$$\triangle\lambda_B = \lambda_B[(\alpha+\zeta)\triangle T+(1-p_e)\epsilon] \tag{4.1.2}$$

여기서, p_e는 광탄성 상수(photoelastic constant)이며 식 (4.1.3)과 같이 표현된다.

$$p_e = (\frac{n^2}{2})[p_{12}-\nu(p_{11}+p_{12})] \tag{4.1.3}$$

식 (4.1.2)에서 α는 광섬유의 온도에 따른 팽창계수(thermal expansion coefficient)이고 ζ는 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학 계수(thermal-optic coefficient)로서 실리카의 경우, $\alpha \sim 0.510^{-6}$, $\zeta \sim 8.310^{-6}$정도의 값을 가지므로 온도에 의한 브래그 파장 변화는 대부분 굴절률 변화에 기인한다. 또한 식 (4.1.3)의 p_{11}과 p_{12}는 스트레인 광학 센서(strain-optic constant)의 성분이며 n은 코어의 굴절률, ν는 광섬유의 포아슨 비이다. 광탄성 상수 p_e는 germanosilicate glass의 경우 대략 0.22의 값을 가진다고 알려져 있으나 광섬유에 따라 다른 값을 가질 수 있으므로 정확한 변형률의 측정을 위해서 이 값의 측정이 요구된다. 식 (4.1.2)에서 파장의 변이는 온도의 변화에 의한 것과 변형률의 변화에 의한 것을 모두 포함하고 있는데, 광섬유로 측정 가능한 범위 내에서는 대체로 선형적이다. FBG 센서는 하나의 광섬유 선에 여러 개의 브래그 격자 센서를 배열하여 멀티플렉싱(multiplexing)이 가능하다(그림 3-4-2). 광섬유 브래그 격자 센서는 한 가닥의 광섬유에 여러 개의 격자가 사용되는데, 이 경우 각 격자의 반사 파장을 모두 다르게 함으로써 반사된 빛의 스펙트럼으로부터 특정 격자가 겪는 물리량을 쉽게 구분할 수 있다. 이러한 방법을 파장분할방식이라고 하는데, 이 방법에서는 광원의 한정된 선폭

에 의하여 측정할 수 있는 격자의 개수에 제약을 받는다. 측정할 수 있는 격자의 개수를 증가시키기 위한 방법으로 파장분할방식과 시간분할방식을 병행하기도 한다.

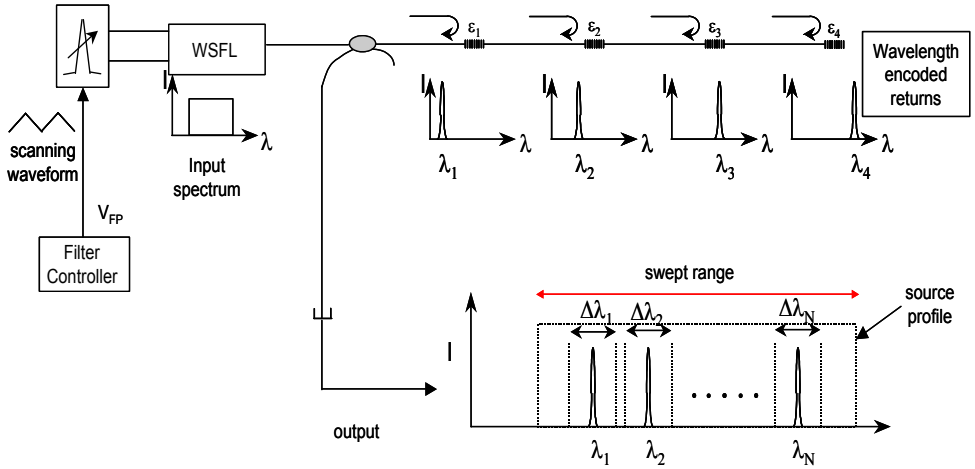


그림 3-4-2 FBG 광섬유 센서의 멀티플렉싱 (Park, 2006)

2. 스마트 모니터링 실험

가. 광섬유 온도센서 적용 실험

2.3 절에서 소개되었듯이 실내에 그림 3-4-3 과 같은 모형토조를 이용하여 지중 열교환기를 설치한 후 실내 열응답 실험을 수행하였다. 10mm 의 폴리에틸렌폼으로 토조 내부, 외부 및 바닥에 단열처리를 하였으며 보다 확실한 단열처리를 위해 토조 외부에 천막을 설치한 후 실험기간동안 원적외선 난방기를 가동하여 천막 내의 온도를 일정하게 유지시켰다.



(a) 모형 토조의 설치 (b) 단열스티로폼 설치 (c) 천막 설치

그림 3-4-3 모형 토조

모형 토조 내 주문진 표준사가 균질하게 조성되었으며 본 연구에서 개발된 열응답 측정 기내의 순환 배관은 모형토조 내의 지중열교환기와 연결된 후 열전도도 시험이 수행되었다. 그림 3-4-4는 토조 내부에 U자형 지중 열교환기를 설치하고 주문진 표준사를 채워 넣은 후 열응답 실험 전 토조의 최종 단면을 나타낸다. 실험에 사용된 열응답 시험기의 제원 및 사진은 표 4.2.1과 같다. 열응답 시험기는 윤석 등(2011)이 개발한 것으로써 일반 전기식 센서 외에 광섬유 센서도 측정할 수 있는 기능도 탑재되어 있다. 또한 열응답 시험기 안에 실시간 모니터링 시스템을 구축하기 위하여 소프트웨어 프로그램이 설치되어 있어 실시간적으로 온도를 측정하고 저장할 수 있으며 투입전력, 유량 및 측정 시간 등을 제어할 수 있다.

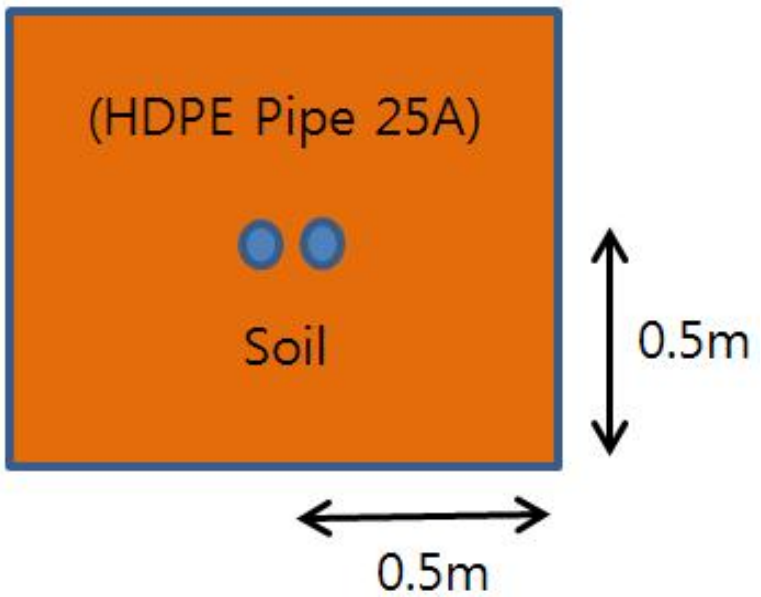
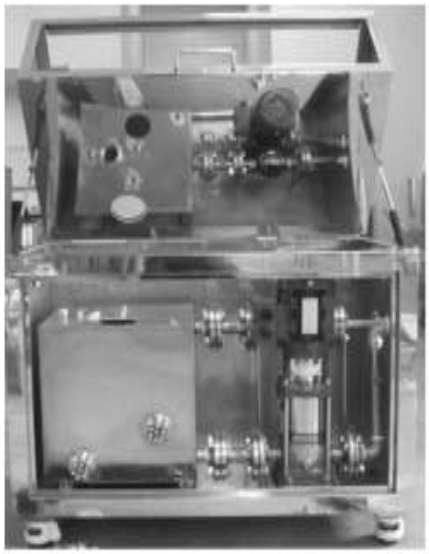


그림 3-4-4 모형 토조의 단면 모양

표 3-4-3 열응답 시험기의 제원 및 사진

부품명	비고	
Heater	순환열유체 가열 (총 용량 10kW)	
Water Tank	50L (SUS 304)	
Flow meter	2~120 lpm Model: M10ASP	
Pump	40lpm, 50m 양정 Model: Grundfos UPS40	
Temp. Sensor	RTD, FBG	
Recorder	4ch interrogator	
Electrical unit	PID 전력량 제어	

지반의 열전도도를 구하기 위해 지중 열교환기 입출구 부위에 온도 센서를 설치하여 실험 동안의 순환수 입출구 온도를 실시간적으로 계측하여야 한다. 본 연구에서는 광섬유 센서의 적용성을 검토하기 위하여 기존에 많이 사용되고 있는 RTD 센서 외에 FBG 온도 센서도 그림 3-4-5 과 같이 파이프 벽면에 부착하여 온도를 측정하였다. 또한 지반에서의 열전달 거동도 파악하기 위하여 지중 열교환기에서 10cm, 20cm 떨어진 거리에 FBG 센서를 설치하여 온도를 측정하였다. FBG 센서의 멀티플렉싱 기능을 적용하기 위해 두 가닥을 사용해 한 가닥에 두 개의 센서를 부착하였다. 한 가닥은 파이프 입출구 부위에 부착하였고 다른 한 가닥은 토사 온도를 측정하였다.

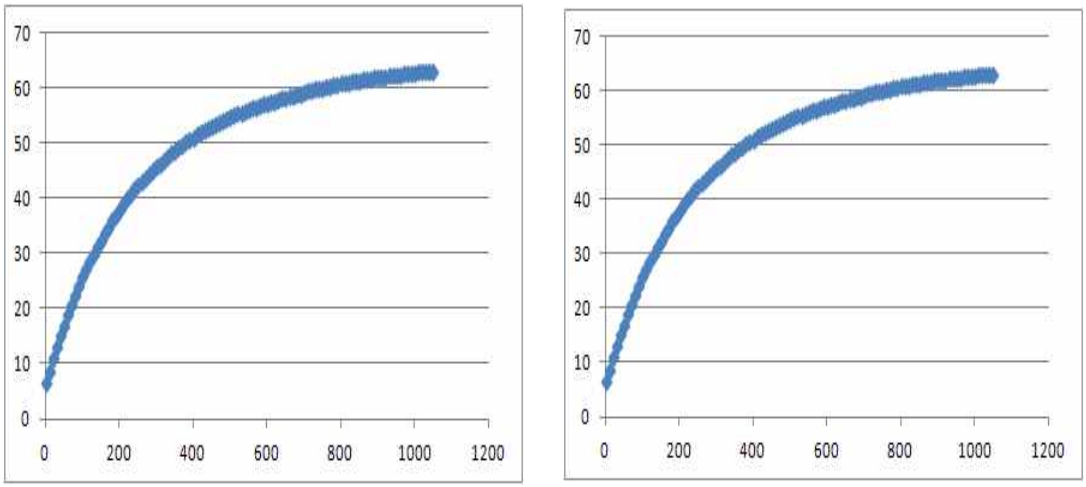


(a) 온도센서 부착 (b) 접착제 부착

그림 3-4-5 파이프 외벽 온도센서 부착과정

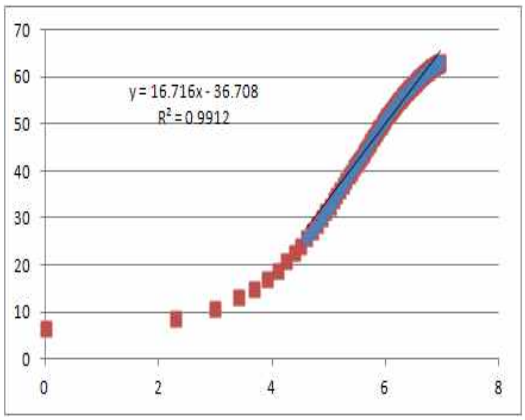
나. 온도 측정 실험 결과

U 자형 지중 열교환기를 설치하여 250W 의 열량을 순환수를 통하여 모래에 공급하였으며 순환수 초기온도는 6.5℃ 에서 시작하여 63℃ 가 될 때까지 약 18 시간동안 실험이 수행되었다. RTD 센서와 FBG 센서를 파이프 입출구에 동시에 부착하여 시간에 따른 온도 변화를 측정하였으며 이를 식 (2.3.2)를 이용하여 주문진 표준사의 열전도도 값을 산출하였다. 그림 3-4-6 는 RTD 센서와 FBG 센서의 시간에 따른 지중 열교환기 입출구에서 측정한 온도의 평균값의 분포를 보여주고 있으며 그림 3-4-7 는 열응답 시험 수행 시간을 로그좌표로 하여 지중 열교환기 입출구에서 측정한 온도의 평균값의 분포를 나타낸 것이다.

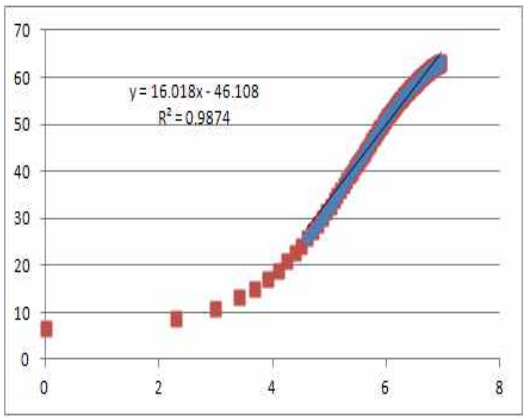


(a) RTD 센서로 측정한 온도분포　　(b) FBG 센서로 측정한 온도분포

그림 3-4-6 시간(분 단위)에 따른 온도분포



(a) RTD 센서로 측정한 ln시간 온도분포



(b) FBG 센서로 측정한 ln시간 온도분포

그림 3-4-7 ln시간에 따른 온도분포

실험결과 RTD 센서와 FBG 센서에서 측정된 온도차는 0.1~0.3°C 정도로 오차율은 5% 이내로 나타났다. 이는 실험 전에 FBG 센서의 파장을 RTD 센서의 온도값을 기준으로 식 (4.1.2)와 같이 변환시킨 후 변환식을 열응답 시험기의 알고리즘에 반영한 결과이다. RTD 센서를 사용한 열전도도 값은 대략 0.29W/m·K 이었으며 FBG 센서를 이용한 열전도도 값은 0.30 W/m·K 값을 보였다. 지중 열교환기에서 10cm, 20cm 떨어진 지점에서 FBG 센서를 사용하여 온도변화를 측정한 결과는 그림 3-4-8 과 같다. 두 지점 모두 초반에는 온도가 조금 떨어졌다가 증가하는 경향을 보였으며 열원에서 가까울수록 온도 증가 기울기가 크다는 결과를 보였다.

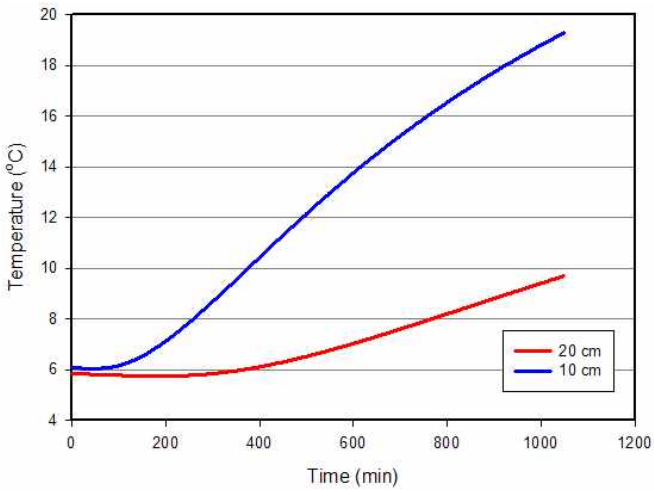


그림 3-4-8 파이프로부터 10cm 및 20cm 거리에서의 온도분포(FBG 센서)

본 연구에서 광섬유 센서와 RTD 센서를 이용한 열응답 시험 결과(RTD: 0.29W/m·K, FBG: 0.30W/m·K)는 유사한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 열응답 시험에서 산출된 열전도도는 순환수 대류에 의한 저항과 U 타입 파이프의 저항이 모두 고려된 값이기에 주문진 표준사만의 실제 열전도도는 0.29~0.30W/m·K 값보다는 더 작을 것으로 판단된다. 따라서 FBG 센서는 지반의 열전도도 측정에 적합하다고 생각된다. 또한, 스마트 모니터링 시스템에 FBG 센서를 사용하면 하나의 광섬유 선에 여러 개의 센서를 연결할 수 있어(멀티플렉싱) 복잡하지 않게 설치할 수 있고, 정보 손실률이 낮으며 불리한 환경(전자파, 고온다습, 고압력 등)에서도 내구성이 우수하므로 유지관리 측면에서 유리하다. 그러므로 광섬유 센서를 기반으로 한 실시간 스마트 모니터링 시스템은 지열냉난방시스템에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

다. 변위 센서 적용 실험

일반적으로 지중 열교환기 파이프 내의 순환수 온도는 냉방 난방 조건에 따라 0~30℃의 값을 갖는다. 따라서 파이프 내부는 순환수 온도에 의한 열응력이 작용할 것이며 이는 파이프의 열팽창에 의해 변위를 수반할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 모형 토조 실험을 통하여 지중 열교환기 파이프 내부 순환수 흐름에 의한 온도 응력이 파이프에 초래하는 팽창변위를 측정하여 이의 안정성 여부를 판단하고자 하였다.

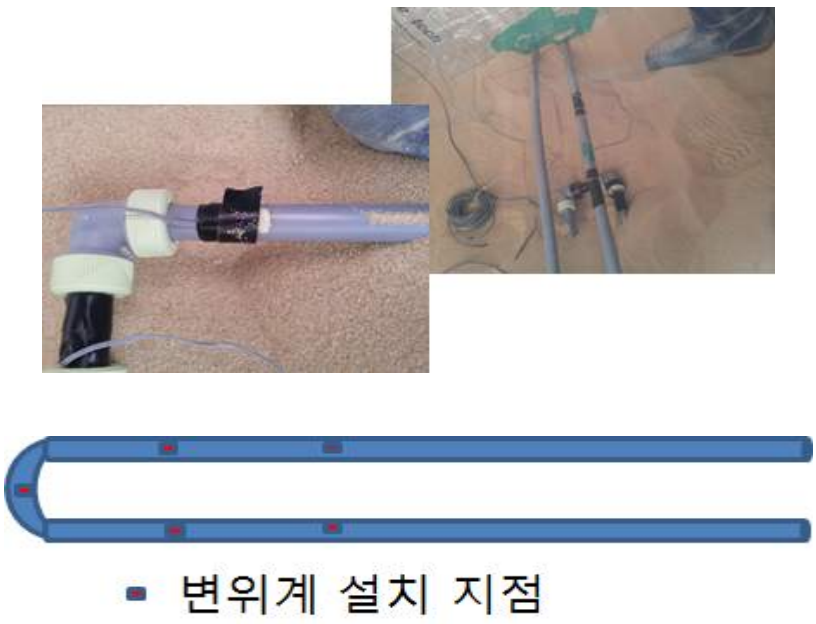


그림 3-4-9 파이프 외부 변위센서

그림 3-4-9 과 같이 파이프 외부 5 개 지점에 변위센서를 설치하였으며 파이프 내부 순환수의 온도 증가에 따른 변위를 실시간적으로 계측하였다.

라. 변위 센서 적용 실험 결과

그림 3-4-10 과 같이 파이프 내부에는 순환수 흐름에 의해 파이프 지름방향으로 압력이 작용한다(Gere, 2009). 따라서 파이프 내부의 압력에 저항하기 위해 파이프의 두께는 식 (4.2.1)과 같이 설계되어진다.

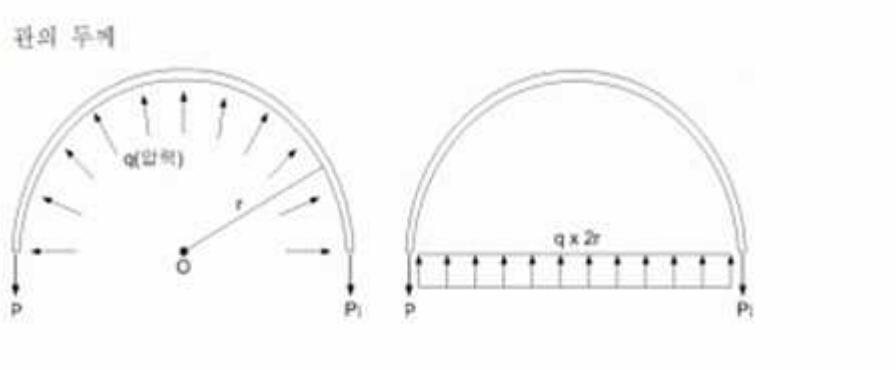


그림 3-4-10 구형 압력 용기의 단면

$$t \geq \frac{pr}{\sigma_a} \tag{4.2.1}$$

여기서 p 는 파이프 내부 압력값을 나타내며, r 은 파이프의 내부 반지름 그리고 σ_a 는 파이프 내부 허용 응력을 뜻한다. 또한 파이프 내부의 온도차에 의한 팽창 열응력은 식 (4.2.2)와 같이 계산된다.

$$\sigma = E\alpha\Delta T \tag{4.2.2}$$

여기서 E 는 파이프의 탄성계수, α 는 팽창계수 그리고 T 는 온도값을 나타낸다. 표 3-4-4 는 시험에 사용된 PB 파이프의 열적 물성치를 나타내고 있다.

표 3-4-4 PB 파이프 물성치

항복인장강도	탄성계수	선팽창율	열전도도	상용압력 (20~30도)
170 (kgf/cm^2)	4000 (kgf/cm^2)	1.3~1.5 (10^{-4} /K)	0.38 W/m·K	15.7~16.6 (kgf/cm^2)

본 시험에서 사용된 파이프는 20A (외부/내부 직경 = 20mm/16mm)가 사용되었으며 일반적으로 파이프 배관내부에 작용하는 압력을 10kgf/cm² 로 가정했을 때 식 (4.1.4)에 의한 파이프의 두께는 0.47mm 로 산정이 된다. 또한 지열 파이프의 일반적인 냉난방 온도인 0~30°C 범위에서의 열팽창 응력은 18 kgf/cm² 로 산정이 된다. 따라서 파이프 내부의 순환수 온도에 의해 열팽창 변위는 거의 발생되지 않을 것으로 판단된다.

그림 3-4-11 는 순환수 흐름시 시간에 따른 파이프 외부 변위값을 보여주고 있다. 당초 지열 가동시간인 최소 8~10 시간 동안 연속으로 대략 30°C 이상의 온도차를 가해 실험을 수행하고자 하였으나 모형 토조 내 파이프 탈착으로 인하여 약 10 분 동안 실험이 수행되었다. 실험 결과 파이프 내부 순환수 온도는 18~28°C 를 나타내었으며 파이프 외부 변위는 10um 미만으로 극히 미미한 값을 나타냈다. 본 실험 조건은 파이프 외부는 단위중량 14 kN/m³ 값의 느슨한 상태의 모래로 둘러쌓여져 있는 조건임에도 파이프 외부 변위는 극히 작은 값을 보였다. 하지만 실제 수직밀폐형 시공시 파이프 외부는 그라우팅으로 채워지기에 파이프 내부 순환수의 온도차에 의한 파이프 변위는 더더욱 발생되기 어려울 것으로 판단된다. 따라서 지열시스템 설계 및 운영에 있어 파이프의 팽창변위는 고려할 필요성이 없을 것으로 사료된다. 만약 계측시스템을 적용하는데 있어 온도 외에 변위값도 계측되어야 한다면 광섬유를 이용한 다중 계측 시스템을 도입하여 센서 하나로 온도 및 변위값을 동시에 계측할 수 있는 스마트 모니터링 시스템이 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

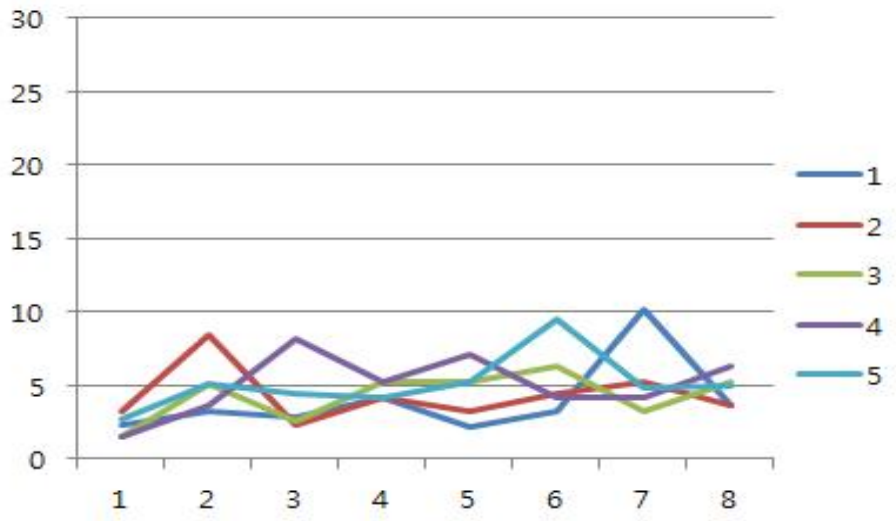


그림 3-4-11 시간에 따른 파이프 변위

5절. UTECUS 경제성 분석 기법 개발

지중열 에너지 시스템의 적용을 위해서는 기존 에너지 시스템과의 경제성 분석(economic analysis) 및 사회적, 환경적 영향이 반드시 비교 평가되어야 한다. 이를 위해서는 적절한 경제성 분석방법이 선정되어야 한다. 따라서 지금까지 이와 유사한 경우에 사용되어진 경제성분석 방법들에 대한 고찰과 기존 사례 검토가 필수적이다. 지중열 에너지의 경제성 분석은 열 부하(heating load, cooling load) 조건 분석 후, 적용 가능한 여러 가지 대안에 대한 손익분석을 수행하여 가장 경제적이고 기술적으로 우수한 대안을 선택하게 된다. 이를 통해 연간 수익과 비용(지출)을 분석하여 목적물의 수명 기간 이내에 경제성 여부를 판단하게 된다(산업자원부, 2005).

따라서 본 절에서는 다양한 경제성 모델의 비교와 기존 사례 검토를 실시하였으며, 이를 토대로 건설 예정인 인천국제공항 제 2 여객터미널에 지열 시스템 적용에 따른 생애주기 비용 분석을 통해 지열 에너지 활용에 따른 경제성을 평가하여 비용 절약 부분을 정략적으로 분석하였다. 또한 지열 시스템 선정을 위한 의사결정시 필요한 경제성 분석을 위한 프로그램 개발 연구에 대해 기술하였다.

1. 경제성 모델 및 기존 사례 조사

투자사업의 타당성을 평가하는데 있어서 경제성 분석은 중요한 의미를 갖는다. 경제성 분석이란 사업시행으로 인한 편익과 비용의 증가분을 각각 측정하여 사업이 전체적으로 볼 때 순편익의 증가를 가져오는지 아니면 감소를 초래하는지 평가하는 작업을 의미한다. 경제성 분석을 하기 위해서는 편익과 비용의 증가분을 측정하는 것이 핵심이며 이에 대한 연구와 기법개발이 지속적으로 이루어져 왔다.

경제적 편익은 개별 사업에 따라 적용할 수 있는 방법이 각기 다르기 때문에 어떠한 방법을 사용하는 것은 바람직하지 않다. 즉, 특정한 사업에 따라 경제적 편익의 개념을 고려해, 보다 충실히 그 가치를 잘 반영할 수 있는 방법들을 적용하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 적절한 경제성 분석 방법 선정을 위해 경제성 분석 모델 검토 및 기존 사례 조사를 실시하였다.

가. 경제성 모델

일반적인 경제성 분석방법은 자본투자사업의 가치평가를 위한 현금흐름 할인방식이 이용된다. 현금흐름 할인율은 투자비에 기대되는 현재가치를 동일하게 만드는 내부수익률법과 순현재가치법(NPV: net present value), 편익/비용율법(B/C: benefit/cost ratio), 회수기간법(payback period)등이 있다. 또한 목적물의 생애주기 동안의 총비용을 산정하여 비교대

상과의 경제성을 비교하는 생애주기비용(LCC: life cycle cost) 분석을 실시한다. 일반적으로 새로운 대안이나 신기술의 개발 및 적용 시에는 기존의 기술과의 경제성 비교를 통해 제시된 대안이나 기술의 적용 가능성을 검토하는 것이 유용하다. 뿐만 아니라 새로운 대안 및 신기술의 사회적, 환경적 영향성을 함께 검토하는 것이 바람직하다.

(1) 순현재가치(NPV: net present value)

순 현재가치는 미래의 편익에서 비용을 제외한 일정 금액에 대해 물가상승률 등의 이자율을 고려하여 현재의 가치로 할인한 금액을 의미한다. 이러한 순 현재가치의 계산방법은 다음과 같다.

$$NPV = (B_0 - C_0) + \frac{B_1 - C_1}{(1+r)} + \frac{B_2 - C_2}{(1+r)^2} .... + \frac{B_n - C_n}{(1+r)^n} \quad (5.1.1)$$

여기서, B_t = t년도의 편익, C_t = t년도의 비용, r = 할인율(이자율), n = 사업의 분석기간 이다. 순 현재가치를 이용한 분석방법은 사업의 수행에 따른 가치측정 및 부가가치를 측정하는 것으로 순현재가치가 양의 값이면 투자에 대해 긍정적으로 평가할 수 있다. 순현재가치를 이용하는 장점은 비용의 시간가치 개념을 적용하여 미래의 현금흐름을 직접적인 비교가 가능하도록 오늘날의 가치로 환산하여 평가할 수 있고, 인플레이션과 그의 단계적 상승을 고려할 수 있으며, 사업의 전반적인 상황을 확인할 수 있다는 것이다. 단점으로는 미래의 현금흐름과 할인율의 정확성에 따라 분석의 정확도가 좌우되고 일반적으로 단기간의 사업 분석에 사용되면 시장잠재력과 같은 비재무적 자료의 분석이 고려되지 않는다. 또한 일반적으로 고정된 할인율을 사용하여 분석되기 때문에 분석 시 유의해야 한다.

(2) 편익/비용율법(B/C: benefit/cost ratio)

편익/비용율법은 투자 사업으로 인하여 당해 사업의 내구연한 동안에 발생하는 편익의 현재가치 총액을 비용의 현재가치 총액으로 나눈 비율을 이용하는 방법으로서 주어진 할인율(자본의 기회비용)을 적용하여 편익/비용의 비율이 1이상이면 사업이 경제적 타당성을 갖는 것으로 판단한다.

편익/비용율법은 초기 투자비에 대한 부담이 있는 상태에서 여러 가지 투자 대안이 있을 경우 각각에 대한 우선순위를 평가할 때 사용하는 기법으로서, 단일한 투자대안에 대한 평가결과는 순현재가치법과 동일하다. 비용 편익비의 일반적인 계산 방법은 다음과 같다.

$$B/C = \sum_{t=0}^{n} \frac{B_t}{(1+r)} / \sum_{t=0}^{n} \frac{C_t}{(1+r)} \quad (5.1.2)$$

여기서, B_t = t년도의 편익, C_t = t년도의 비용, r = 할인율(이자율), n = 사업의 분석기간이다.

(3) 내부수익률(IRR: internal rate of return)

내부수익률은 순현재가치가 0이 되는 할인계수의 값을 의미한다. 내부 수익률의 계산은 시행착오법(trial and error method) 또는 내부수익률에 대한 순현재가치의 도식적인 표현(plotting)을 통해 산출되어질 수 있다.

$$C_0 = \sum \frac{B_t}{(1+d)^t} \quad (5.1.3)$$

여기서, C_0 = 초기 투자비, B_t = t년도의 편익, d = 내부 수익률이다. 내부수익률 분석은 투자회수의 측정이므로 가장 높은 내부수익률을 지니는 사업을 선택하는 것이 바람직하며, 현행의 할인율과 비교하여 판단하는 기회를 제공받을 수 있다. 사업이 바람직한 타당성을 확보하기 위해서는 분석시점의 할인율보다 내부 수익률이 커야 한다. 내부 수익률을 이용한 분석은 사업 기간 동안 동일한 할인율을 적용하기 때문에 사업의 존속기간이 확장되는 경우는 능동적으로 대처할 수 없게 된다는 한계를 지니고 있다.

(4) 회수기간법(payback period)

회수기간은 초기의 실제자본투자와 재무적인 자본의 획득이 동등해지는 기간을 의미한다. 각 대안의 회수기간을 계산한 후 그 기간이 짧은 대안을 최선으로 선정하며, 회수기간은 투자에서 얻는 이익이나 수입으로 투자액 전액을 회수하는데 드는 기간으로 초기 투자비만을 비교하여 대안 선정한다. 그리고 설비 최종 사용자나 건물주가 투자된 자금을 빨리 회수하는 데 관심이 있을 때 유용하다. 그러나 설비의 수명, 유지관리비용, 이자율 등을 무시한다.

$$\text{투자회수기간(년)} = \frac{\text{초기투자비/투자비차액(원)}}{\text{연간에너지절약비용(원/년)}} \quad (5.1.4)$$

회수기간법이 갖는 장점은 간단 편리하고, 가장 짧은 회수기간을 선택함에 대한 불확실성을 감소시킬 수 있고, 사회적인 수요경향의 변화에 따른 위험이 많은 수요경향선별에 적합하다는 것이다. 단점으로는 서로 다른 현금흐름 특성을 지닌 사업이라 하더라도 동일

한 회수 기간을 지니고 있는 경우에 동일하게 판단되어질 수 있는 것이다. 또한, 회수기간 이후의 현금흐름에 대해서는 고려하고 있지 않다. 비록 회수기간이 짧다 하더라도 전체적인 현금흐름으로 판단할 경우 보다 나은 대안이 존재할 수 있으며, 이러한 대안이 무시될 수 있다는 단점이 있다. 또한 장기간의 사업일 경우 사업의 결과에 인플레이션이나 할인율이 큰 영향을 미치는 경우 이를 평가하는 기법으로는 적합하지 않고 오직 현금흐름에만 의존하고 있어 다른 재무적 자료에 대한 고려가 무시될 수 있으며, 위험의 존속기간을 감소시킬 수 있을지라도 위험노출에 대한 정량화가 어렵다.

(5) 투자 회수율(ROI: return on investment)

자본회수율은 초기투자에 대한 연평균이익을 백분율로 나타낸 것이다. 자본회수율 법의 장점으로는 계산이 편리하고 사업 전체에 대한 현금흐름을 고려할 수 있으며, 투자의 결과로 도출되는 연평균이익, 총이익, 총지출 그리고 자본회수율은 사업관리자가 사업의 타당성을 쉽게 이해될 수 있는 지표로 활용될 수 있다는 것이다. 자본회수율이 지니는 단점은 높은 초기이익이 발생하는 사업이 선호됨에도 불구하고 전체 사업기간에 대한 자본회수율로 판단됨에 따라 사업 후반부에 이익이 발생하는 경우와 구분하여 판단할 수 없다.

나. 생애주기비용 분석(LCCA: life cycle cost analysis)

생애주기비용은 일반적으로 생산, 사용, 폐기처분의 각 단계에서 생기는 비용을 합한 총 비용을 말하며, Project의 여러 가지 투자 대안 중 최적 안을 선택하는데 고려하여야 할 모든 중요한 요소들에 대해 주어진 기간에 따른 금전적 가치의 비교를 통하여 경제적 평가를 수행하게 된다. 투자예산계획 및 비용편익분석 분야에서 도입된 할인율의 적용원리가 건설 분야의 특정영역에 적용되었는데, 이에 대한 구체적인 예가 생애주기비용분석 기법이라 할 수 있다. 생애주기비용분석 기법은 초기 자본비용 뿐만 아니라 단계적인 자본비용의 투자를 필요로 하는 Project 또는 자산의 확보를 위하여 적용할 수 있는 전반적인 비용분석방법으로써 Project의 확립된 목적에 대한 경쟁적인 대안들 사이의 비교를 통한 효과적인 선택과 시간 간격에 따라 자산의 운영비용을 평가함으로써 효과적인 자산관리를 가능하게 한다. 또한 시설물의 부위별 구성요소에 대한 가동시간, 새로운 설비의 도입, 유지관리 수준 등 실제 작업과정에서 나타나는 변화의 결과를 예측함으로써 부위별 구성요소의 설계를 도와준다.

생애주기비용 분석은 Project 대안 선정의 의사결정에 활용할 수 있는 비용정보를 제공하여 가장 경제적인 대안 선정을 주요 목적으로 한다. 이 때 고려되는 내용은 다음과 같은 요소들이 있다.

$$LCC(Life\ Cycle\ Cost) + \text{비경제적인 요소} \tag{5.1.5}$$

(비경제적요소 : 안전(Safety), 신뢰성(Reliability), 운영성(Operability), 환경요인)

생애주기비용에 고려되는 비용 및 가치는 Project의 시작에서 완성까지 계획된 기간에 걸쳐 매우 넓고 다양하며, 주요 내용으로 투자비용(investment costs), 부지구입비용(land acquisition costs), 설계비용(engineering and design costs), 재설계비용(redesign costs), 관리비용(administrative costs), 대체비용(replacement costs), 잔존가치(salvage value), 운영비용(operating costs)등이 있다.

다. 국내외 사례 분석

국내외 지중열 시스템 및 신재생 에너지 시스템에 대한 경제성 분석사례 조사를 실시하였다. 조사 결과 국내외 모두 지중열 에너지 시스템 적용이 기존 에너지 시스템보다 경제성이 우수하다는 결론을 얻었다.

(1) 지중 열 자원 활용의 경제성 분석 외국 사례 조사

(가) 스위스의 사례

Rybach and Gorhan (2005)은 표 3-5-1과 같이 석유보일러와 지열 열펌프의 고정비용 및 운영비용을 비교하였다. 각각의 비용은 Swiss francs의 값이다. 고정비용으로 기계 및 설비비용, 지중 열교환기(BHE: borehole heat exchanger) 설치비용, 면적비용, 기타 설비비용을 산정하였으며 운영비용으로 전력 및 화석연료 소비, 운영 기타 비용, 배기비용을 산정하고 이산화탄소 배출량을 참고적으로 제시하였다. 스위스의 경제성 분석 결과 석유보일러 사용에 비해 54%의 연간 운영비용을 절감할 수 있으며 기계 및 설비비용, 면적비용 등을 포함한 고정비용 또한 석유 보일러의 97% 수준으로 경제성을 확보한 것으로 나타났다.

(나) 미국의 사례

National Renewable Energy Laboratory (NREL; 2004)에서는 Energy Efficiency and Renewable Energy Programs에 의해 지원된 신재생에너지 공급으로 인해 예상되는 편익을 산정한 바 있다. 지하 열자원에 대해서는 지열 발전을 대상으로 표 3-5-2와 같이 2050년까지 예상되는 편익을 산정하였다. 예상되는 편익(projected benefit)의 산정방식은 National Research Council (NRC) Matrix로 불리는 분석틀에서 Framework Emerged from 2003 Conference 등을 통해 수정된 것으로 지하 열 자원에 대해서는 에너지소비량 저감에 대한 화폐가치를 산정하고, 이산화탄소 저감, 천연가스 저감, 추가적 중앙 전력 생산량 저감에 대해서는 효과의 크기만을 제시하였다. 그리고 표 3-5-3에서 확인 할 수 있

듯이 가정용 지하 열자원 이용 열펌프에 대해서 미국의 IGSHPA는 설치 후 2~3년이면 초기 추가 투자비를 회수할 수 있으며 전기 난방장치에 비해 연간 880 $ 이득을 볼 수 있음을 나타내었다.

표 3-5-1 지하 열 자원 이용 열펌프와 석유보일러의 비용 효과 비교(Rybach and Gorhan, 2005)

구 분		Units	지열 열펌프 (수직형 BHE 90m)	석유 보일러 (Tank 2 × 2000ℓ)
기본 사항	열에너지 공급 기준	kW	6.5	
	연간 필요 열에너지	kWh/year	13,600	13,600
	효율성	%	95	80
	계절 운영 계수		3.5	-
	유효 에너지 사용량	kWh/year	4,900	17,000
	화석 에너지 소비량	litter/year	-	1,703
	필요 면적	㎡	2.6	23
	CO2 배출량	ton/year	-	3.8
고정비용	기계 및 설비비용	Swiss francs	12,730	16,300
	BHE 비용		11,010	-
	면적 비용		1,040	9,200
	기타 설비(굴뚝 등)		1,620	1,600
	합계		26,400	27,100
에너지 비용	전력 소비(high) 전력 소비(low) Basic payment	Swiss francs	337.4 224.95 102	49 22 8
	화석 연료 소비		-	1,158
	합계		664.35	1,237
운영비용	운영 기타 비용	Swiss francs	150	370
	배기 비용(굴뚝 등)		-	180
	합계		150	550
총비용		Swiss francs	27,214	28,887

표 3-5-2 미국의 지열방전 지원 프로그램에 의한 연간 예상되는 편익(NREL, 2004)

편익 내용	단위	2010	2020	2030	2040	2050
에너지 소비량 저감	Billion $/year*	0.6	2	4	5	9
이산화탄소 저감	Million TC/year	2.7	5	9	27	50
천연가스 저감	quadrillion Btu	0.08	-0.03	0.16	0.92	0.40
추가적 중앙 전력생산량 저감	giga watt	2	2	7	22	36

표 3-5-3 IGSHP의 가정용 지하 열자원 이용 열펌프의 경제성(한정상 등, 2004)

내 용	경제적인 이득	비 고
지하 열자원 이용 열펌프 설치 시 융자금	5,750$ - 750$ = 5,000$	지역시설회사로부터 보조금 250$/ton × 3ton = 750$
월 융자 상환금액 (연 5년, 7년 거치시)		융자금 5,000$
월간 운영비	전기난방장치 137$/월	100%
	지열펌프 57$/월	41.6%
cash flow 상의 월간절약금액	80$/월 -70$/월 =10$/월	137$(전기냉난방 장치 이용시 월간운영비)-57$(지열펌프이용시 운영비) = 80$
초기추가투자비 회수 년수	연간에너지 절약비 80$ × 12월= 960 $/월	
25년간 총 절약금액	25년 × 12월 80$ = 24,000$	
총 이익	24,000$ - 2,000$ = 22,000$	연간 880 $ 이득

(2) 지하 열 자원 활용의 경제성 분석 국내 사례 조사

(가) 지열원 열펌프 냉난방 시스템의 경제성 고찰

지열원 냉난방 시스템의 성능 및 경제성 평가에 관한 연구는 국내에서도 활발하게 이루어지고 있다. (임효재 등, 2004; 조정식과 손병후, 2009). 이들은 지열 냉난방 시스템이 적용된 건물에 1년 동안의 소비전력량을 측정하고, 측정된 자료를 바탕으로 일반적인 냉난방 시스템과의 경제성을 평가하였다. 일반적인 냉난방 시스템은 경유용 증기보일러와 개별 에어콘으로 설정하였다. 특히 조정식과 손병후(2009)는 초기투자비와 운영비 외에 잔존비용까지 고려하여 총 비용을 계산하였으며 계산된 결과로 NPV, IRR, B/C Ratio와 투자 회수기간도 도출하여 지열원 시스템의 우수성을 입증하였다. 하지만 이들은 정부의 신재생 에너지 사업에 관한 지원 금액과 조세 감면 혜택 등의 요소를 고려하지 않았다.

(나) 사적, 공공적 측면 비용 편익 분석 사례

안은영 등(2005)은 사적, 공공적 측면에서 지열자원의 활용 측면 중 지열 열펌프 시스템의 이용에 대해 비용편익분석을 실시하였다. 지열 열펌프 시스템을 사용할 경우 기존의 냉난방 시스템에 비해 가구 당 기존의 냉난방시설에 비해 연간 106 만원의 에너지 비용을 절약할 수 있으며, 할인율 7%를 적용하여 설비비용을 포함한 25년 분석기간의 경제적 효과는 순현재가치 727.19만원, 비용편익비 2.43, 내부수익률 27.72%에 달하는 것으로 나타났다. 또한 가구 당 경제성 분석 기간 동안 111.04만원의 이산화탄소 및 대기오염물질 배출로 인한 사회적 비용을 저감시키는 환경적 효과를 가지며, 화석 에너지소비량 절감으

로 인해 34.37 toe의 에너지소비량 절감으로 349.61 만원의 에너지수입비용의 대체로 인한 에너지안보 효과를 가져올 것으로 나타났다. 지열 열펌프 시스템의 사용으로 인한 사적 경제적 효과뿐만 아니라 환경적 효과와 에너지안보 효과의 사회적 효과를 고려한 순편익의 현재가치는 1,187.84 만원이며, 비용편익비 3.33, 내부수익율 43.14%로 나타났다. 이는 에너지절약 외의 1, 2차적인 기술적, 사회적 파급효과 등을 포함하지 않은 최소한의 에너지소비량 절감으로 인해 나타나는 경제적 효과, 환경적 효과, 에너지안보 효과를 산정한 결과이다. 본 연구는 기존의 연구와는 달리 기술적 사회적 파급효과를 다양화하여 구체적으로 경제적 이론을 통한 화폐화된 가치로 제시하였다는데 의의가 있다. 또한 타 연구에서는 고려되지 않았던 정부의 신재생에너지 지원 촉진을 위한 에너지합리화 융자지원금액도 비용산정에 추가되었다. 하지만 본 연구 역시 정부의 신재생 에너지 도입으로 인한 조세감면혜택이 비용에 추가되지는 않았다.

라. 국내외 경제성 프로그램

국외의 경제성분석 프로그램과 같은 경우는 송배전부터 발전설비까지의 다양한 모듈들과 연동이 가능하도록 설계하고, 한 종류의 설비대상뿐 아니라 대체에너지 발전설비 외에 기존 발전설비와의 하이브리드연동까지 포함한 종합적인 경제성분야의 연구가 이루어지고 있다.

(1) 국외 주요 경제성 프로그램

(가) BLCC(Building Life-Cycle Cost) Program

그림 3-5-1의 BLCC Program은 KML 파일 형식으로 JABA로 프로그래밍 되어 건물의 투자자본 해석을 위한 전산 지원을 제공한다.

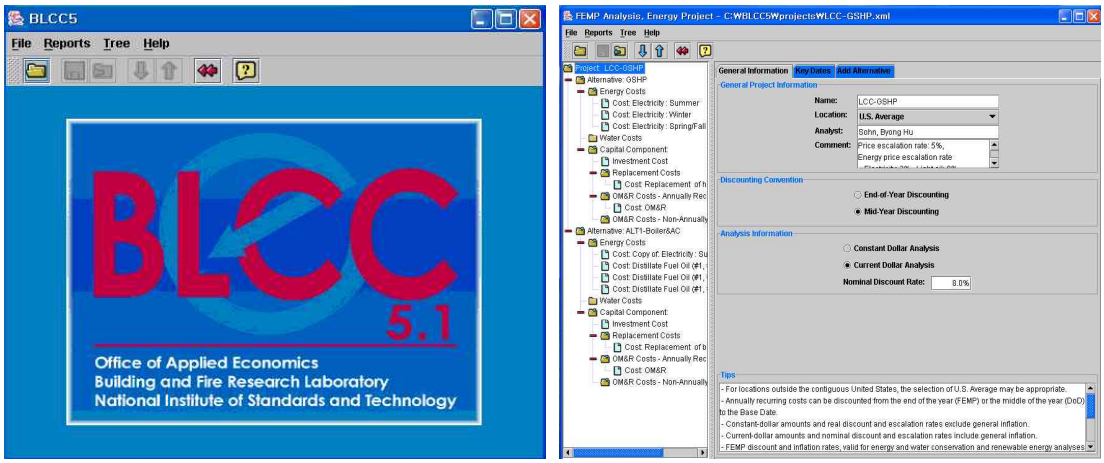


그림 3-5-1 BLCC Interface

대안이 적용되는 건물과 건물 관련 시스템이나 구성 요소의 상대적 비용 효율성을 평가하여 경제성 분석을 실시한다. 대안의 기본적인 자료 입력(Project Name, Location, Discount Rate), Investment Cost, Energy Cost, OM&R Cost 등을 입력하여 대안의 비교를 통해 년도별 절약 비용을 산정한다. 이 프로그램은 에너지, 수자원 절약 및 신재생에너지 사업의 비용과 성능 효과를 평가하는 데 특히 유용하며, 두 개 이상의 대안 설계의 생명주기 비용을 계산하고, 가장 낮은 생애주기비용을 산정 및 비교하여 장기적으로는 더 경제적인 대안을 제시한다.

(나) RETScreen

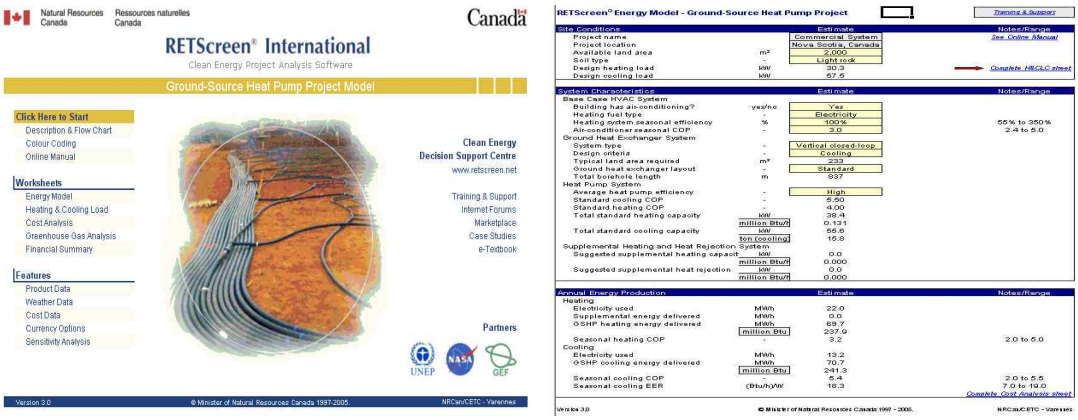


그림 3-5-2 RETScreen Interface

그림 3-5-2의 RETScreen은 캐나다 Renewable Energy Decision Support Center에서 개발하였다. 이는 엑셀 워크시트에 Visual Basic Macro를 이용하여 구성된 프로그램으로 특정 신재생에너지 생산과 관련된 기상자료, 설비특성, 투자비용, 기준가격 등의 입력변수들을 주면 관련 에너지의 생산량과 이에 따른 수입과 비용의 흐름이 계산되고, 여기에 CO_2 저감에 따른 크레디트가 인정되는가의 여부에 따른 추가 수입을 고려하여 경제성 평가를 수행할 수 있다.

(다) NREL 모델들

미국의 NREL에서는 Homer, Vipor, Hybrid2 등을 개발하였다. Homer는 일반 송배전계통과 원거리에 존재하는 도서지역의 송전선로의 손실의 배제하기 위해 풍력, 태양광 등을 채택하여 도서지역에서 단독으로 운영되는 복합 발전 시스템의 최적설계와 운영을 위한 시뮬레이션 프로그램으로서 여러 신 재생에너지원과 화석연료, 기타 관련설비들을 함께 이용하는 시스템을 평가하고 그 중 가장 비용이 최소화되는 시스템을 골라내어 준다. 또한, Vipor는 지역 전력공급시스템 설계를 위한 모델로서 발전원의 형태(독립형(isolated) 또는 중앙집중형(central)) 여부를 결정하고 지리적 조건, 경제성을 고려한 최적의 배전망

설계를 위한 시뮬레이션 프로그램으로서 주어진 지형에서 Power Source와 그 특성을 입력하고, 또 관련 수요지점과 그 특성을 입력하여 앞서 Homer에서 비용최소화로 최적화된 시스템의 자료를 이용하면 어떤 망의 연계가 가장 수익을 극대화하는지를 반복적 계산(iteration)을 통해 찾아낸다.

(2) 국내 주요 경제성 분석 프로그램

국내의 경제성 분석 프로그램은 한 종류의 발전설비에 제한하여 기초 자료를 입력하고, 이를 계산을 통해 발전량을 추정하여 경제성 분석이 이루어지고 있다.

(가) 신·재생에너지 경제성 분석 프로그램

아주대학교 에너지학과에서 수행한 '신·재생 에너지 시스템 경제성분석 프로그램개발 및 적용방안 연구'의 결과로 개발한 프로그램으로 그림 3-5-3과 같다. 이는 풍력, 태양광, 태양열, 소수력 등 4개의 분야에서 현재가치를 계산하는데 필요한 발전단위당 가격이 얼마가 되어야 주어진 이자율 하에서 NPV가 최소한 양의 값을 가질 수 있는가를 역산하는 방식으로 합당한 기준가격을 산정해 낼 수 있는 기능이 구현되어 있다.

(나) 에너지관리공단 CDM 경제성 분석 프로그램

그림 3-5-4의 프로그램은 전력분야, 열병합분야, 열공급분야, 기타의 4개의 항목으로 구성되며 내부수익률, 순현재가치, 투자회수 기간 등의 투자분석을 실행할 수 있다.



그림 3-5-3 Energy economic analysis screen

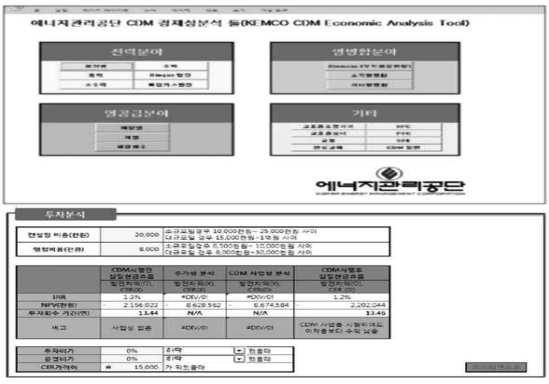


그림 3-5-4 The CDM economic analysis tool screen

마. 경제성 분석 방안 제시

앞에서 소개한 경제성 분석은 그 나름대로의 장단점이 있지만 보다 논리적이고 학계나

실물에서 가장 많이 사용하는 방법은 순현재가치, 내부수익률, 비용편익비율 등이 있다. 이러한 방법은 경제적 편익과 비용의 연간 흐름을 적정한 할인율을 적용하여 현재가치로 환산하는 단계까지는 동일하지만, 산출된 편익의 현재가치와 비용의 현재가치를 어떠한 형태로 비교하는가에 차이를 두고 있다.

생애주기비용 분석 방법은 건축설비 시스템과 같이 시스템이나 기기의 제작을 위한 초기 투자비를 거쳐 장기간 사용에 따른 운영 및 유지관리비를 포함하여 최후에 폐기되기까지의 필요한 모든 경비를 포함하는 방법이기에 가장 합리적이고 실질적인 방법이라 할 수 있다. 또한 생애주기비용분석을 통해 생애주기 비용이 계산되면 순현재가치, 내부수익률, 비용편익비 및 투자회수기간 등의 방법도 같이 사용하여 보다 다양한 지표를 가지고 경제성을 분석할 수 있다. 지열 에너지와 같은 에너지 절약사업은 건축물을 설계하는 과정에서 에너지 절약과 초기 투자규모의 결정에 있어 생애주기비용 분석을 통한 대안의 모색이 매우 유용한 것으로 알려져 있다(최현근 등, 2004). 따라서 본 연구에서는 지열에너지 시스템 도입에 따라 기존 에너지 시스템 대비 에너지 및 비용 절감 정도를 파악하기 위해 수명주기를 고려한 생애주기비용 기법을 이용한 경제성 평가가 이루어지는 게 합당하리라 판단된다.

본 연구에 공동연구기관인 인천국제공항은 현재 3단계 사업을 진행함에 따라 친환경 공항 구축, 녹색성장 전략 등의 계획에 따라 친환경 신재생 에너지의 도입 확대가 필요할 것으로 판단된다. 이에 인천국제공항공사는 시설물에 지중열 에너지 시스템을 도입을 진행하고 있으며 그에 따라 본 연구에서는 인천국제공항공사 제 2 여객터미널에 생애주기비용 분석을 실시하였다. 그에 대한 상세 내용은 5절 2에서 다루고 있다.

2. 인천국제공항 제 2여객터미널 경제성 분석

본 연구에서는 앞에서 서술된 경제성 분석 모듈을 이용하여 실질적인 영향인자들인 잔존가치 및 정부지원금을 반영하여 인천국제공항 제 2여객터미널부지에 설치 예정인 지중열교환기 시스템에 대한 LCC 분석을 실시하여 보다 실질적이고 개선된 경제성 분석방안에 대해 논의해 보고자 한다.

가. LCC 분석 수행 조건

인천국제공항 신·재생에너지 도입 타당성 분석 용역에서는 독립된 여러 대안들에 대하여 GSHP 시스템 사용시에 대한 경제성을 분석하였다. 본 연구에서는 이와 별도로 조세감면과 같은 정부지원금을 반영하고 설비의 잔존가치 등을 반영하여 경제성 분석을 실시하였다. 표 3-5-4는 대상 건물의 개요를 나타내고 있다. 대상건물에 설치될 지열원 열펌프는 물 대 물 방식의 히트펌프로써 50 RT 급 5대를 설치하는 것으로 가정하였다. 또한 심야전기 활용을 통한 운전비 절감을 위하여 1,194 m^3 용량의 축열조를 설치하는 것을 고려하였다. 본 건물의 냉난방 부하를 감당하기 위한 지중 열교환기 설계는 상용 소프트

웨어인 GLD(ground loop design)2012를 사용하였으며 150 m까지 천공한 100개의 보어홀이 요구되었다.

표 3-5-4 대상건물의 개요

구분		내용 (2017년 완공기준)
건물개요	연면적	약 35만 m²
	냉난방면적	9,822 m²
	건물규모	지하 2층, 지상 4층 가로 800m, 세로 1.2km 높이 42.3m
냉방부하		1,512,000 kcal/hr
난방부하		1,814,400 kcal/hr



표 3-5-5 경제성 분석을 위한 재무 지표

구 분	재무지표	비고
할인율	7.0%	투자비 현재가치 산정
조세감면	20%	신·재생에너지 시설 투자 시 법인세 공제
물가 상승율	3.14%	소비자 물가 상승율
내용연수	25년	경제성분석 적용
설비 교체주기	15년	냉난방설비 적용
잔존가치	정률법	법인세법에 근거한 기계설비 적용

GSHP 시스템과 경제성 검토 대상인 냉난방 설비는 경유용 보일러와 에어컨으로 설정하였다. 도시가스 요금은 한국가스공사 요금표 중 인천광역시지역 일반-영업1용으로 적용하였다. 경유 단가는 한국석유공사에 제시된 SK정유사의 판매가를 적용하였다. 지열에너지 및 전기를 사용하는 장비의 운전비 산출에 한국전력공사의 전기요금표 중 일반용전력(을) 기준과 고압B선택(Ⅱ)요금을 적용하였다. 또한 인천국제공항의 신·재생에너지별 조성원가를 산정하기 위해 기준년도에서의 시스템 투자비 및 운전유지, 이자율 기타 경제성 입력지표를 결정해야 한다. 일반적인 경제지표는 모든 대상 전원의 비용평가에 적용되는 할인율, 이자율, 물가상승률 등이 있다. 경제성을 평가분석 하기 위해 일반적으로 적용되는 재무지표는 표 5.2.2와 같이 산정하였다. 재무적 할인율은 일반적인 전력설비에 대한 경제성평가에 적용되는 사회적 할인율인 7%를 적용하였다. 조세 공제는 신·재생에너지 시설 투자 시 총 투자비의 10%(2013년 12월말까지)한도 내에서 법인세(소득세)공제를 받을 수 있다. 이는 조세특례제한법 시행규칙 제 13조의2, 별표8의 3항에 근거하여 적용하였다. 또한 물가 상승률은 한국은행 통계자료를 참조하였으며, 최근 5개년 평균 소비자 물가 상승률을 기준으로 산정하여 경제성분석에 적용하였다. 지중 열교환기 부분을 제외한 GSHP 시스템 설비의 내용년수는 25년으로 산정하였으며 교체주기는 15년으로 가정하였다(안은영 등, 2005). 잔존가치는 법인세법에 근거한 정률법으로 설비의 잔존가치를

산정하였다. 하지만 본 연구에서는 일반적으로 일률적인 비율로 매년 적용하는 유지관리비는 실질적으로 발생되는 비용과도 상이한 부분이 많기에 LCC 분석에서 제외하였다.

나. LCC 분석 수행 결과

위와 같은 조건을 바탕으로 GSHP 시스템에 대한 LCC 분석을 수행하였다. 표 3-5-6은 25년을 기준으로 LCC 분석을 수행한 총 현가를 나타내고 있다. 표 3-5-6에서 보는 바와 같이 초기 투자비면에서는 GSHP 시스템이 불리하나 에너지 소비량, 교체 주기, 제세 공제 등에서 GSHP가 보다 경제적인 시스템인 것을 알 수 있다. LCC 분석을 통해 GSHP 시스템을 설치하여 수명주기 동안 발생하는 순현재가치(NPV)는 1,280,280,606원으로 나타났으며 내부수익율(IRR)은 33%, 투자 대 이익의 비율은 4.78로 비교적 높게 나타났다. 정부지원금 및 잔존가치를 반영하지 않을 경우 IRR은 22%, 투자 대 이익의 비율은 3.27로 경제적 지표는 40~50% 이상 향상되었음을 알 수 있다.

표 3-5-6 LCC 분석 총 현가

구 분	GSHP	EHp
초기 설치비	1,359,492,000	719,000,000
운영비	1,350,915,452	2,970,302,603
잔존가치	-8,388,294	-17,745,404
교체 비용	156,695,633	331,488,997
제세 감면	-135,949,200	

다. 결론

본 연구에서는 지열원 열펌프 시스템의 적용성을 평가하기 위해서 기존 에너지 자원과의 경제성 분석을 수행하였다. 이를 위해 기존 에너지 자원과 지열 에너지를 활용한 지중열교환기 시스템에 대한 경제성 분석방법이 선정되어야 하며 지열 에너지와 같은 대체에너지 절약사업의 경우 건축물을 설계하는 과정에서 에너지 절약과 투자규모 결정시 LCC(Life cycle cost)분석을 통한 대안 모색이 유용하기에 GSHP 시스템과 기존 전기 및 난방 시스템을 대상으로 LCC 분석을 수행하였다. 기존 연구에서 간과되기 쉬웠던 실질적인 영향인자들인 잔존가치 및 정부지원금을 반영하여 인천국제공항 제 2여객터미널부지에 설치 예정인 지중열교환기 시스템에 대한 LCC 분석을 실시하여 보다 실질적이고 개선된 경제성 분석방안에 대해 논의하였다.

3. 인천공항 3단계 건설 부지 열교환기 유형별 시험시공 및 경제성 평가

신재생에너지 개발 및 기존 에너지원을 대체하기 위한 국가적 노력과 적용 추세에 발맞추어 인천국제공항 역시 현재 진행 중인 3단계 건설에 친환경 에너지(태양광, 지열) 시스템 적용을 진행하고 있다. 3단계 건설 중 제 2여객터미널 냉난방 부하의 7.5%, 급탕 부하의 20%를 지열시스템으로 수용할 수 있도록 계획 중이며, 그 외 공항 부대건물(인천공항공사 청사 등)의 냉난방의 일부를 지열시스템으로 운영될 수 있도록 계획하였다.

인천국제공항 건설 부지는 해양매립지로 일반적으로 지열이 적용되는 지반과는 상당한 특성차이를 보일 수 있기 때문에, 2차년도 연구로 인천공항 제 2여객터미널 건설부지의 지반 염분 함유량 시험, grouting 재료(이하 채움재)로서 bentonite의 현장 적용성, bentonite의 최적 배합 및 첨가제 함유량에 따른 열전도도 평가, 수직밀폐형 Single U-Type 열교환기(full-scale)의 열전도도 test, 수직밀폐형 열교환기별(Single-U, Double-U, Coil) Mock-Up 실험을 진행하였다. 하지만 2차년도 연구 Mock-Up 실험의 경우 50 m 깊이에 대한 실험으로 실제 시공되는 열교환기를 full-scale로 모사한 것이 아니기 때문에 실제 운영되는 열교환기와 동일한 scale의 실질적인 현장 검증 실험이 추가적으로 필요하다. 또한 해양 매립지에 적합한 열교환기 시스템 선정을 위한 수직밀폐형 교환기형태(Single U, Double U-Type) 및 채움재 종류(bentonite, 콩자갈), 지중열교환 형식별(밀폐형, 개방형)에 대한 검증을 통한 경제적 평가가 필요한 실정이다.

따라서 본 장에서는 지열시스템의 열교환기별(수직밀폐형, 개방형), 수직밀폐형의 채움재(bentonite, 콩자갈) 및 열교환기 형태별(Single U, Double U Type) 열성능, 시공성, 경제성을 평가하여 인천공항 제 2여객터미널 건설부지 특성(해양매립지)에 적합한 지열 시스템을 제시하는 것이다. 이를 위해 2차년도 연구 시험성과(지열시스템 열교환기 Type 열성능 평가, 경제성분석을 이용한 최적 시공조건 제시)에 기초하여, 해양 매립지 특성을 고려한 수직밀폐형 및 함몰 방지 개방형(Geohil) 지중열교환의 열전도도 평가를 실시하였다. 이를 통해 지중열 시공시 예상 문제점 검증하고, 해안매립지역에 적합한 열교환기 유형 선정 시 기초자료를 수집하고자 하였다. 또한, 측정된 열전도도와 채움재의 열 물성(heat properties)을 입력변수로 지열시스템 설계 해석을 실시하여 열성능 평가와 공법별 설치 수량을 산정하였다. 또한 해석결과 산정된 설치 수량과 실제 시공에 따른 비용을 산정하여 각 공법별 경제성을 비교하였다.

가. 시험시공 및 경제성 평가 방안

(1) 시험 시공 및 열전도도 Test

실시된 시험 시공은 표 3-5-7과 같으며 2차년도 연구결과를 포함하여 4가지로 분류되며 비교 검토 항목은 다음과 같이 3가지로 분류할 수 있다.

표 3-5-7 시험시공 공법별 비교

Type		Grouting Material	Boring Depth(m)	Boring Diameter(mm)	Contents	Remark
일반 수직 밀폐형	Single U-Type	bentonite(일반)	200	150	- 열전도도 Test - 소요 수량 - 경제성(시공비, 시공일정비교)	2차년도 시험 시공
	Double U-Type	bentonite(일반)	200	150		
개량 수직 밀폐형	Single U-Type	콩자갈 + 무수축 mortar*	200	150		
함몰 방지 개방형	Concentric Tube**	콩자갈	500	250		

* 수직밀폐형의 상부에서 암반층까지 무수축 Mortar 시공을 통한 지하수 오염 방지
** Concentric Tube : 이중관형

- 수직밀폐형(Single U-Type) 채움재 비교 및 열전도도 test
: 일반수직밀폐형(채움재 : bentonite)과 개량수직밀폐형(채움재 : 쇄석+무수축 mortar)의 경제성, 시공성 및 열성능 비교 평가를 위한 시험시공

- 수직밀폐형(Double U-Type) 시공성 확인 및 열전도도 test
: 일반수직밀폐형(Single U-Type, bentonite)과 동일조건에서 Double U-Type(열교환 pipe 직경 25 mm)을 시공함으로써, 시공성 확인 및 열성능 비교 평가(이하 D-U 수직밀폐형)

- 함몰 방지 개방형(Geohil) 시공성 확인 및 열전도도 test
: 수직밀폐형과의 시공성, 열전도도 비교 평가 및 매립지에서의 개방형에 대한 기초 자료 수집(함몰 방지 효과, 열성능 향상 등)

(2) 설계프로그램을 이용한 설치수량 산정

인천공항 제 2여객터미널의 지열시스템 담당부하, 현장조건, 열전도도 Test, 채움재 특성 등을 입력변수로 하여 국내에서 주로 사용되는 지열시스템 설계프로그램 해석을 통해 설치 수량을 산정하였다. 각각 사용된 해석프로그램은 표 3-5-8과 같다.

표 3-5-8 열교환기 공법별 적용 설계 프로그램

Heat Exchanger (Grouting Material)	Design Program	Remark
일반수직밀폐형 (채움재 : 일반 bentonite)	GLD (Ground Loop Design)	- 시추공 깊이 : 200 m - 시추공 직경 : 150 mm - 파이프 직경 : 48.31 mm(외경) 39.40 mm(내경)
개량수직밀폐형 (채움재 : 콩자갈 + 무수축 mortar)	GLD (Ground Loop Design)	- 시추공 깊이 : 200 m - 시추공 직경 : 150 mm - 파이프 직경 : 48.31 mm(외경) 39.40 mm(내경)
D-U 수직밀폐형 (채움재 : 일반 bentonite)	GLD (Ground Loop Design)	- 채움재 : Bentonite - 시추공 깊이 : 200 m - 시추공 직경 : 150 mm - 파이프 직경 : 33.40 mm(외경) 27.30 mm(내경)
함몰 방지 개방형 (채움재 : 콩자갈)	GLHEpro V4.0	- 시추공 깊이 : 500 m - 시추공 직경 : 250 mm - Inner Tube : 86.0 mm(외경) 75.0 mm(내경) - Outer Tube : 200.1 mm(외경) 200.0 mm(내경)

(3) 경제성 분석 방안

일반적인 경제성분석은 크게 타당성분석비용(현장조사, 지반 및 수질조사), 설계비용, 초기비용(장비 및 시공비), 년간비용(운영비용) 등을 고려하게 된다. 하지만 본 시험시공 결과를 이용한 경제성 분석에서는 타당성조사 및 설계비용, 운영비용(유지관리 비용)을 제외한 실제 시험시공을 기초로 한 초기비용만의 분석을 통해 경제성 비교를 실시하였다. 초기비용의 비교는 열전도도 test 및 주어진 건물 냉난방 부하(제 2 여객터미널 지열 냉난방 부하 기준 열교환기 종류별 설치 단가 비교)에 따라 설계프로그램을 통해 산정된 공법별 소요 수량을 토대로 실제 시험시공 설치비용 기준(1개공 기준) 전체 비용을 산정하여 그에 따른 소요 비용 비교를 실시하였다.

나. 기존 연구 요약

인천공항 3단계(제 2여객터미널) 부지내 지열 시스템 적용을 위한 해양매립지역에 적절한 채움재 선정 및 재료별 열전도도 평가와 수직밀폐형 적용시 열성능이 우수한 열교환기 형태 선정을 위한 연구를 진행하였다. 연구내용은 다음의 5가지로 정리할 수 있다. 시행된 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 제 2 터미널 부지 지반 염분 Test

인천국제공항 제 2여객터미널 부지 지반 염분 시험 결과 지표면에서 10~20 m에서 8,500~13,000 ppm의 염분 함유량을 보였고, 50 m 구간에서 약 4,500 ppm의 수치가 나왔지만 그 외 구간에서는 250 ppm이하의 염분 함유량을 보였다. 결과에 따라 약 50 m까지 염분 영향성을 고려한 적절한 채움재의 이용이 필요할 것이라 판단된다.

(2) 일반 및 해수용 Bentonite 팽윤성 실험

일반 Bentonite의 염수(NaCl)에 대한 영향성 검토 실험 결과 해수와 닿는 부분의 1 cm 정도가 점착력이 상실하였지만 전체적으로 양호한 상태를 유지하며, 접촉면과의 점착력 유지한다는 것을 확인하였다. 해수용 bentonite를 사용할 경우 해수와 혼합하여야 하며, 혼합 후 천공지점에서 담수와 접촉시 점착력을 손실할 가능성이 클 것으로 판단된다. 따라서 인천국제공항 제 2여객터미널 부지의 경우 재료들의 충분한 혼합 후(팽윤된 상태)에서 천공 부분에 주입하면 염분에 대한 영향은 적을 것으로 판단된다. 일반 Bentonite의 팽윤성 확인 결과 다음과 같이 최적 혼합비율임을 확인하였다.

Water : Bentonite : Sand : 유동화제 = 0.7960 : 0.1393 : 0.0597 : 0.0050
79. 5% : 14 % : 6 % : 0.5 %

(3) 첨가제에 따른 Bentonite 열전도도 Test

첨가제 함유량에 따른 열전도도 test 결과 순수 bentonite에 silica sand를 30% 첨가할 경우 열전도도가 약 1.5 배 향상되었다. 채움재 시공 계획(silica sand 20% 첨가) 대비 30% 적용시 공사비가 46,648 천원 (채움 공사비의 29.6% 증가) 정도 증가하나 지중열교환기의 성능에 중요한 요소인 열전도도가 14% 정도 개선되며, 외부 시공사례 조사 결과 20~50%까지 사용하므로 30%로 변경하는 것을 고려하였다.

(4) 수직밀폐형 지중열교환기 Pipe-Type 검토

수직밀폐형 Double U-Type과 Single U-Type의 연속가동을 비교하였을 때 Double U-Type이 약 12~14% 정도 열성능이 높은 것으로 나왔으며, 천공 깊이를 약 100 m 당 15 m가량 줄이 수 있는 것으로 분석되었다(Single U-Type 대비 약 10%(250,000원) 정도 절감).

(5) 수직밀폐형(U-Type, Bentonite 채움재)의 열전도도 Test

현장에 적용한 pipe와 관경이 동일한 조건에서(Single U-Type 관경 20 mm, Double

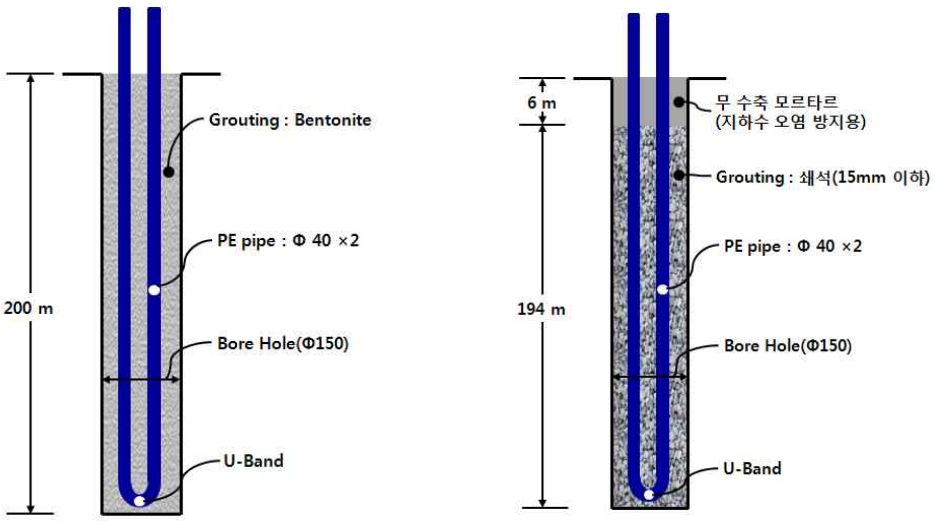
U-Type 관경 20 mm) GLD program을 이용한 보어홀 깊이를 계산하였을 때 Single U-Type 경우 104,688 m, Double U-Type은 89,569 m로 현장검증 시험과 유사 하게 약 14% 정도의 열효율 차이가 발생하였다. 하지만 수직밀폐형 Double U-Type의 국내 시공사례가 없으며, 시공시 보어홀 직경을 200 mm로 적용시 공사비가 3,460백만원 (당초 대비 69% 증가)이 증가됨에 따라 이에 따른 적절한 검토가 필요하다.

다. 시험 시공의 개요

수직밀폐형의 채움재(bentonite, 콩자갈) 및 열교환기 유형별(Single U, Double U-Type) 열전도도 평가와 지열시스템의 공법별(수직 밀폐형, 개방형) 시공성 및 열성능 비교평가를 위해 다음과 같은 시험시공을 시행하였다.

(1) 수직밀폐형(Single U-Type) 채움재 비교 및 열전도도 test

수직밀폐형의 채움재를 bentonite에서 콩자갈로 변경함에 따라 열전달 성능이 우수하다는 사례조사 결과를 토대로 본 연구에서는 일반수직밀폐형(채움재 :bentonite, 2차년도 연구결과 활용)과 개량수직밀폐형(채움재: 쇄석+무수축 mortar) 경제성, 시공성 및 열성능 비교 평가를 위해 그림 3-5-5와 같이 시험시공을 실시하였다. 이는 매립지나 해안가 등 해수 영향지역에서 bentonite를 채움재로 사용시 부착 및 결합이 잘 이루어지지 않는 일반 수직형 공법의 대신 콩자갈을 이용함으로써 향상된 성능이 예상되었다.

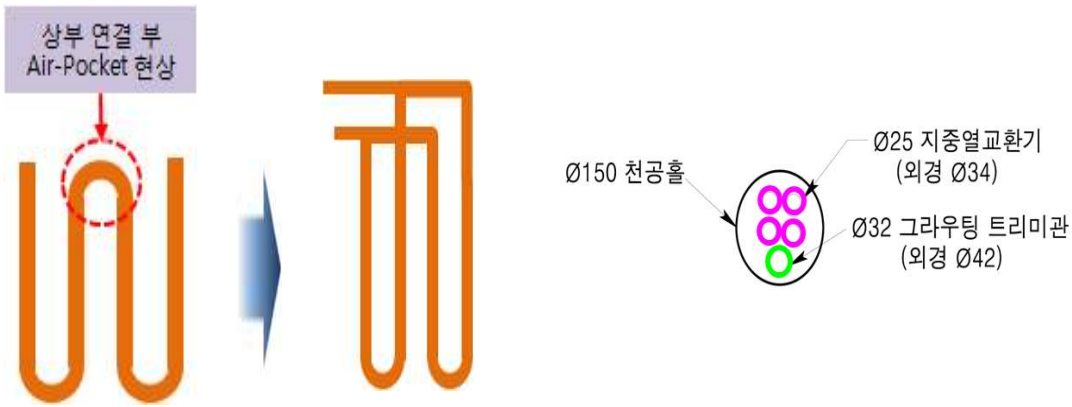


(a) Bentonite 채움재 (b) 쇄석+ 무수축 mortar 채움재

그림 3-5-5 수직밀폐형(Single U-Type) 채움재별 시공 단면

(2) 수직밀폐형(Double U-Type) 시공성 확인 및 열전도도 TEST

2차년도 Mock-Up Test 결과 W-Type의 열교환기가 Single U-Type대비 13~14% 정도 열성능이 우수하였다. 하지만 이는 50 m 천공과 PB 파이트(20 mm 직경)를 이용하여 열교환 pipe 유형별 성능 비교를 검토하였기 때문에 실제 운영되는 열교환기 형태(깊이 200 m, 직경 150 mm)의 비교검토가 필요하다. 따라서 실제 운영되는 Single U-Type과 동일조건에서 Double U-Type(열교환기 Pipe 직경 25 mm)의 시공성 확인 및 열성능 비교 평가하고자 하였다. 이 때 W-Type의 경우 에어포켓에 대한 문제를 고려하여 그림 3-5-6의 (a)와 같이 Double U-Type으로 변경하였고, 그림 3-5-6 (b)와 천공 직경 150 mm를 고려하여 지중열교환기 직경을 25 mm줄여 시공하였다.

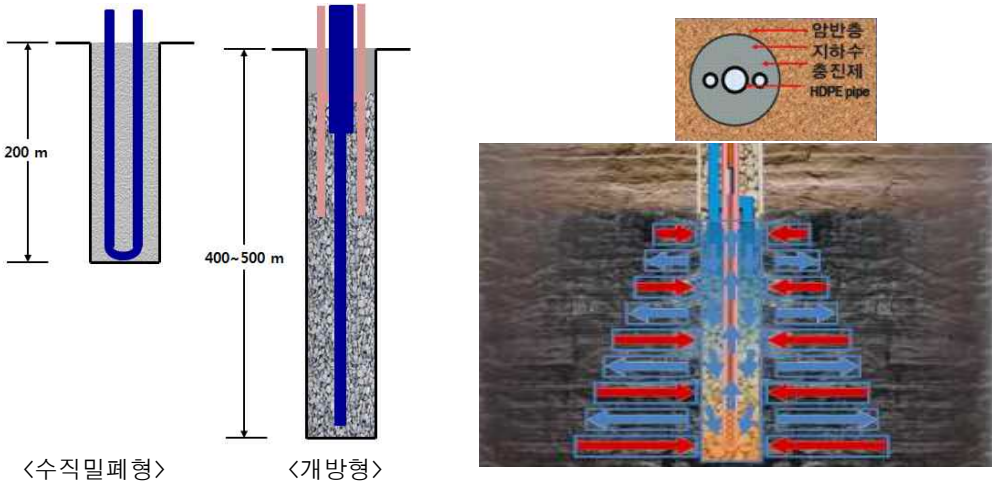


(a) W-Type과 D-U Type 비교 (b) D-U Type 설치 평면

그림 3-5-6 수직밀폐형(D-U Type) 시공시 고려 사항

(3) 개방형(함몰방지형) 시공성 확인 및 열전도도 TEST

함몰 방지 개방형(Geohil)은 일반 SCW의 공의 붕괴 및 지하수 오염문제에 대한 우려부분을 개선하고 열교환 효율을 높이기 위해 개량된 공법이다. 또한 수직밀폐형 대비 설치 소요 면적이 적으며 상대적으로 열성능이 우수한 공법으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 해양매립지의 지반 특성 및 수직밀폐형 대비 2배 이상의 천공 깊이로 인한 함몰 잠재성을 고려하여 일반 개방형 열교환기 시스템을 보완한 함몰 방지 개방형공법의 적용성을 검토하고자 하였다.



(a) 밀폐형과 개방형 비교　　(b) 함몰 방지형의 열교환 개념

그림 3-5-7 함몰 방지 개방형 시공 단면

또한 함몰 방지 채움재(콩자갈)에 의한 열전도도 향상 정도를 평가하고자 하였다. 이를 위해 그림 3-5-7과 같이 수직밀폐형과의 시공성, 열전도도 비교 평가 및 매립지에서의 개방형에 대한 기초 자료 수집(함몰 방지 효과, 열성능 향상 등)하고자 개방형(함몰 방지형)에 대한 시험시공을 실시하였다.

(4) 시험 시공 위치 선정 및 시공 진행

실제 해양매립지역의 고려하고 공항 시설물이 건설된 지반에의 열교환기와 채움재에 따른 지열시스템의 열전도도 및 열성능을 평가하기 위해 현재 인천국제공항 3단계 건설 중제 2여객터미널이 건설될 부지에 그림 3-5-8과 같이 시험시공 위치를 선정하였다.



그림 3-5-8 시험시공 위치

시험시공은 함몰 방지 개방형과 수직밀폐형을 별도로 진행되었으며, 여기서는 각 시공작업에 대해 장비 안착 이후 천공에서 열교환기 설치, 채움재, casing 인발, 마무리까지 전

체적인 진행일정에 대해 다루었다. 시험시공은 2013년 9월 9일(장비 반입 및 장비안착)에 시작하여 2013년 10월 일 개방형 열전도도 test 진행함으로써 마무리 되었다. 시공은 수직밀폐형 2개(Single U-Type 수직밀폐형(콩자갈 채움), Double U-Type(bentonite)에 대해 1개 장비를 이용해 Single U-Type 천공작업 완료 후, Double U-Type 천공을 진행하였다. 함몰 방지 개방형 역시 별도의 천공장비를 이용하여 수직밀폐형 Single U-Type 천공과 동시에 개방형 천공을 진행하였다. 각각의 시험시공 과정은 그림 3-5-9~그림 3-5-11과 같다.

수직밀폐형(Single U-Type) 중 bentonite 채움재의 경우 2차년도 연구 결과를 활용하였다. 수직밀폐형(Single U-Type) 작업은 약 1.5일 정도가 소요되었고, 약 15일 정도의 안정 기간 가진 후 열전도도 test 진행하였다. 수직밀폐형(Double U-Type)은 수직밀폐형(Single U-Type)과 동일하게 약 1.5일 정도가 소요되었고, 약 25일 정도의 안정 기간 가진 후 열전도도 test 진행하였다. 함몰 방지 개방형 시험시공의 경우 천공 깊이가 500 m이며, 천공 직경이 250 mm이기 때문에 수직밀폐형 천공 장비보다 대형 천공장비를 별도로 사용하여 천공을 진행하였다. 7일 소요에 모든 작업이 마무리되었고, 약 25일 정도의 안정 기간을 가진 후 인증기관 열전도도 test를 진행하였다.



(a) 굴착작업 진행



(b) 열교환pipe 반입 및 설치



(c) Casing 인발 작업 마무리



(d) 열전도도 test

그림 3-5-9 수직밀폐형(Single U-Type) 시험시공



(a) 천공작업 진행



(b) 열교환 pipe 설치, 그라우팅



(c) Casing 인발 작업 마무리

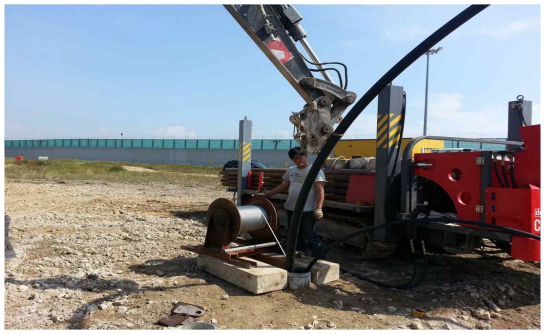


(d) 열전도도 test

그림 3-5-10 수직밀폐형(Double U-Type) 시험시공



(a) 굴착 진행



(b) 열교환 pipe 설치 및 수중펌프 설치



(c) 채움재 삽입 작업 마무리



(d) 열전도도 test

그림 3-5-11 함몰 방지 개방형 시험시공

(5) 열전도도 test 결과

유형별 시험 시공이 완료된 후 일정기간의 안전기를 걸쳐 열전도도 Test를 진행하였다. 수직밀폐형 방식의 경우 채움재(bentonite, 쇄석+무수축 mortar) 및 열교환기의 유형(Single U-Type, Double U-Type)별 지중 열전도도 측정 결과 2.43~2.46 W/m.K 범위로 그 차이가 미비하게 나타났으며, 함몰방지개방형 방식의 경우 지중열전도도 값은 3.340 W/m.K 로 수직밀폐형 방식에 비하여 약 1 W/m.K 정도 높은 측정결과를 보였다. 각각 열전도도 측정결과는 “부록.A 열교환기 유형별 열전도도 Test 결과” 에 수록하였다. 또한 함몰 방지 개방형의 경우 지하수를 직접 활용하기 때문에 지하수량 및 영향성에 대한 평가가 필수적이다. 따라서 지하수 양수량 및 영향성 평가를 실시하였으며 그 결과 적정 양수량은 단계대수성시험 결과 70 ㎥/day으로 나타나 적정 취수량은 70 ㎥/day이하로 판단되며 조사공의 취수계획량이 30 ㎥/day이므로 이용하는데 문제는 없을 것으로 예상되었다. 또한 지중열을 이용한 냉・난방시설은 폐쇄시스템으로 지하수를 양수하여 지상으로 올라온 지하수를 다시 지하로 환원시켜 줌으로 이용하는데 문제는 없을 것으로 판단되었다. 지하수 영향성 평가에 대한 상세 내용은 “부록.B 개방형 적용을 위한 영향성 조사”에서 다루었다.

라. 설계프로그램을 이용한 보어홀 깊이 및 필요 수 산정

본 연구의 열전도도 test 결과를 기초하여 인천국제공항 제 2 여객터미널의 지열시스템의 담당부하에 따른 지중열시스템 유형, 채움재 유형, 열교환기 유형에 따른 열교환기 설치 수량을 산정하였고 그에 따른 경제성 분석을 실시하였다. 전체 보어홀 길이 및 보어홀 설치 수량은 국내에 설계에 주로 사용되는 GLD(수직 밀폐형), GLHE(개방형)을 이용하였으며, 실제 시험시공 비용(1개공 기준)을 기준으로 제 2터미널 지열 담당 부하에 따라 산정된 공법별 소요 보어홀 설치 수량에 대한 전체 비용의 산정 및 비교를 통해 경제성 평가를 실시하였다.

(1) 프로그램 입력변수

‘인천국제공항 제 2여객터미널 신재생에너지(지열이용검토) 검토서’의 월별 및 일별 부하량 산정표에 의해 산정된 지열시스템의 월별(냉난방+급탕) 총부하와 피크 부하는 표 3-5-9와 같다.

표 3-5-9 제2여객터미널 지열 담당 월별부하(냉난방+급탕)

Month	냉방		난방 + 급탕	
	Total(kWh)	Peak(kW)	Total(kWh)	Peak(kW)
1	0	0	1,427,281	4,406
2	0	0	877,904	2,517
3	0	0	901,666	2,212
4	0	0	12,117	135
5	346,611	1,828	12,520	135
6	551,248	2,544	7,270	101
7	769,297	3,227	4,847	67
8	909,248	4,000	5,847	67
9	619,527	3,174	12,117	17
10	340,579	1,485	25,041	135
11	0	0	33,926	202
12	0	0	1,132,411	2,994
Total	3,536,510	Peak에서의 시간 (3)	4452994	Peak에서의 시간 (3)

이를 토대로 설계해석에 적용된 시스템 설치 용량은 표 3-5-10과 같으며, 이를 이용해 열교환기별 설치수량을 산정하였다.

표 3-5-10 제2여객터미널 지열 설계 heat pump

구 분	냉방	난방
용량 (kW)	4,758.6	4,069.0
동력 (kW)	1,317.72	905.03
COP	3.6	4.5
유량(LPM)	11,827.6	12,301.6
부분 부하 계수	0.84	1.00

(2) 프로그램 해석 결과

각 유형별로 프로그램 해석을 실시하였고 결과는 표 3-5-11과 같다. 표에서 확인 할 수 있듯이 수직밀폐형의 경우 200 m 시추를 기준으로 하였을 때, Single U-Type (bentonite)의 시추공 수는 471개, Single U-Type(콩자갈+무수축 mortar)은 455개, Double U-Type(bentonite)은 444개로 각각 산정되었다.

인천공항 제 2여객터미널 지열 담당 부하 기준으로 Single U-Type의 수직밀폐형의 채움재를 bentonite에서 콩자갈+무수축 mortar로 변경하였을 경우 해석결과 약 16공이 줄

어들었고, 동일한 bentonite 채움재를 사용하고 열교환기 Pipe형태가 Single U-Type에서 Double U-Type으로 변경되었을 경우에는 해석결과 약 27공이 줄어들었음을 알 수 있었다. 해석결과 시추공 길이 대비 효율을 평가하면 Double U-Type (Bentonite) > Single U-Type(콩자갈+무수축 mortar) > Single U-Type(bentonite) 나왔지만, 이는 비용적 측면(시공비)과 시공적 측면(시공성)에 대한 평가를 고려하여 적절성을 판단할 필요하기 때문에 경제성 분석과 시공시간 등의 평가를 실시하였다. 여기서 수직밀폐형의 경우 시공후 보수불가능으로 예상설계량의 약 8~10% 가산 적용한 것이다.

함몰 방지 개방형의 해석결과 500 m 시추 깊이를 기준으로 하였을 경우 약 필요 시추공이 약 46공으로 산정되었다. 이는 수직밀폐형에 비해 적은 시추공이 필요로 하지만 천공되어야할 시추공의 깊이 및 시공비, 시공성 등을 고려하여 수직밀폐형과의 적정성 비교가 필요하다. 따라서 수직밀폐형과 함몰방지 개방형에 대한 적정성 평가 역시 경제성 비교를 통해 진행하였다.

표 3-5-11 설계프로그램 해석 결과 비교

구분			수직밀폐형						함몰방지개방형
교환기			Single U-Type		Single U-Type		Double U-Type		SCW
			냉방	난방	냉방	난방	냉방	난방	
채움재			Bentonite		콩자갈+무수축 Mortar		Bentonite		콩자갈
전체 borehole 길이(m)			94227.5	70725.5	91004.5	67989.2	88771.8	66296.9	22861.92
천공	심도(m)		200		200		200		500
	수(공)	프로그램 요구	471		455		444		46
		예상 설계량	509~518		491~501		480~488		46

마. 공법별 경제성 비교

인천국제공항 제 2여객터미널 지열담당 부하 기준으로 산정된 각 공법별 필요 설치 수량에 기초하여 공법별로 설치비용 및 시공일수를 검토하였다.

경제성 검토를 위한 비교 대상은 표 3-5-12과 같다. 표 3-5-12에서 초기 비용(Initial Cost)은 실질적인 지열시스템의 설치비용으로 지열에너지 시스템(GSHP, Ground-Soruce Heating Pump) 설비비용(Energy Equipment Cost)은 열펌프(Heat Pump), 순환 펌프(Circulating Pump), 순환액(Circulating Fluid), 천공(Drilling), 지중열 교환기 파이프(GHX pipe), Valve&Fitting 비용, 기타 시설비용 등으로 구성된다.

운영비용(Annual Cost)은 시스템의 운영에 따른 다년간 발생하는 에너지 비용, 유지관

리비(일반 관리비, 유지보수비)등이 포함된다. 여기서 에너지 비용은 Heat Pump 및 Circulating Pump 운영에 따른 전기 에너지(Electricity) 사용 비용이고, 유지보수 비용은 열에너지 자동제어 시스템의 점검, 보수 및 부품교체 주기를 초기 비용의 일정 비율(관리 인건비의 10% 정도소요)로 설정하여 산정하는 비용을 말한다. 단 본 연구에서는 운영비용은 과업범위에 포함하지는 않았다.

기타 비용은 시스템의 사용주기가 완료된 후 해제·폐기 처분비와 잔존가치인 주기 비용(Periodic Cost)과 정성적인 비교가 될 수 있는 시공일수를 포함한다. 주기비용중 해체·폐기 처분비의 경우 제작업체 전문가와의 의견 수렴을 통해 산정을 하는 방법이 적합하며, 잔존가치에 대해서는 설치된 heat pump나 Ground Heat Exchanger의 재활용 여부와 그에 따른 이익을 통해 산정(물가자료의 품목별 단가를 바탕으로 산출하는 방안)하는 적합하나 여기서는 수명주기를 20년으로 설정하여 이 부분에 대해서는 고려하지 않았다.

표 3-5-12 경제성 검토 항목

분 류			내 용	비 고
비교 기준			인천공항 제 2여객터미널 지열담당 부하 기준	인천공항 제 2여객터미널 지열검토서
초기 비용	열교환기	시공 단가 (1개 기준)	Borehole 1개당 소요 비용	시험시공 기준
		설치 수량	지열 설계해석 프로그램을 통한 산정	시험시공 열전도도 Test 및 채움재 특성
		시공 비용	설치 단가 × 설치 수량	
		기타 잡비	양정 Pump 및 지하수 영향성 평가 등	시험시공
	설비 구축	장비	H/P, C/P 장비	지열업체 단가 산정
		배관	기계실 및 트렌치 배관 비용	
		자동제어	설비제어를 위한 설비	
운영 비용	에너지 비용		Pump 사용에 따른 연간 전기 에너지 사용 비용	전기료 단가 기준
	유지관리비		자동제어설비 점검, 부품교체 등	설치비용 인건비의 10%
기타 비용	주기 비용		폐기 및 잔존가치 등	
	시공 일수		시험시공 1공당 소요 일수	정성적 비교 평가 대상

(1) 공법별 열교환기 개당 시공비용

공법별 열교환기 개당 시공비용을 비교하기 위해 2차년도 및 본 연구에서 진행한 4가지 종류의 시험시공에서 실제 소요된 비용을 분석하여 표 3-5-13과 같이 산정하였다.

표 3-5-13 열교환기 1개당 시공 단가

<단위 : 원>

형태	밀폐형(수직)			함몰 방지 개방형(수직)
열교환 Type	Single U-Type	Single U-Type	Double U-Type	Concentric Tube
천공 깊이(m)	200			500
천공 직경(mm)	150			250
채움재	Bentonite	콩자갈+무수축Mortar	Bentonite	콩자갈
장비동원 및 철수비	1,200,000	1,200,000	1,200,000	3,000,000
천공비	15,000원/m × 200 = 3,000,000	15,000원/m x 200 = 3,000,000	15,000원/m x 200 = 3,000,000	80,000원/m x 500 = 40,000,000
케이싱 설치비	20,000원/m ×40 =800,000	20,000원/m ×40 =800,000	20,000원/m ×40 =800,000	20,000원/m ×40 =800,000
열교환 Pipe	330,000	330,000	430,000	7,500,000
심정펌프				1,500,000
지하수 영향 평가 및 수질검사				3,000,000
Pipe 설치	300,000	300,000	500,000	1,200,000
그라우팅 재료	300,000	450,000	300,000	1,500,000 (콩자갈)
주입 비용	200,000	200,000	200,000	1,000,000
기타 잡비 (인력, 시공일수 고려)	70,000	70,000	70,000	500,000
시공 소요 일수(일)	1.5	1.5	1.5	7
Total	6,200,000/공	6,350,000/공	6,500,000/공	60,000,000원/공

수직밀폐형의 경우 동일 장비를 사용하여, 보어홀의 깊이 및 직경이 같게 시공되었다. 함몰 방지 개방형의 경우 수직밀폐형 대비 보어홀 깊이 및 직경이 상대적으로 크기 때문에 천공장비 비용이 상승하며, 지하수 영향성 평가, 심정 Pump 비용이 추가로 소요된다.

열교환기 개당 설치단가를 살펴보면 Single U-Type에 bentonite 채움재의 수직밀폐형은 공당 6,200,000 원, Single U-Type에 콩자갈+무수축 mortar 채움재 수직밀폐형은 공당 6,350,000 원, Double U-Type에 bentonite 채움재 수직밀폐형은 공당 6,500,000 원이 소요되며 마지막으로 함몰 방지 개방형은 공당 60,000,000 원이 소요된다.

열교환기별 시공일 수 있는 소요면적을 살펴보면, 열교환기 설치 시 장비 1 Set를 이용하여 시공할 경우 수직밀폐형(Single U-Type, bentonite)은 총 750일 소요되며 그에 대비 각각 37일, 60일, 414일 정도 시공 일수가 감소함을 알 수 있었다. 물론 시공 소요 일수는 현장의 규모 및 시공운영방안에 따라 투입되는 장비 규모가 달라질 수 있기 때문에 이는 정량적인 평가가 아닌 본 시험시공만을 기준한 정성적인 평가임을 밝힌다.

설계 해석결과를 이용한 각각에 대한 소요면적은 수직밀폐형(Single U-Type, Bentonite)은 12,500 ㎡, 수직밀폐형(Single U-Type, 콩자갈+무수축 Mortar)은 11,875 ㎡, 수직밀폐형(Double U-Type, Bentonite)은 11,500 ㎡, 함몰 방지 개방형은 10,800 ㎡로 산정되었다. 수직밀폐형(Single U-Type, Bentonite)대비 각각 약 5%, 8%, 14% 정도 감소함을 알 수 있다. 이 또한 현장 조건에 따라 일부 조정될 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 공법별 설비 비용

지중열 시스템의 전체 비용 중 지중열교환기 설치비용만을 산정하여 비교하는 것은 지중열 시스템 전체 비용을 비교하지 못하는 한계가 있다. 따라서 지중열 시스템의 설비부분에 대한 비용을 지열전문업체인 D사에 요청하여 표 3-5-14와 같이 산정하였다. 이는 향후 다양한 기관에 요청하여 견적대비 비용을 재 산정할 예정에 있다.

표 5.3.8의 장비설치는 H/P, C/P 등 Pump의 비용과 설치비용을 포함한 것으로 수직밀폐형의 경우 모두 동일한 비용이 산정됨을 알 수 있으나, 지하수를 직접 활용하는 함몰 방지 개방형의 그에 수직밀폐형에 비해 약 6억 원 정도 더 소요됨을 알 수 있다. 트렌치 배관의 경우 천공되는 공수가 많을수록 그 비용이 크게 산정되었음을 알 수 있다. 특히 수직밀폐형 대비 함몰 방지 개방형의 경우 평균적으로 7억 원 이상이 절감됨을 알 수 있다. 하지만 함몰 방지형의 경우 해양매립지의 특성을 고려하여 기계실배관인 열(판형열)교환기는 내해수성 재질인 티타늄 설계가 필요하게 되어 그 비용이 상대적으로 증가하게 된다.

표 3-5-14 지열시스템 설비(열교환기 제외)비용(제2여객터미널 지열 담당 부하 기준)

<단위 : 원>

형태	수직밀폐형 Single U-Type (200m, 150mm) Bentonite	수직밀폐형 Single U-Type (200m, 150mm) 콩자갈+무수축 Mortar	수직밀폐형 Double U-Type (200m, 150mm) Bentonite	함몰 방지 개방형 (500m) 콩자갈
장비 설치	1,400,000,000	1,400,000,000	1,400,000,000	2,000,000,000
기계실배관	800,000,000	780,000,000	750,000,000	1,013,000,000
트렌치배관	1,600,000,000	1,570,000,000	1,490,000,000	720,000,000
자동제어	100,000,000	100,000,000	100,000,000	100,000,000
Total	3,900,000,000	3,850,000,000	3,740,000,000	3,833,000,000

(3) 공법별 열교환기 총 설치비용

앞서 산정된 공법별 1개의 열교환기 시공 단가와 설계 해석을 통해 산정된 인천공항 제2여객터미널 지열 담당 부하에 따라 산정된 공법별 소요 수를 고려한 열교환기 총 비용은 표 3-5-15와 같다. 여기서 장비설치비의 경우 수직밀폐형(Single U-Type, bentonite) 대비 절감비용을 살펴보면 채움재를 바꾼 수직밀폐형(Single U-Type, 콩자갈+무수축 mortar)는 약 9~8 천만 원이 절감되며, 열교환기 Pipe 유형을 바꾼 수직밀폐형(Double U-Type, bentonite)은 약 2억 원으로 5% 정도 절감되었다. 또한 함몰 방지형 역시 약 5% 정도 절감됨을 알 수 있었다. 시공비 부분에서는 함몰방지형 및 Double-U 수직 밀폐형이 경제성이 있다고 판단할 수 있지만, Double-U의 경우 시공성 문제 등을 고려하여야 하며, 개방형의 경우 지하수를 직접이용하기 때문에 주기적인 관리 및 청소가 필요로 하여 유지관리비용에 대한 고려를 통한 경제성 평가가 이루어져야 한다.

총 시공 및 설비 비용을 고려해 보더라도 전체 공사비 대비 함몰방지형이 다른 공법에 비해 높은 경제성을 갖고 있지는 않다. 이는 기존 연구에 결과에 따른 유효 열전도도 범위와 비교하였을 때, 본 연구(3단계 건설 매립지반 기준 검토시)의 수직 밀폐형의 경우 일반적인 열전도도의 범위에 근접하여 있으나, 함몰방지 개방형의 경우 5.49 W/mK의 약 61% 수준 정도로 시공 및 운영시 수직밀폐형 대비 시공비 및 유지관린 측면 고려시 높은 경제성을 기대하기 어려울 것으로 판단된다. 이는 본 연구가 진행된 지반의 지하수 취수용량이 70 m^3/day로 열전도도에 영향의 주요 요소인 지하수량이 일반적인 지반의 취수용량(100 ~ 150 m^3/day) 대비 50 ~ 70% 정도로 지하수량 부족이 원인인 것으로 판단된다.

표 3-5-15 열교환기 총 시공비용

<단위 : 원>

구분			수직밀폐형			함몰방지개방형
교환기			Single U-Type	Single U-Type	Double U-Type	SCW
채움재			Bentonite	콩자갈+무수축 Mortar	Bentonite	콩자갈
천공	심도(m)		200	200	200	500
	수(공)	프로그램 요구	471	455	444	46
		예상 설계량	509~518	491~501	480~488	46
	단가(원/공)		6,200,000	6,350,000	6,500,000	60,000,000
	시공비		3,159,000,000 ~ 3,213,000,000	3,118,000,000 ~ 3,181,000,000	3,120,000,000 ~ 3,172,000,000	2,760,000,000
장비설치비			3,900,000,000	3,850,000,000	3,740,000,000	3,833,000,000
합계			7,059,000,000 ~ 7,112,000,000	6,968,000,000 ~7,031,000,000	6,860,000,000 ~ 6,912,000,000	6,893,000,000

4. 경제성 분석 프로그램 Module 개발

가. 서론

(1) 배경

앞서 살펴본 바와 같이 국내외에서 에너지 발전설비에 대한 다양한 경제성 분석 program 이 개발되어 왔다. 하지만 국내의 설계, 시공, 현장 조건 그리고 에너지원(전력 요금제, 도시가스 및 지역난방 요금제 등) 조건에 대해 전반적으로 고려하지 못하는 한계가 있다. 또한 기존의 경제성 분석 프로그램에서는 에너지 비용 절감을 위해 냉난방 시스템과 함께 운영되는 축열시스템 대한 고려와 서로 다른 지열 시스템 별(수직밀폐형, 개방형, 에너지 파일 등)에 대한 경제성분석이 어려운 실정이다.

(2) 목적

따라서 본 연구에서는 다양한 대안별(기존 시스템, 지열 시스템 별 등) 비교가 가능하고 축열조 시스템 운영을 반영할 수 있는 국내 실정(기초 에너지원 체계 등)에 적합한 지열 냉난방 시스템에 특성화된 경제성 프로그램 module 을 개발하고자 하였다.

(3) 분석 Program 의 대상 범위

- 분석 대상 : 국내 냉난방에 사용되는 에너지원(전기, 지역난방, 도시가스, 경유 단가 등)의 실정 반영하고 특히, 시간대별 운영비용에 대한 고려 할 수 있도록 하였다.

- 비교 대안(최소 2개 ~ 최대 5개) : 사용자에 따라 기존 시스템을 규정하고 그 대비 지열 시스템의 경제성 분석이 가능하도록 대안을 5개까지 선정할 수 있도록 하였다.

- 사용 에너지 비용은 에너지 단가 및 시스템 COP(coefficients of performance)를 기준으로 산정하였다.

- 냉난방 시스템 내 축열조 반영(축열조 최적 운영 대안) : 지열냉난방 시스템 및 기존 냉난방 시스템에 적용되는 축열의 경우 일반적으로 야간과 주간의 에너지 비용이 다른 전기에너지의 경우에만 반영 될 수 있도록 하였다. 따라서 이는 전력 요금 기준(최대부하, 중간부하, 경부하 비용)에 따른 운영되도록 program을 설계하였다.

- 생애주기비용 분석에 기반을 두고 기존 설비뿐만 아니라 지중열 교환기 형태별 대안에 따른 NPV, IRR, B/C Ratio, Payback Period 등 검토하여 사용자가 시스템별 경제성을 검토 할 수 있도록 하였다.

(4) Program 개발 Flow 및 방법

- 국내 실정 조사(에너지 요금 체계, 정부 지원 현황)
- 국내실정 및 축열조 운영을 반영한 기본 Module 작성
- 국내실정 고려한 기본 Module을 기초로 한 Excel 기반 Program 작성
- 기존 경제성 분석(RETScreen 등) Program과의 비교 검증(향후)

나. 국내 현황

(1) 국내 지열냉난방 현황

지열 냉난방 시스템은 2000 년 우리나라에 최초로 도입되었으며, 주로 학교, 레저시설, 병원 등에 대부분 수직형 지중열교환기를 채택하여 적용되고 있다. 2004 년 신·재생에너지 설치 의무화 법규가 시행된 후 일반 건물을 중심으로 보급이 증가추세에 있으나 주택의 경우 전기요금의 누진제 또는 할증제로 인한 경제성 저하로 보급의 어려움을 겪고 있다.
2004 년 시행된 신·재생에너지 설치 의무화 사업을 살펴보면 “공공기관이 신축하는 연면적

1,000 ㎡이상의 건축물에 대하여 예상 에너지사용량의 10 % 이상 신·재생에너지로 공급토록 의무화"하는 제도로 신에너지 및 재생에너지개발・이용・보급촉진법 제12조 제2항에 근간을 두고 있다. 이는 국가기관 및 지방자치단체, 「공공기관의 운영에 관한 법률」 제5조에 따른 공기업, 지방자치단체 및 정부투자기관・정부출연기관・정부출자기업체에서 납입자본금의 100 분의 50이상 또는 50 억 원 이상을 출자한 법인, 특별법에 의하여 설립된 법인을 대상으로 하고 있다.

또한 지열과 같은 신·재생에너지의 보급 확대를 위해 「신·재생에너지 설비의 지원·설치·관리에 관한 기준」에 따라 정부에서 시행사업에 따라 일정금액의 지원을 표 3-5-16과 같이 적용하고 있다. 지원 비율은 에너지원별 기준단가를 기준으로 하고 있다.

표 3-5-16 신·재생에너지 설비 설치비용의 국가 지원 비율

구 분			지원비율	
1. 보급 보조 사업	그린홈100만호 보급사업, 일반보급 보조사업	태양광	40% 이내	
		풍 력	50% 이내	
		연료전지	75%	
		태양열, **지열**	50% 이내	
		바이오	50% 이내	
		폐기물, 집광채광, 기타	30% 이내	
		보금자리주택, 취약계층*	80% 이내	
	시범보급사업		80% 이내	
	지방보급사업		50% 이내	
2. 금융 지원 사업	신·재생에너지설비의 설치 또는 생산시설 및 운전자금		최대 90%이내	중소기업 : 90%이내 대기업 : 50%이내

* 취약계층 : 「사회적기업 육성법」 제2조제2호의 규정에 따른 계층을 말함

(2) 국내 냉난방 주 에너지원(연료) 현황

지열 과 기존 냉난방 시스템의 에너지 비용의 비교검토를 위해 국내 주요 에너지원의 현황 검토가 필요하다. 또한 이는 에너지원별로 상당히 다른 요금체계로 운영되고 있어 각 특성을 파악하여 경제성 분석에 고려되어야 한다. 국내 냉・난방에 사용되는 에너지원을 확인한 결과 전기, 도시가스, 지역난방, 유류 등이 사용됨을 알 수 있었다. 따라서 각 에너지원 별 요금체계를 다음과 같이 확인하였다. 이중 유류인 경유, 등유의 경우 시기별 요금변동이 많아 그 시기별 요금을 직접 적용함이 적합하리라 판단되어 현황 분석에는 포함시키지 않았다.

(가) 전기에너지

국내 전기요금체계는 사용용도에 따라 6가지 계약종별(주택용, 일반용, 산업용, 교육용, 농사용, 가로등)로 구분하여 해당되는 요금을 적용하고 있다. 이는 용도별 전기사용패턴에 따라 공급원가 차이 발생을 통해 전기공급비용 반영하여 저소득층·농어민 보호, 에너지 절약, 산업경쟁력 제고 등 국가의 각종 정책요인을 반영하기 위함이다. 이러한 전기요금체계를 정리하면 표 3-5-17과 같다.

표 3-5-17 국내 전기 요금 체계

종별	적용범위	요금체계	판매단가*(지수) (단위 : 원/kWh)
주택용	주거용	6단계 누진요금제	127.02 (119)
일반용	공공, 영업용	계절별차등 (6 ~ 8월 고율) 300kW이상 시간대별차등	121.98 (115)
교육용	학교, 박물관 등	계절별차등 (6 ~ 8월 고율) 1,000kW이상 시간대별차등	115.99 (109)
산업용	광업, 공업용	계절별차등 (6 ~ 8월 고율) 300kW이상 시간대별차등	100.70 (95)
농사용	농업, 어업용	단일요금(농사용(갑),농사용(을) 저압) 농사용(을)고압 계절별 차등	45.51 (43)
가로등	가로, 보안등	단일요금	107.33 (101)
평 균			106.33 (100)

*판매단가 : 2013년 실적 기준, 주택용은 심야전력을 포함한 것임.
출처 : http://cyber.kepco.co.kr/ckepco/front/jsp/CY/H/C/CYHCHP00104.jsp

최근 정부는 가정용 누진세와 관련하여 저탄소 녹색성장 전략에 따라 그린홈 100만호 사업 등 신재생에너지의 주택보급을 적극 추진하기 위해 2014년 5월 1일부터는 지열냉난방설비에 대하여 일반용 요금을 적용하기로 하였기 때문에 이는 향후 변동된 단가를 적용하고자 본 연구에서는 제외하였다 또한 지열냉난방의 에너지 비용 절약을 위해 주로 사용되어 왔던 심야전기는 향후 신청을 받지 않고 현재 상태를 유지할 예정에 있어 본 연구에서는 심야전력에 대해 고려하지 않았다.

(나) 지역난방

지역난방이란 난방 및 급탕을 위해 공동주택, 빌딩, 상가 등에 개별 열 생산 시설을 설치하지 않고, 열병합발전소 등 대규모 열 생산 시설에서 생산된 열(온수)을 대단위지역에 일괄 공급하는 도시기반시설을 말한다. 난방수요가 적은 하절기에는 지역냉방을 공급하는데, 지역난방 온수를 이용하여 업무, 상업용 건물에 설치된 흡수식 냉동기를 가동, 냉방을 공급하는 냉방시스템이다.(권순갑, 2006)

국내 지역난방은 1980년 초 기존 서울화력 발전소를 열병합 방식으로 개조하여 여의도 등 인근지역에 열 공급하는 남서울지역난방 사업을 검토하면서 시작되었다. 현재 공급현황을 살펴보면 한국지역난방공사에서 서울 여의도 및 강남, 분당, 고양, 수원, 대구 청주 등에 공급하며, GS 파워(주)에서 안양, 부천지역 그 외 안산도시개발(주)와 부산시에서 각각 해당지역의 공급을 담당하고 있다. 이러한 지역난방의 열요금표를 살펴보면 표 3-5-18과 같으며, 이는 한국지역난방공사의 열요금표로 본 연구의 경제성 분석 Program에 반영된 요금표이다.

표 3-5-18 한국지역난방공사 열요금표(2013.7.1. 시행)

<table>
<tr><th rowspan="2">구분</th><th>계약</th><th rowspan="2">용도</th><th rowspan="2">기본요금</th><th colspan="2" rowspan="2">사용요금 (부가가치세 별도)</th></tr>
<tr><th>종별</th></tr>
<tr><td rowspan="12">온수</td><td rowspan="4">주택용</td><td rowspan="3">난방용</td><td>계약면적 52.40원/㎡</td><td colspan="2">단일요금 : 83.50 원/Mcal</td></tr>
<tr><td rowspan="2">계절별 차등요금</td><td colspan="2">춘추절기(3~5월, 9~11월) : 81.82 원/Mcal</td></tr>
<tr><td colspan="2">하절기(6~8월) : 73.63 원/Mcal</td></tr>
<tr><td colspan="2">동절기(12~익년 2월) : 85.93 원/Mcal</td></tr>
<tr><td rowspan="2">냉방용</td><td rowspan="2">-</td><td>5~9월</td><td>난방용 사용요금의 85%</td></tr>
<tr><td>1~4월, 10~12월</td><td>난방용 사용요금 적용</td></tr>
<tr><td rowspan="3">업무용</td><td rowspan="2">난방용</td><td>계약용량 396.79원/Mcal/h</td><td colspan="2">단일요금 :108.41 원/Mcal</td></tr>
<tr><td>시간대별 차등요금(12~익년 2월)
(계약용량 1,000Mcal/h 이상)</td><td colspan="2">수요관리 시간대 (07:00~10:00)
124.68 원/Mcal
수요관리 이외 : 102.98 원/Mcal</td></tr>
<tr><td>냉방용</td><td>-</td><td rowspan="2">5~9월</td><td>1단 냉동기 : 38.43 원/Mcal
2단 냉동기 : 29.89 원/Mcal</td></tr>
<tr><td colspan="2">1~4월, 10~12월</td><td>난방용 사용요금 적용</td></tr>
<tr><td rowspan="3">공공용</td><td rowspan="2">난방용</td><td>계약용량 361.98원/Mcal/h</td><td colspan="2">단일요금 : 94.68 원/Mcal</td></tr>
<tr><td>시간대별 차등요금</td><td colspan="2">수요관리 시간대 : 108.86 원/Mcal
수요관리 이외의 시간대 : 89.94원/Mcal</td></tr>
<tr><td>냉방용</td><td>-</td><td rowspan="2">5~9월</td><td>1단 냉동기 : 33.56 원/Mcal
2단 냉동기 : 29.89 원/Mcal</td></tr>
<tr><td colspan="2">1~4월, 10~12월</td><td>난방용 사용요금 적용</td></tr>
<tr><td rowspan="5">냉수*</td><td rowspan="5"></td><td rowspan="5">냉방용</td><td>계약용량(Mcal/h)</td><td>원</td><td colspan="2">Mcal당</td></tr>
<tr><td>0 ~1,000</td><td>3,822</td><td colspan="2" rowspan="4">첨두부하시간 : 135.41 원/Mcal
중간부하시간 : 104.16 원/Mcal
경부하시간 : 62.49 원/Mcal</td></tr>
<tr><td>~ 2,000</td><td>2,124</td></tr>
<tr><td>~ 3,000</td><td>1,754</td></tr>
<tr><td>3,000 초과</td><td>1,550</td></tr>
</table>

* 냉수 : 부하시간대 구분

1. 첨두부하시간 : 7월 1일부터 8월 31일까지의 오후 2시정각부터 오후 4시정각까지
2. 중간부하시간 : 7월 1일부터 8월 31일까지의 오후 2시정각부터 오후 4시정각 이외의 시간
3. 경부하시간 : 7월 1일부터 8월 31일까지를 제외한 1월 1일부터 12월 31일까지의 시간

출처 :

http://www.kdhc.co.kr/content.do?sgrp=S11&siteCmsCd=CM3651&topCmsCd=CM3800&cmsCd=CM3856&pnum=2&cnum=5

(다) 도시가스

도시가스는 배관을 통하여 수요가에게 공급하는 연료용 가스로, 석유정제시 나오는 나프타를 분해시킨 것이나 LPG, LNG 를 원료로 사용한다. 국내의 경우 강원도, 충청북도, 경상북도 일부지역에서 LPG/Air 방식의 도시가스를 공급하고 있으며, 그 이외의 지역은 모두 LNG(천연가스)를 공급하고 있다.

도시가스의 경우 총 서울, 경기도, 인천시 등을 포함한 총 28 개 지역에의 회사별로 개별 공급하기 때문에 전체 요금표는 본 보고서에는 수록하지 않았지만, 개발 분석프로그램에는 지역별, 용도별(주택용, 업무, 일반용 1, 일반용 2, 냉난방공조용, 산업용, 열병합 1(소형열병합,CES), 열병합 2(집단에너지), 열전용설비용, 절기별(동절기, 하절기, 기타월)로 이를 고려할 수 있도록 하였다.

다. 경제성 분석 구조

시설물 및 설비 등의 생애주기 비용에 따른 경제성 분석은 식 (5.4.1)과 같이 초기비용(Initial Cost)과 연간 운영비용(Annual Operation Cost), 주기비용(Periodic Cost)으로 크게 나눌 수 있으며, 이 때 운영비용 및 주기비용의 경우 미래 가치이기 때문에 이자율(Rate of Discount), 물가 상승률(Inflation Rate) 등을 적용하여 현재 가치(Present Value)로 변환 되어야 한다.

$$LCC = IC + \sum_{i}^{n}(N \times AOC_i) + (N \times PC_n) \tag{5.4.1}$$

$$N = \frac{(1+i)^n - 1}{i \times (1+i)^n} \tag{5.4.2}$$

여기서, IC = Initial Cost(초기 비용), N = Present Value(현재가치) AOC = Annual Operation Cost(연간 운영비용), PC = Periodic Costs(주기 비용), i = 할인율, n = 분석연수이다.

이와 같이, 지열냉난방 시스템 설치 및 운영 시 발생되는 비용은 그림 3-5-12와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 초기 비용은 시설 투자비 전체를 의미하며, 유지관리비는 일반유지관리비, 유지보수비, 에너지 비용으로 나눌 수 있으며, 주기비용은 해체 및 폐기물, 잔존가치로 분류할 수 있다.

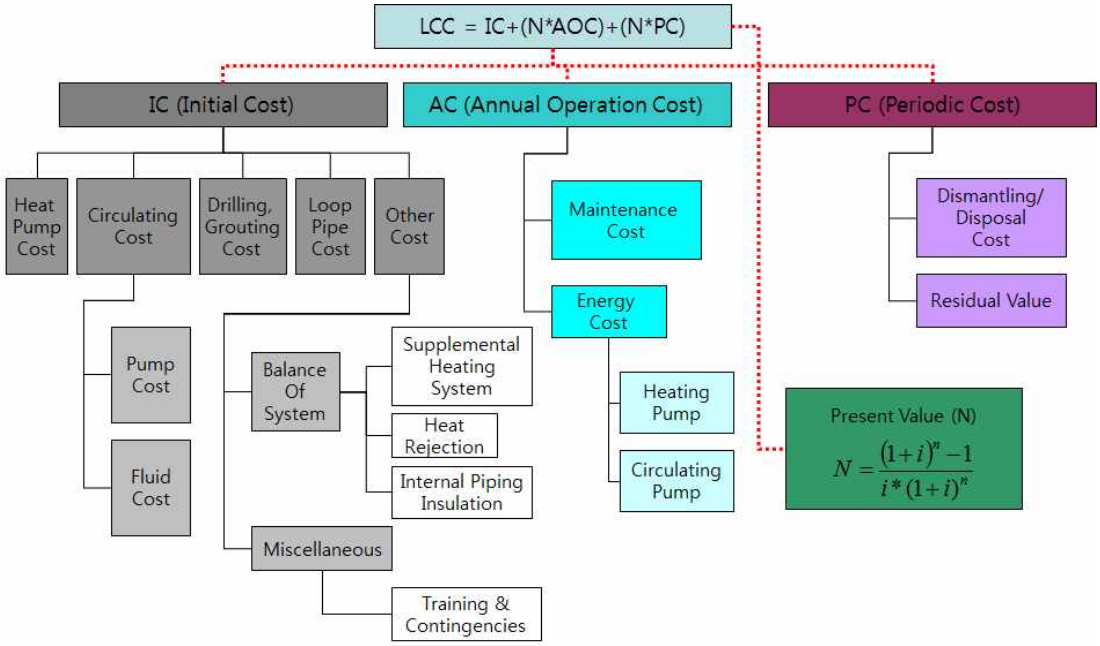


그림 3-5-12 생애주기비용 분석의 구성 요소

(1) 재정변수 및 지원금

경제성 분석은 일반적으로 설비 및 시설물의 미래를 대상으로 하므로, 이를 예측을 위한 기본 조건이 필요하다. 분석기간 또는 대상 설비 및 시설물의 사용수명과 할인율 등에 대한 정의가 이루어져야 한다.

(가) 분석기간

분석기간은 수명주기를 얼마동안으로 선정할 것인가에 대한 가정이다. 일반적으로 구조물, 건축물이나 주요 설비 장비의 내용 연수 등을 고려하여 산정하게 된다(김용수, 1998). 지중열 에너지 시스템의 경우 지열 에너지를 활용하는 건축물, 지중열교환기(GHE: ground heating exchanger) 또는 heat pump 등이 기준이 되는 경우가 많다. 일반적으로 냉난방 시설의 수명주기는 10~20년을 기준으로 하고 있다.

(나) 할인율

경제성 분석에는 미래의 발생비용을 현재의 가치로 환산하는 과정을 포함한다. 화폐는 시간이 지나면 그 가치도 변화하는 특성을 가지고 있다. 따라서 발생시점이 다른 화폐의 객관적 비교를 위해서는 특정 시점으로 화폐의 시간가치를 환산해야 하며 이때 환산하기 위해서는 할인율이 이용 된다. 할인율은 미래에 발생하게 될 편익과 비용을 현재의 가치

로 환산하기 위하여 사용하는 이자율로서 사용목적 및 주체에 따라 사회적 할인율과 재무적 할인율로 분류 할 수 있다. 재무적 할인율은 주로 민간 기업이 수익성의 극대화를 목적으로 하는 투자사업의 타당성여부를 판단하기 위하여 사용하는 할인율이며, 사회적 할인율은 공공부문이 공익, 즉 사회전체의 관점에서 본 이익 극대화를 목적으로 하는 투자사업의 타당성여부를 판단하기 위하여 사용하는 할인율이다. 따라서 분석 대상의 용도에 따라 적합한 할인율을 선정하여 사용하여야 한다.

(다) 조세 감면 및 물가 상승률

국내 신·재생에너지 시설 투자 시 총 투자비의 일정 내에서 법인세(소득세)공제를 받을 수 있다. 이는 조세특례제한법 시행규칙 제 13조의 2, 별표8의 3항에 근거하여 적용될 수 있기 때문에 이 또한 반드시 반영해야 보다 정확한 비용 산정이 이루어질 것으로 판단된다. 물가 상승률은 일반적으로 한국은행 통계자료의 최근 5개년 평균 소비자 물가 상승률을 참조하여 경제성분석에 적용하는 것이 적절하리라 판단된다.

(라) 정부의 금융지원

신·재생 에너지 설비의 지원 등에 관한 기준 및 지침 제 12조 별표 1에 의하면 지열 설비는 정부의 국가 지원 사업으로 초기 투자비와 운전비의 50 %의 금융지원을 받을 수 있다. 따라서 경제성 분석시 정부의 금융지원에 따른 융자혜택으로 인한 비용 절감효과를 고려하여 보다 정확한 비용 산정이 요구된다.

(2) 초기 비용(Initial Cost)

일반적으로 초기비용에는 지중열 에너지 시스템(GSHP: ground-source heating pump)의 설비비용(energy equipment cost) 및 설비 설치비 즉 시공비를 의미하며 열펌프(heat pump), 순환 펌프(circulating pump), 순환액(circulating fluid), 천공(drilling), 지중열 교환기 파이프(GHX pipe), valve&fitting 비용, 기타 시설비용과 이들을 설치하는데 필요한 시공비용등이 포함된다.

- heat pump
: 히트펌프의 가격은 장비의 COP 및 제작 업체에 따라 결정되어진다.

- 순환 또는 양정 pump
: 순환, 양정 펌프의 비용은 pump power requirement(kW)을 기준으로 산정할 수 있다. 전력 요구량은 지중열 시스템의 부하 및 열교환기에 따라 필요 요구량이 산정된다.

- circulating fluid

: 순환액 비용 산정은 필요한 유동액량(volume of antifreeze solution, ㎥)에 의해 결정된다. 부동액은 지중열 교환기 loop의 용량만을 고려하게 된다.

- drilling & grouting

: 천공 비용은 일반적인 천공 장비(rotary drill, cable tool drill, air drill 등)의 형태와 지반 조건, bore hole의 직경 등에 의해 결정된다. grouting 비용은 천공 직경과 사용 재료에 의해 결정된다. 이는 시장 조사 및 경제성을 고려하여 산정하는 것이 적절하다고 판단된다.

- GHX pipe

: pipe의 직경과 전체 길이 및 사용 재질에 의해 결정되며, 일반적으로 본 연구에서 적용하는 교환기내의 pipe의 유형의 단가를 적용하게 될 것이다.

- 기타(other) 비용

: 기타 비용으로는 fitting&valve 비용, 지중열에너지 설비에 따른 조정 설비(balance of system)인 supplemental heating system. supplemental heat rejection, internal piping, insulation이 포함되는 비용, 시설 운영을 위한 건물 관리자의 training 비용, 설비 적용에 따라 우발적으로 발생할 수 있는 contingencies 비용을 포함한다. 이 비용은 실제 설계 단계에서 고려되어야 할 항목만을 고려하여 적용하는 것이 바람직하리라 판단된다.

(3) 연간 운영비용(Annual Operation Cost)

운영비용은 냉·난 시스템의 운영에 따라 다년간 발생하는 에너지 비용, 유지관리비(일반 관리비, 유지보수비)등을 의미한다. 여기서 에너지 비용의 경우 냉난방에 직접적으로 사용되는 설비(지열의 경우 heat pump 및 circulating pump, 그 외 경우 실내기, 실외기 등) 운영에 따른 에너지(지열의 경우 전력사용) 사용 비용으로 산정하고, 유지보수 비용의 경우 열에너지 자동제어 시스템이 적용되기 때문에 운전에 따른 점검, 보수 및 부품교체 주기를 초기 비용의 일정 비율로 설정하여 산정할 수 있다. 기존 장비의 경우 지열 냉·난방 시스템보다 주기적으로 점검, 보수 및 부품교체 시기가 짧고 부대비용이 발생되어 유지관리비를 신·재생에너지원보다 높게 설정하는 것이 일반적이다.

(가) 에너지 비용

에너지 사용에 따른 비용은 운영비용에서 차지하는 비용 중 가장 큰 비중을 차지하는 부분이다. 냉난방을 위한 에너지 형태는 크게 전기, 도시가스, 지역난방, 경유 등으로 크게 분류된다. 하지만 각각의 에너지원은 계절 또는 시간대별로 요금을 달리 적용하기 때문에 이

에 대한 고려가 필요하다. 특히 전기는 용도, 전압, 요금제에 의해 구분되고 이를 다시 계절별, 부하별로 세분류하기 때문에 이에 대한 정확한 반영이 필요하다. 따라서 실제 적용된 시스템의 운영시간과 축열조 운영 시 축열이 담당하는 부하와 운영시간이 별도로 정의되어야 한다. 따라서 각 설비의 에너지 사용량과 시간대를 설정하여 시간 또는 계절별 요금을 곱하는 방식으로 비용을 산출하는 것이 에너지 사용 비용을 비교 검토하는 것이 적정할 것이라 판단된다.

(나) 유지관리 비용

유지관리 비용은 일반관리비와 유지보수비로 나눌 수 있다. 일반관리비는 냉·난방의 주요설비 및 부수적 설비 등을 유지 관리하는데 소요되는 관리비용이다. 일반관리비는 대부분이 장비의 유지관리 및 점검을 위하여 상주하는 직원에게 지출되는 관리인건비가 대부분을 차지한다고 과거 연구에서 조사된 적이 있다. 그리고 운영에 소요되는 각종 부대비용은 관리 인건비의 10 % 정도 소요된다고 조사되었다. 유지보수비는 교체, 보수 주기 및 비용 그리고 보수율을 조사하여 그에 따른 비용을 산정하는 것이 적절할 것이라 판단된다.

(4) 주기 비용(Periodic Cost)

주기 비용은 지열냉난방 시스템의 사용주기가 완료된 후 해제·폐기 처분비와 잔존가치를 의미한다. 해체·폐기 처분비의 경우 제품의 제작업체의 전문가와의 의견 수렴을 통해 산정을 하는 방법이 적합하리라 판단된다. 잔존가치에 대해서는 설치된 냉·난방 주요 설비(지열의 경우 heat pump, ground heat exchanger 등)의 재활용 여부와 그에 따른 이익을 통해 산정하고, 물가자료의 품목별 단가를 바탕으로 산출하는 방안이 적합하리라 판단된다. 본 연구에서는 설비의 교체 및 보수가 지속적으로 이루진다고 가정하여 해제·폐기 처분비용은 고려하지 않았다.

라. 경제성 분석 module 구성

앞서 살펴본 국내의 실정과 경제성 분석의 구조에 따라 지열 냉·난방 시스템의 경제성 분석을 위한 기본적 구성을 정리하면 표 3-5-19와 같으며, 각 항목에 대한 세부 내용은 다음절에서 다루었다. 표 3-5-19에서 확인할 수 있듯이 크게 5개 항목인 기본정보, 대안별 시스템 설계, 초기 비용, 운영비용 및 주기비용, 비용 분석결과 도출로 나눌 수 있다. 각각은 사용자가 비교할 대안의 기본정보에서 세부 상세 설계 정보, 비용 정보들을 각각 입력하여 최종적으로 내용연수 동안에 발생된 비용에 대한 경제성 비교를 할 수 있도록 하였다.

표 3-5-19 경제성 program 기본 module

대분류	중분류	소분류	비고
기본 정보	Project 정보 (사용자 입력)	① Project 이름, ② Project 위치 ③ Project 유형 ④ 작성자 정보 ⑤ 비교 대안 수 결정	- Project의 일반사항 및 경제성 분석 비교 대상 수 선정
	재정변수 (사용자 입력)	① 할인율 ② 물가상승률 ③ 내용연수 ④ 잔존가치(상각률) ⑤ 등유 및 경유 단가	- 발생비용의 현재가치 환산을 위한 기본 변수 입력 - 시스템의 내용연수 입력 - 대안별 비용·편익 비교를 위한 기본 가정치 설정 - 변동이 많은 유류 단가의 경우 사용자 직접 입력
	대상 시설물 정보 (사용자 입력)	① 건물 유형 ② 냉난방 주기 ③ 대상시설 단위 부하 입력 ④ 냉난방 부하 산정	- 대상 시설물의 이용 목적 및 냉난방 주기 - 대상 시설물에 발생하는 냉난방 부하 결정
대안별 시스템 설계 (냉난방)	적용 시스템 정보 (사용자 입력)	① 적용기술(세부기술), ② 시스템 COP ③ 사용 에너지원 세부항목 ④ 추가 전력 사용	- 대안별로 냉·난방에 적용되는 기술 및 용량, 시스템의 COP 등을 입력 - 본 과업 내에서 사용되는 에너지원은 전력, 도시가스, 지역난방, 유류(등유, 경유)로 제한하며 이에 대한 세부(용도 등) 분류
	축열조 운영 (사용자 입력)	① 운영여부(Yes/No) ② 시간당 축열 용량 ③ 축열 시간 ④ 시간당 담당 부하 ⑤ 축열 운영 시간	- 에너지원 비용(전력)의 탄력성을 고려하기 위한 축열조의 적용여부를 결정하고 이에 대한 세부 사항 결정
	추가 전력 소요 (사용자 입력)	① 기타 전력 소비, ② 기타 전력의 운용시간	- 냉·난방의 주 설비 이외에 전력을 소비하는 설비에 대한 소비전력 및 운영시간 입력
초기 비용	타당성조사 (단가 및 수량 사용자 입력)	① 현장조사 ② 시험시공 ③ 환경평가 ④ 예비설계 ⑤ 기타 비용	- 냉·난방 시스템 구축을 위한 대상 현장의 조건 및 필요한 환경평가와 예비 설계에 소요되는 비용 입력. 필요시 기타 비용 입력 가능
	설비비용 (항목 및 단가, 수량 사용자 직접 입력)	① 냉난방의 주요 설비 비용 ② 그 외 부가 설비 ③ 축열조 설비 비용	- 지열의 경우 Heat Pump 등 주요 설비 비용 - 수전설비, 제어장비, 순환액, 열교환기 등 주 냉난방설비에 필수적으로 필요한 부가 설비에 대한 비용 산정 - 축열을 위해 구축하여야 하는 설비비용 산정
	시공비용 (항목 및 단가, 수량 사용자 직접 입력)	① 설비의 설치 비용	- 지열의 경우 열교환기 설치를 위한 Drilling, Grouting과 열교환기와 Heat Pump 연결을 위한 Trench 등을 포함하게 됨. - 기존 시스템 설치에도 포함되는 내부배관 및 단열을 위한 작업에 소요되는 비용 등이 포함됨

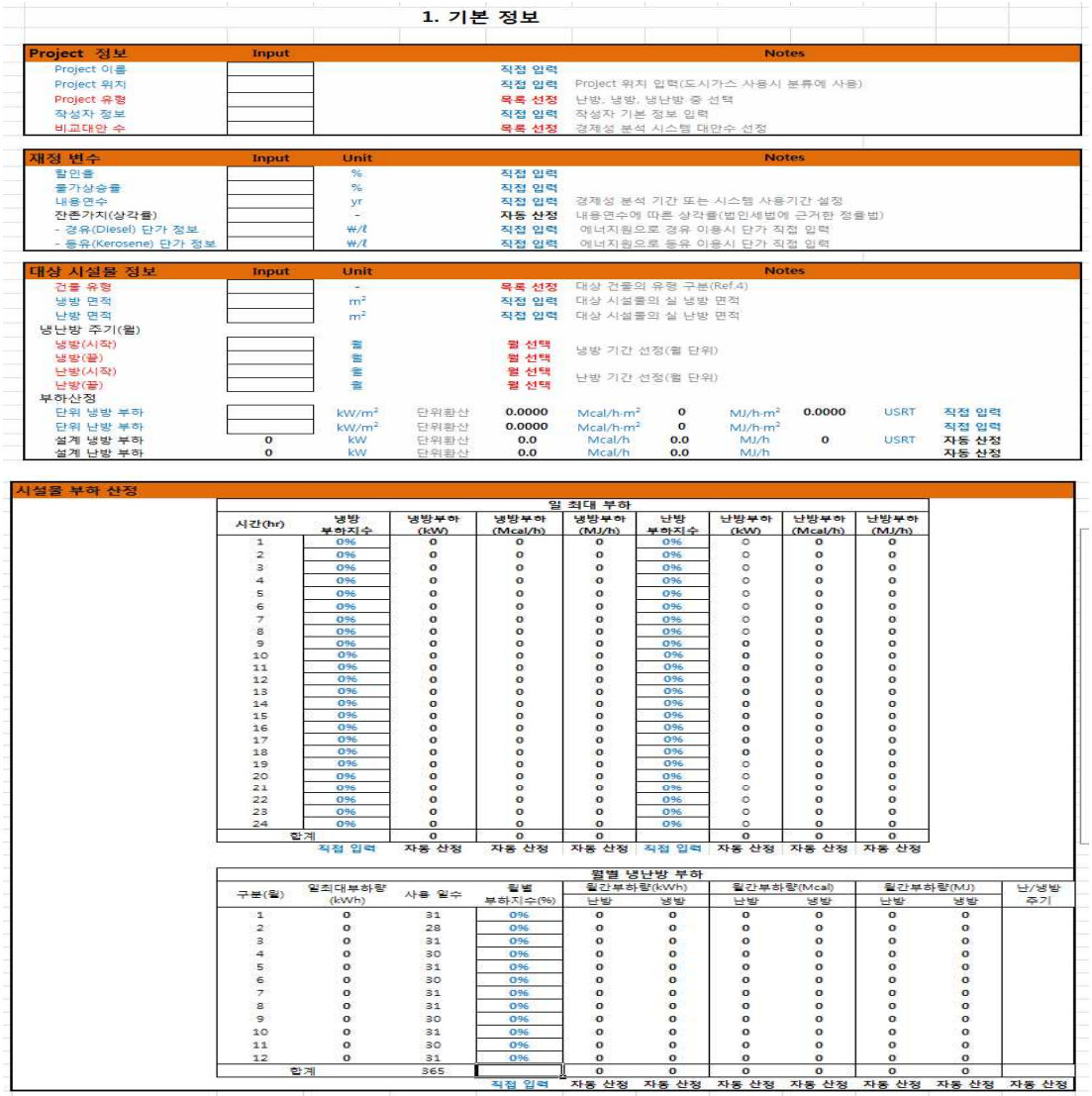
운영비용 및 주기비용	운영 및 유지보수 (단가, 수량 사용자 직접 입력)	① 부품 및 자제 교체 (유지보수비) ② 인력투입 (일반관리비) ③ 예비 비용 ④ 기타 비용	- 시스템의 교체 주기 등을 고려한 부품 및 자체 교체 비용을 입력하고, 시스템 운영에 투입되는 인력대비 비용을 산정하여 입력 - 또한 그 외 필요한 예비비용과 기타 비용입력
	에너지 비용 (자동 산정)	① 연간 냉·난방에 소요되는 비용 산정	- 시스템 설계에서 입력된 시스템 COP와 사용 에너지 단가, 운영시간, 축열조 운영여부에 따른 연간 에너지 비용을 산정하게 됨.
	잔존가치 (자동 산정)	① 정률법 기반 잔존가치	- 본 연구에서는 폐기비용은 고려하지 않음 - 비교적 기계 설비에 정확한 정률법을 이용한 잔존가치를 산정 - 이때 상각률 기준은 법인세법 시행규칙에 따름
결과 도출	연간 발생비용 NPV, IRR, B/C Ratio, PayBack	① 기본정보 및 재정변수 ② 연간 발생하는 비용에 대한 현재가치 환산 ③ 비교 대안별 경제성 검토	- 대안별 산정된 비용과 분석기간에 따른 최종 경제성 분석을 진행 - 연간비용의 경우 이자율 등을 이용하여 현재가치로 환산하여 적용하고, 내용연수 동안 발생된 총 비용을 이용해 NPV, IRR, B/C Ratio, PayBack을 통한 경제성 비교 검토
기타	에너지 원별 단가 에너지 소비량 산정	Excel Program 상에 나타나지는 않음	- 전기, 지역난방, 도시가스에 대한 세부 단가 규정 - 설비 시스템 및 COP, 운영시간, 에너지원의 단가에 따라 연간 총 에너지 소비량 산정

마. 경제성 분석 각 Module 별 세부 구성

본 경제성 분석 프로그램은 Microsoft Excel 프로그램을 기반으로 하고 있기 때문에, 표 5.4.4에서 규정된 대분류 항목은 Microsoft Excel의 별도의 한 개 sheet로 구성되며, 중분류와 소분류는 sheet 내부 항목으로 구성되게 된다.

(1) 기본 정보 구성 항목

기본 정보는 그림 3-5-13과 같이 대상 Project의 기본 정보 입력 항목 구성 되어 Project 정보, 재정변수(할인율 등)와 대상 시설물의 정보에 대해 입력하게 된다. 재정변수의 경우 적용 시스템의 연간 에너지비용의 현재가치 환산과 내용연수에 따른 잔존가치 평가에 활용된다. 시설물 정보는 시설물의 단위 면적(m^2)에 따른 부하와 시간대, 월별 부하지수를 입력함으로 써 대상 시설물의 발생 냉·난방 부하량을 산정하게 된다.



1. 기본 정보

Project 정보	Input		Notes
Project 이름		직접 입력	
Project 위치		직접 입력	Project 위치 입력(도시가스 사용시 분류에 사용)
Project 유형		목록 선정	난방, 냉방, 냉난방 중 선택
작성자 정보		직접 입력	작성자 기본 정보 입력
비교대안 수		목록 선정	경제성 분석 시스템 대안수 선정

재정 변수	Input	Unit	Notes
할인율		%	직접 입력
물가상승률		%	직접 입력
내용연수		yr	직접 입력 경제성 분석 기간 또는 시스템 사용기간 설정
잔존가치(상각률)		-	자동 산정 내용연수에 따른 상각률(법인세법에 근거한 정률법)
- 경유(Diesel) 단가 정보		₩/ℓ	직접 입력 에너지원으로 경유 이용시 단가 직접 입력
- 등유(Kerosene) 단가 정보		₩/ℓ	직접 입력 에너지원으로 등유 이용시 단가 직접 입력

대상 시설물 정보	Input	Unit	Notes
건물 유형		-	목록 선정 대상 건물의 유형 구분(Ref.4)
냉방 면적		m^2	직접 입력 대상 시설물의 실 냉방 면적
난방 면적		m^2	직접 입력 대상 시설물의 실 난방 면적
냉난방 주기(월)			
냉방(시작)		월	월 선택
냉방(끝)		월	월 선택 냉방 기간 선정(월 단위)
난방(시작)		월	월 선택
난방(끝)		월	월 선택 난방 기간 선정(월 단위)
부하산정			
단위 냉방 부하		kW/m^2	단위환산 0.0000 $Mcal/h\cdot m^2$ 0 $MJ/h\cdot m^2$ 0.0000 USRT 직접 입력
단위 난방 부하		kW/m^2	단위환산 0.0000 $Mcal/h\cdot m^2$ 0 $MJ/h\cdot m^2$ 직접 입력
설계 냉방 부하	0	kW	단위환산 0.0 Mcal/h 0.0 MJ/h 0 USRT 자동 산정
설계 난방 부하	0	kW	단위환산 0.0 Mcal/h 0.0 MJ/h 자동 산정

시설물 부하 산정

일 최대 부하

시간(hr)	냉방 부하지수	냉방부하 (kW)	냉방부하 (Mcal/h)	냉방부하 (MJ/h)	난방 부하지수	난방부하 (kW)	난방부하 (Mcal/h)	난방부하 (MJ/h)
1	0%	0	0	0	0%	0	0	0
2	0%	0	0	0	0%	0	0	0
3	0%	0	0	0	0%	0	0	0
4	0%	0	0	0	0%	0	0	0
5	0%	0	0	0	0%	0	0	0
6	0%	0	0	0	0%	0	0	0
7	0%	0	0	0	0%	0	0	0
8	0%	0	0	0	0%	0	0	0
9	0%	0	0	0	0%	0	0	0
10	0%	0	0	0	0%	0	0	0
11	0%	0	0	0	0%	0	0	0
12	0%	0	0	0	0%	0	0	0
13	0%	0	0	0	0%	0	0	0
14	0%	0	0	0	0%	0	0	0
15	0%	0	0	0	0%	0	0	0
16	0%	0	0	0	0%	0	0	0
17	0%	0	0	0	0%	0	0	0
18	0%	0	0	0	0%	0	0	0
19	0%	0	0	0	0%	0	0	0
20	0%	0	0	0	0%	0	0	0
21	0%	0	0	0	0%	0	0	0
22	0%	0	0	0	0%	0	0	0
23	0%	0	0	0	0%	0	0	0
24	0%	0	0	0	0%	0	0	0
합계		0	0	0		0	0	0
		직접 입력	자동 산정	자동 산정	직접 입력	자동 산정	자동 산정	자동 산정

월별 냉난방 부하

구분(월)	일최대부하량 (kWh)	사용 일수	월별 부하지수(%)	월간부하량(kWh) 난방	월간부하량(kWh) 냉방	월간부하량(Mcal) 난방	월간부하량(Mcal) 냉방	월간부하량(MJ) 난방	월간부하량(MJ) 냉방	난/냉방 주기
1	0	31	0%	0	0	0	0	0	0	
2	0	28	0%	0	0	0	0	0	0	
3	0	31	0%	0	0	0	0	0	0	
4	0	30	0%	0	0	0	0	0	0	
5	0	31	0%	0	0	0	0	0	0	
6	0	30	0%	0	0	0	0	0	0	
7	0	31	0%	0	0	0	0	0	0	
8	0	31	0%	0	0	0	0	0	0	
9	0	30	0%	0	0	0	0	0	0	
10	0	31	0%	0	0	0	0	0	0	
11	0	30	0%	0	0	0	0	0	0	
12	0	31	0%	0	0	0	0	0	0	
합계		365		0	0	0	0	0	0	
			직접 입력	자동 산정	자동 산정	자동 산정	자동 산정	자동 산정	자동 산정	자동 산정

그림 3-5-13 기본 정보 Sheet

일반적으로 시설물에 대한 냉·난방 설비의 설계는 시설물의 구조에 따른 부하량 계산에서 시작되는데 본 과업에서는 대상 건물에 대한 냉난방 부하가 산정되었다는 가정 하에 분석될 수 있도록 하였다. 이는 냉난방부하 산정까지 본 분석 Program에 포함된다면 Program 개발 취지에서 벗어나기 단위면적별 부하량과 시간 최대 부하 기준 일, 월별 부하 지수를 입력하여, 시간에 따른 최대 냉난방 부하를 결정하고, 그 값을 기준 냉난방 주기에 따른 부하 지수를 적용하여 일, 월별 냉난방 부하 산정하는 방법을 적용하였다.

다음은 각 세부 항목별 상세 내용을 기술하였다.

- Project 이름

: Project 이름을 입력한다.

- Project 위치

: Project의 기본 정보 중 Project 위치 정보의 경우 지역난방 등을 고려하고 지역별 특성을 확인하기 위해 입력변수이다(ex. 인천광역시 등).

- Project 유형

: Project에 적용된 시스템 유형 결정하기 위한 입력변수이며 이는 일부 Project의 경우 냉방 또는 난방만을 운영하는 경우를 반영 위한 것이다.

- 작성자 정보

: 작성자에 대한 기본 정보 입력하는 부분이다.

- 비교대안 수

: 기존 설비에 대한 지중열 시스템이 경제성 비교는 물론 지중열 시스템별(수직밀폐형, 개방형, 에너지파일 등)에 대한 경제성 비교도 가능하도록 하여 대안수를 5까지 선택할 수 있도록 하였다.

- 재정변수

: 냉난방 시스템의 설치 및 운영을 통해 발생되는 비용의 현재가치 환산위한 할인율, 물가상승률 및 내용연수를 입력하고 내용연수에 따른 잔존가치(상각률)을 산정하는 단계이다.

→ 할인율 : 일반적인 전력설비에 대한 경제성평가에 적용되는 사회적 할인율을 사용자가 직접입력하게 된다.

→ 물가상승률 : 한국은행 통계자료 등을 참조하여 작성자 판단에 따른 평균 소비자 물가 상승률을 적용하는 것이 적절하리라 판단된다.

→ 내용연수 : 경제성 분석 기간 또는 시스템 사용기간 설정하는데 일반적으로 10년~20년 설정하는 것이 일반적이다.

→ 잔존가치(RV: residual value) : 고정자산이 물리적 혹은 기능적 원인으로 시간이 지남에 따라 그 가치가 감소되는 것을 감가상각이라고 하며 설비 처분 및 자산 평가 시 평가되는 실질적인 가치를 뜻한다. 기계설비의 경우 법인세법에 근거한 정률법이 비교적 정확하며, 상각률(R)과 잔존가치 산정은 식 (5.4.3)과 식 (5.4.4)에 따른다.

$$\text{상각률}(R) = 1 - \sqrt[n]{\frac{S}{P}} \tag{5.4.3}$$

$$Residual\ Value = P(1-R)^n \tag{5.4.4}$$

여기서 P = 취득원가, S = 잔존가치이다.

→ 경유 및 등유 : 경유, 등유와 같은 유류의 경우 시기별 요금변동이 많아 그 시기별 요금을 직접 적용함이 적합하리라 판단되어 사용자가 단가를 직접 입력할 수 있도록 재정변수에 포함하였다.

- 대상 건물 정보

대상건물의 유형과 면적 및 시스템 설계를 위한 단위 냉난방 부하와 냉난방 주기 등을 입력하는 부분이다.

→ 유형건물 유형 분류 : 대상 건물의 유형은 대표적인 6 가지 유형(상업건물, 주택, 공공건물, 산업건물, 농업 시설, 기타)으로 분류하여 사용자가 선택할 수 있도록 하였다.
→ 냉·난방 면적 : 대상 시설물의 냉방과 난방 면적을 m^2 단위로 직접 입력하게 된다. 이는 단위 면적당 냉방과 난방 부하를 입력하게 되면 이를 통해 설계 냉방 및 난방 부하를 자동 산정하게 된다.
→ 냉·난방 주기 : 대상 시설물에 대한 냉·난방 주기는 월별로 규정을 전제로 한다. 이는 국내 모든 지역에 냉난방 주기가 동일하지 않기 때문에 지역적 특성 및 명확한 냉난방 주기결정을 통해, 냉방 또는 난방시스템의 운영 시기별 운영비용을 산정하기 위함이다. 또한 일반적으로 4월 또는 9월의 경우 냉난방 부하가 존재하지 않는 경우도 있기 때문에 이를 반영하기 위함이다.
→ 대상 건물의 부하 정보 : 단위 면적당 부하를 입력하면 그에 따른 시설물의 설계부하를 산정하게 된다. 또한 시간별, 월별 부하지수를 입력하게 되면 설계부하를 기준으로 시간별, 월별 냉난부하를 자동 산정하게 된다. 운영비용(에너지 비용) 산정을 위한 시간, 일, 월별 발생 부하 입력

(2) 대안별 시스템 설계

대안별 시스템 설계 sheet는 그림 3-5-14와 같으며, 앞서 설정된 대안 별 냉난방 시스템에 대한 세부 설계 내역이 입력되는 부분이다. 냉난방에 적용되는 기술(지열, 에어컨 시스템, 보일러 등)을 정의하며, 기술에 사용되는 에너지원의 정의, 시스템에 축열조의 적용여부, 주요 설비 외에 추가적으로 소요되는 전력량 등을 정의하고 입력하게 된다.

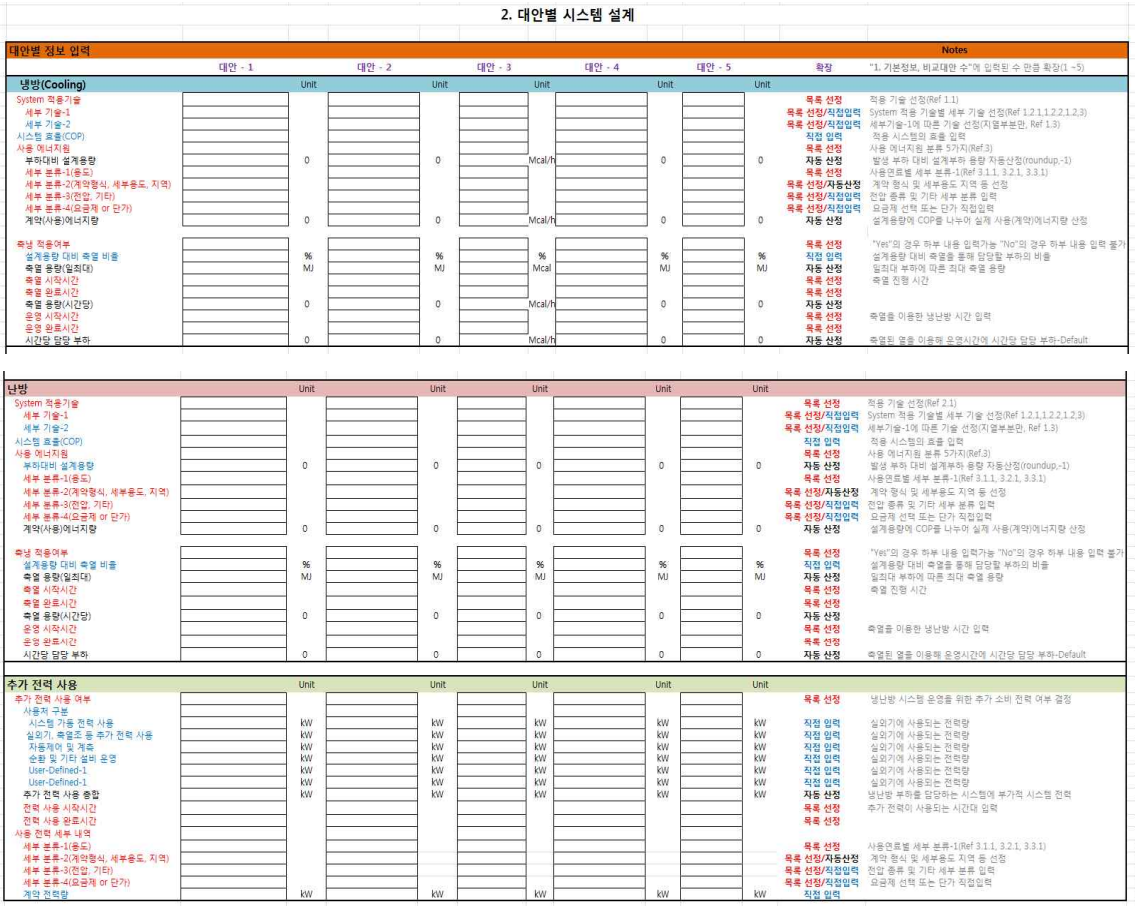


그림 3-5-14 기본 정보 sheet

(가) 냉방(System 적용기술, 시스템 효율(COP))

System 적용기술은 대상 시설물 냉방을 위한 주요 기술을 의미하며, 이러한 시스템에 대한 COP를 입력하여야 한다. COP는 에너지 사용 비용 산정에 주요 변수가 된다. 적용기술이 선정되면 각 기술별로 하부에 포함되는 기술만을 세부 기술-1에서 선정하게 된다. 본 프로그램에서 제시하는 세부 기술-2가 없는 경우 사용자가 직접입력 가능하다. 예를 들어 System 적용기술(heat pump 선정)을 선정하게 되면 세부기술-1(ground-source, air-source, gas-engine, user-defined 중 선택할 수 있고 그 외 central air-con 등 다른 세부기술 선택 할 수는 없도록 되어 있다. 냉방의 기술 분류는 표 3-5-20과 같다.

(나) 난방(System 적용기술, 시스템 효율(COP))

난방의 경우 냉방과 동일한 형태이며, 적용 기술 세부 분류부분만 표 3-5-21과 같이 규정되어 진다. 냉방 및 난방의 기술은 국내에서 주로 사용되는 냉난방 시스템을 기준으로 작성한 것이며 필요에 따라서는 사용자 정의를 통해 규정할 수 있도록 하였다.

표 3-5-20 프로그램 상 냉방 기술 세부 분류

System 적용기술	세부 기술-1	세부 기술-2	비고	
			시스템 효율 (COP)	사용 에너지원 (일반적 사용)
Heat Pump	Ground-Source	Closed Loop(Vertical)	각 기술별 시스템의 효율 적용 0.5 ~ 4.5 정도의 범위를 가짐 (작성자 직접 입력) 정확한 COP의 범위는 향후 조사	Electricity
		Closed Loop(Horizontal)		
		Open Loop(Ground Water)		
		Energy Pile		
		Surface Water		
		User-Defined		
	Air-Source	직접 입력 /생략		Electricity
	Gas-Engine	직접 입력 /생략		Town Gas(LNG)
	User-Defined	직접 입력 /생략		사용자 선택
Air-Conditioning System	Central Air-Con	직접 입력 /생략		Electricity
	Unitary Air-Con	직접 입력 /생략		
	Conventional Air-Con	직접 입력 /생략		
	User-Defined	직접 입력 /생략		
District Heat	Hot Water	직접 입력 /생략		District Heat
	Cold Water	직접 입력 /생략		
Chiller & Refrigerating Machine	Turbo(Centrifugal)	직접 입력 /생략		Town Gas(LNG), Fuel Oil
	Absorption Chiller	직접 입력 /생략		
	Compression	직접 입력 /생략		
	Steam Jet	직접 입력 /생략		
	User-Defined	직접 입력 /생략		
User-Defined	직접 입력 /생략	직접 입력 /생략		사용자 선택

표 3-5-21 프로그램 상 난방 기술 세부 분류

System 적용기술	세부 기술-1	세부 기술-2	비고	
			시스템 효율 (COP)	사용 에너지원 (일반적 사용)
Heat Pump	Ground-Source	Closed Loop(Vertical)	각 기술별 시스템의 효율 적용 0.5 ~ 5.0 정도의 범위를 가짐 (작성자 직접 입력) 정확한 COP의 범위는 향후 조사	Electricity
		Closed Loop(Horizontal)		
		Open Loop(Ground Water)		
		Energy Pile		
		Surface Water		
		User-Defined		
	Air-Source	직접 입력 /생략		
	Gas-Engine	직접 입력 /생략		Town Gas(LNG)
	User-Defined	직접 입력 /생략		사용자 선택
Electric Resistance Heat	직접 입력 /생략	직접 입력 /생략		Electricity
Furnace & Boiler	직접 입력 /생략	직접 입력 /생략		Town Gas(LNG), Fuel Oil
District Heat	Hot Water	직접 입력 /생략		District Heat
	Cold Water	직접 입력 /생략		
Chiller & Refrigerating Machine	Turbo(Centrifugal)	직접 입력 /생략		Town Gas(LNG), Fuel Oil
	Absorption Chiller	직접 입력 /생략		
	Compression	직접 입력 /생략		
	Steam Jet	직접 입력 /생략		
	User Defined	직접 입력 /생략		
User-Defined	직접 입력 /생략	직접 입력 /생략		사용자 선택

(다) 사용 에너지원 정의

사용 에너지원은 냉방과 난방이 동일하며 이는 냉난방 시스템을 운영함에 있어 직접적으로(주로 사용) 사용되는 에너지원을 의미한다. 본 연구에서 개발된 프로그램 상 적용되는 사용에너지원의 세부 분류는 표 3-5-22와 같으며, 다음과 같은 정의를 통해 사용에너지(전기)와 축열조에 따른 비용 산정 예는 표 3-5-23과 같다.

① 부하대비 설계용량 : 사용 에너지원이 결정되면 에너지원단위별로 기본 정보 Sheet에 입력된 냉난방 설계부하대비 설계용량을 자동 산정(산정은 설계부하를 1의 자리에서 올림 하여 적용)하게 된다.
② 계약에너지 : 사용 에너지의 기본요금 산정을 위한 기준으로 일반적으로 가정용은 계약되는 단위면적을 기준으로 단위면적 * 기본요금단가 또는 사용량에 따라 적용하며, 그 외의 경우 계약 에너지양 * 기본요금 단가를 적용하여 기본요금을 산정하게 된다. 사용에너지는 부하대비 설계용량을 COP로 나눈 값에 약 5% 여유분을 감안하여 10의 자리에서 올림 하여 산정하도록 하였다.
③ 사용 에너지원의 세부 분류 : 사용 에너지원이 선정되면 각 에너지원별로 하부에 포함되는 세부 분류만을 선정할 수 있도록 하였다. 예를 들어 사용 에너지원(Electricity(kW) 선정)을 선정하게 되면 세부 분류-1(가정용, 일반용, 산업용, 교육용 , 농사용) 중 선택할 수 있고 그 외 다른 세부분류(Town Gas에 속한 세부 분류 등)를 선택 할 수 없도록 하였다.

(라) 전기- Electricity

① 표 3-5-22에서 확인할 수 있듯이 용도, 계약형식, 전압, 선택 요금제에 따라 요금을 적용하며, 이 때 계절별(여름철, 겨울철, 봄·가을철 구분) 및 시간대 부하(경, 중간, 최대부하)로 구분하여 적용하게 된다.
② 심야 전력의 경우 현재(2014.4월 기준) 운영되어 왔던 심야전력을 유지하고 있으며 추가적인 심야 전력 신청을 받지 않고 있다. 이는 향후 심야 전력을 줄이려 하고 있기 때문에 여기서는 심야전력을 고려하지 않았다.
③ 가정용의 경우 사용 전력량 대비 기본요금 및 사용 비용을 통해 산정하게 되지만, 가정용의 경우 2014년 5월부로 요금제가 변동될 예정으로 본 프로그램에서는 고려하지 않았다.
④ 전기를 에너지원으로 사용할 경우 대상 시설물의 부하를 kWh(kW) 단위로 계산하여 요금 산정하게 된다.

(마) 도시가스(Town Gas-LNG)

① 표 3-5-22에서 확인할 수 있듯이 도시가스의 경우 용도에 따라 요금제가 적용되지만, 도시가스를 공급하는 회사, 즉 지역별로 요금이 달리 적용되기 때문에 S기본 정보 Sheet 에서 정의된 Project 위치를 참고하여 요금을 산정하게 된다. 또한 주택용과 업무용을 제외한 용도로 사용될 경우 절기별(동절기, 하절기, 기타월)로 구분하여 요금이 적용된다.
② 가정용의 경우 사용 도시가스 열량 대비 기본요금 및 사용 비용을 산정하게 되는데

주택용의 경우 취사와 난방이 혼재되어 있어 본 프로그램에서는 가정용을 고려하지 않았다.

③ 도시가스를 에너지원으로 사용할 경우 대상 시설물의 부하를 MJ(MJ/h) 단위로 계산하여 요금 산정하게 된다.

(바) 지역난방(District Heating)

① 표 3-5-22에서 확인할 수 있듯이 지역난방의 경우 온수의 경우 용도가 구분되어 냉난방 모두에 사용되며 난방의 경우 절기와 수요관리 시간대에 따라 요금제가 적용된다. 냉방에서 온수를 사용할 경우 난방에 적용된 단가에 비례하여 비용이 산정되며, 냉방으로 사용되는 냉수의 경우 종별이 구분되지 않고 냉방용 냉수는 계약용량과 부하시간에 따라 달리 금액이 적용할 수 있도록 하였다.

② 가정용의 경우 앞서 전기 및 도시가스에서 이를 고려하지 않았기 때문에 지역난방 역시 가정용은 고려하지 않았다.

③ 지역난방을 에너지원으로 사용할 경우 대상 시설물의 부하를 Mcal(Mcal/h) 단위로 계산하여 요금 산정하였다.

(사) 유류(Fuel Oil-Diesel, Kerosene)

유류의 경우 앞서 사용자가 기본 정보 Sheet에서 입력된 단가로 정의하게 된다.

(아) 축열조의 사용여부

① 지중열에너지 시스템 등 기타 냉난방 시스템은 전력요금을 낮추기 위해 상대적으로 전력요금이 저렴한 심야시간에 시스템운영을 통해 축열 또는 축냉을 하고, 전력요금이 비싼 많은 낮 시간(전력 사용량 많음)에 기본 부하로 낮 시간 부하의 일부를 충당하는 경우가 많다. 따라서 축열 운영에 대한 고려가 필요하고, 축열 운영 시 미 운영 시와의 운영비 차이를 산정하기 위해 축열조 운영 여부 및 축열 시간에 대한 규정이 필요하다.

② 또한 축열조의 열량을 이용해 시간당 담당하는 부하량을 설정해 줌으로써 낮 시간에 운영되는 시스템이 담당하는 부하량에 대한 에너지 사용량을 산정할 수 있도록 하였다.

③ 기타 사용 전력에 대한 정의

- 냉난방을 위한 주요 시스템 외, 이를 운영하기 위해 추가적으로 사용되는 전력에 대한 고려가 필요하기 때문에 이에 대한 사용량과 전력에 대한 세부 정보(계약정보)를 입력하는 부분이다.

표 3-5-22 에너지원 세부 분류

System 적용기술	세부 분류-1 (용도분류)	세부 분류-2 (세부용도, 지역)	세부 분류-3 (전압, 기타)	세부 분류-4 (요금제 or 단가)	기본요금	사용요금	비고 적용 단위
Electricity	주택용	-	저압	-	100 kWh 단위 사용량 기준		kW
			고압				
	일반용 산업용	갑 Ⅰ	저압	-	각 선택항목별 개별 기본요금 적용	계절별 요금 적용	
			고압 A	선택 Ⅰ			
			고압 B	선택 Ⅱ			
		갑 Ⅱ	고압 A	선택 Ⅰ		계절별, 시간대 부하별 요금 적용	
			고압 B	선택 Ⅱ			
		을	고압 A	선택 Ⅰ			
			고압 B	선택 Ⅱ			
			고압 C	선택 Ⅲ			
	교육용	갑	저압	-	각 선택항목별 개별 기본요금 적용	계절별 요금 적용	
			고압 A	선택 Ⅰ			
			고압 B	선택 Ⅱ			
		을	고압 A	선택 Ⅰ		계절별, 시간대 부하별 요금 적용	
			고압 B	선택 Ⅱ			
	농사용	갑	-	-	선택항목별 개별 기본요금 적용	일괄요금	
		을	저압	-		일괄요금	
			고압(A,B)			계절별 요금 적용	
Town Gas (LNG)	주택용	"Sheet -1. 기본 정보"의 Project 위치 정보 가져옴			지역별 요금 적용	지역별로 주택난방, 중앙난방으로 분류 적용	MJ/h
	업무				-	지역별 난방용 요금 적용	
	일반용1, 일반용2 냉난방공조용, 산업용 열병합1, 열병합2					지역별로 동절기,하절기 기타월로 구분하여 요금 적용	
	열전용설비용					열전용(1, 2, 3)으로 분류	
District Heat	온수	주택용	난방용		계약면적기준	단일요금 또는 계절별 요금 적용	Mcal/h
			냉방용			난방요금 기준에 따라 적용	
		업무용, 공공용	난방용		계약용량기준	단일요금 적용 또는 시간대별 차등 요금 적용	
			냉방용			냉동기 종류별 또는 난방 요금에 따라 적용	
	냉수	-	냉방용		계약용량(1,000) 단위로 적용	첨두 시간별 적용	
Fuel Oil(Diesel)						사용자 지정 단가 적용	Mcal/h
Fuel Oil (Kerosene)	-	-					Mcal/h

표 3-5-23 시스템에 따른 운영비용 산정 방안 - 예시(1월, 난방, 전기에너지 사용)

기본 입력 자료					축열 운영									시스템 운영				추가 전력 사용			총 에너지 비용
월	시간 (hr)	실부하	대안 2 COP	에너지 단가	시간당 가능 축열	실 축열 용량	월소비 에너지	축열운영 비용	축열담당 부하 AV	Max	Med	Min	Total	시스템 부하	시스템 에너지	소비 에너지량	시스템 운영비용	에너지 단가	추가 전력사용	추가전력 비용	
				원/kW	kW	kW	kWh	원	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kWh	원	원/kW	kW	원\kWh	원
				원/kW	kW	kW	kWh		kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kWh					
1	1	0	3.8	68	950	950	7,750	526,225	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79.3	12	29,500	
	2	0	3.8	68	950	950	7,750	526,225	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79.3	12	29,500	시스템 운영
	3	0	3.8	68	950	950	7,750	526,225	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79.3	12	29,500	기본 요금
	4	0	3.8	68	950	950	7,750	526,225	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79.3	12	29,500	6,490
	5	0	3.8	68	950	950	7,750	526,225	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79.3	12	29,500	계약 에너지량
	6	0	3.8	68	950	950	7,750	526,225	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79.3	12	29,500	290
	7	0	3.8	68	950	950	7,750	526,225	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79.3	12	29,500	1,882,100
	8	0	3.8	68	950	950	7,750	526,225	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79.3	12	29,500	9,079,214
	9	1,647	3.8	68	0	0	0	0	855	0	0	570	570	1,077	283	8,787	596,656	79.3	12	29,500	
	10	1,433	3.8	85	0	0	0	0	855	0	855	0	855	578	152	4,715	399,868	79.3	12	29,500	추가 전력 요금
	11	1,400	3.8	114	0	0	0	0	855	950	0	0	950	450	118	3,672	419,306	79.3	12	29,500	기본 요금
	12	1,367	3.8	114	0	0	0	0	855	950	0	0	950	417	110	3,403	388,615	79.3	12	29,500	5,550
	13	1,318	3.8	85	0	0	0	0	855	0	855	0	855	463	122	3,775	320,104	79.3	12	29,500	계약 에너지량
	14	1,235	3.8	85	0	0	0	0	855	0	855	0	855	380	100	3,103	263,130	79.3	12	29,500	12
	15	1,202	3.8	85	0	0	0	0	855	0	855	0	855	347	91	2,834	240,341	79.3	12	29,500	713,004
	16	1,071	3.8	85	0	0	0	0	855	0	855	0	855	216	57	1,759	149,182	79.3	12	29,500	
	17	1,153	3.8	85	0	0	0	0	855	0	855	0	855	298	78	2,431	206,156	79.3	12	29,500	총 에너지 비용
	18	1,235	3.8	114	0	0	0	0	855	950	0	0	950	285	75	2,328	265,852	79.3	12	29,500	9,792,218
	19	0	3.8	114	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79.3	0	0	
	20	0	3.8	114	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79.3	0	0	
	21	0	3.8	85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79.3	0	0	
	22	0	3.8	85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79.3	0	0	
	23	0	3.8	114	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79.3	0	0	
	24	0	3.8	68	950	950	7,750	526,225	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79.3	12	29,500	

(자) 시스템 운영에 따른 에너지 사용비용 산정 방안

표 3-5-23에 나와 있는 시스템 운영에 따른 에너지 사용비용 산정 방안에 세부 내용은 다음과 같다.

① 부하(kW)
앞서 입력 또는 계산된 일일 냉난방 부하 중 기본 정보 입력의 냉난방 주기에 따라 월에 따른 시간별 냉난방 부하를 가져옴

② 기본 입력 자료

㉮ 부하지수 : 앞서 입력 또는 계산된 월별 냉난방 부하지수중 기본 정보 입력의 냉난방 주기에 따라 월에 따른 부하지수를 가져옴
㉯ 실 부하 : 시간별 부하와 부하지수에 따른 실 부하 산정을 자동으로 계산
㉰ COP : 앞서 입력한 난방(또는 냉방) 시스템의 COP 값을 가져옴
㉱ 에너지 단가 : 선택된 전기 에너지(ex. 산업용-을-고압A-선택Ⅱ)의 시간별 단가를 가져옴

③ 축열운영
앞서 축열 운영에 "Yes"를 선택하였다면 계산되며, "No"이면 계산되지 않음

㉮ 시간당 축열 : 앞서 입력 한 시간당 축열량과 축열 시간에 따른 시간별 축열량을 계산
㉯ 소비에너지 : "시간당 축열량/COP * 월 일수"에 따라 소비 에너지 계산
㉰ 축열운영비용 : "소비에너지 * 전기단가"를 통해 한 달 동안 그 시간의 축열에 소요되는 비용 산정, 또한 소요되는 총 에너지 비용 산정
㉱ 축열담당부하 : 낮 시간 동안 축열이 담당하는 시간단위별 부하량과 운영되는 시간에 따라 축열담당 부하 계산

④ 시스템운영
축열 외 시스템을 통해 직접 냉난방 운영에 따른 비용 산정한다.

㉮ 시스템운영부하 : 시간별 부하 중 축열이 담당하는 부분을 제외한 냉난방부하, 즉 직접적인 시스템운영을 통해 담당하는 부하량
㉯ 소비에너지 : "시스템운영부하/COP * 월 일수" 에 따라 소비 에너지 계산
㉰ 시스템 운영비용 : "소비에너지 * 전기단가"를 통해 한 달 동안 그 시간의 운영비용 산정, 또한 소요되는 총 에너지 비용 산정

⑤ 추가운영
주 냉난방 시스템 외 추가적인 전력 소비에 따른 비용 산정

㉮ 추가전력사용 : 앞서 입력된 추가전력사용량과 시간대에 따라 추가전력사용 입력됨

㈏ 추가전력비용 : “추가전력사용량 * 월 일수 * 전기단가” 에 따라 소비 에너지비용 계산 및 총 비용 산정

⑥ 총 에너지 비용

㉮ 기본요금 : 계약전력에 따른 기본요금 * 계약전력
㈏ 총 운영비용 : 축열운영비용 + 시스템 운영비용 + 추가전력비용 + 기본요금

(3) 초기 비용 산정 Sheet

일반적으로 초기비용에는 냉난방 시스템의 설비비용을 의미하며 지중열 시스템의 경우 열펌프, 순환 펌프, 순환액, 천공, 지중열 교환기 파이프, valve & fitting 비용, 기타 시설비용 등이 포함된다.
본 과업에서는 초기비용에 시공 및 설비비용 외, 설치 타당성 조사비용을 포함하여 적용하고자 하였다. 초기 비용에 대한 입력 Sheet 그림 3-5-15와 같으며, 각 항목별 세부 내역은 다음과 같다.

(가) 타당성(사전) 조사비용

- 현장조사 : 지열시스템 및 기타 시스템의 적용을 위한 현장 여건 조사에 필요한 비용으로 현장 조사는 투입인력 * 일을 기본 단위로 하며 사용자가 수량 및 단위비용을 직접 입력하여 총 비용을 산정할 수 있도록 하였다.
- 시험시공 : 열전도도 Test 또는 기타 시스템의 가상운영 등에 따른 비용
- 환경평가 : 개방형 시스템의 경우 지하수 이용에 따른 이용성 평가 등에 소요되는 비용
- 예비설계 : 시스템 실시설계에 앞서 진행되는 예비설계에 소요되는 비용

(나) 설비(equipment cost)비용

설비비용은 적용 시스템별로 다르기 때문에 사용자가 직접 항목을 규정하여 입력하고 그에 따른 단가와 수량을 입력하여 단가를 산정할 수 있도록 하였다. 여기서는 지열냉난방 시스템을 예로 들어 정의하였다.

- 적용기술 : 적용기술의 경우 앞서 “대안별 시스템 설계”에서 정의된 시스템 적용기술을 가져와서 입력됨.
- 적용 기술에 대한 시스템 설비비용 : 적용 기술에 따른 주 설비(ex. heat pump 등)에 대한 수량과 단가를 입력하고 그에 따른 시스템 설비비용 산정
- 시스템 운영에 필요한 기타 설비비용 : 지열시스템의 경우 양정펌프, 순환펌프, 순환액 등 다양한 설비들에 대한 비용 산정이 필요하며, 그 외 다른 시스템의 경우 그 외비용 또는 사용자 정의를 통해 비용을 산정
- 기타(Other) 비용 : 기타 비용으로는 fitting & valve 비용, 지중열에너지 설비에 따른 조

정 설비인 supplemental heating system. supplemental heat rejection, internal piping, insulation이 포함되는 비용, 시설 운영을 위한 건물 관리자의 training 비용, 설비 적용에 따라 우발적으로 발생할 수 있는 contingencies 비용을 포함함. 이 비용은 실제 설계 단계에서 고려되어야 할 항목만을 고려하여 적용하는 것이 바람직함.

(다) 시공(construction cost)비용

시공비용은 적용 시스템별로 다르기 때문에 사용자가 직접 항목을 규정하여 입력하고 그에 따른 단가와 수량을 입력하여 단가를 산정할 수 있도록 하였다. 여기서는 지열냉난방 시스템을 예로 들어 정의하였다.

- drilling & grouting : 지열시스템의 경우 천공 및 되메움 비용 산정(일반적으로 m 단위로 산정)
- grout material : 지열시스템의 열교환기 설치 후 되메움에 필요한 재료비용(부피(㎥) 단위로 산정)
- trenching & backfilling : 외부 배관을 위한 트렌치 작업과 되메우기 작업 비용(넓이(㎡) 단위로 산정)
- 기타(Other) 비용 : trench loop(트렌치 작업 시 사용되는 트렌치 파이프 재료비), internal piping & insulation(내부 배관 작업 시 사용되는 파이프 재료비 및 단열 비용), fitting & valves, miscellaneous(그 외 비용), balance of system-user fefined



그림 3-5-15 초기 비용 산정 Sheet

(4) 대안별 운영비용 및 잔존가치 Sheet

운영비용 그림 3-5-16과 같이 구성되어 있으며, 앞서 정의한 바와 같이 발생하는 에너지 비용과 유지관리비(일반 관리비, 유지보수비)을 의미한다. 여기서 에너지 비용의 경우 앞서 산정된 에너지 사용비용을 가져오게 된다. 유지보수 비용의 부품 및 자체 교체 비용, 인력 투입 비용, 예비비용, 기타비용(1,2)으로 분류하여 각 항목별로 단가 및 수량을 사용자가 직접 입력할 수 있도록 하였다.

잔존가치는 설치된 설비의 초기비용을 가져와 기본 정보 Sheet에 입력된 내용연수와 그에 따라 선정된 상각률을 도입하여 산정하게 된다. 이 때 상각률은 표 3-5-24의 기준에 의해 산정된다. 또한 국내의 경우 정부 지원 및 각 사용되는 에너지원별로 별도의 지원 정책을 시행하고 있기 때문에 이에 대해 고려할 수 있도록 지원금 항목을 포함하였다.

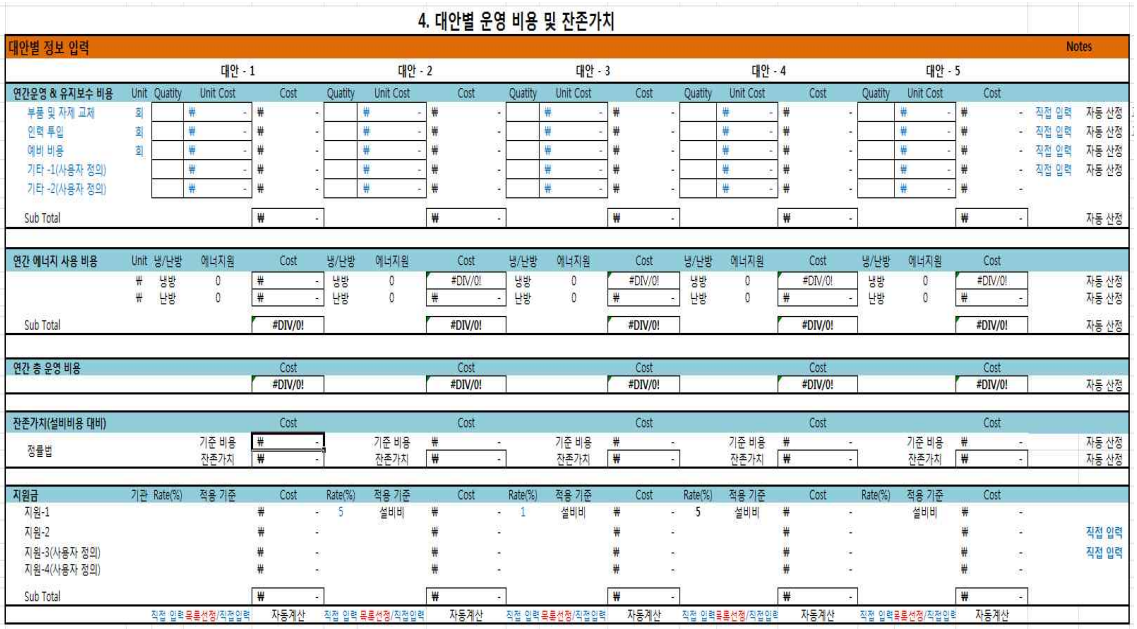


그림 3-5-16 대안별 운영비용 및 잔존가치 Sheet

표 3-5-24 감가 상각률표(법인세법 시행규칙,별표-4)

내용연수	상각률	내용연수	상각률	내용연수	상각률	내용연수	상각률	내용연수	상각률	내용연수	상각률
1	-	11	0.239	21	0.133	31	0.093	41	0.071	51	0.058
2	0.777	12	0.221	22	0.128	32	0.09	42	0.069	52	0.056
3	0.632	13	0.206	23	0.123	33	0.087	43	0.068	53	0.055
4	0.528	14	0.193	24	0.118	34	0.085	44	0.066	54	0.054
5	0.451	15	0.182	25	0.113	35	0.083	45	0.065	55	0.054
6	0.394	16	0.171	26	0.109	36	0.08	46	0.064	56	0.053
7	0.349	17	0.162	27	0.106	37	0.078	47	0.062	57	0.052
8	0.313	18	0.154	28	0.102	38	0.076	48	0.061	58	0.051
9	0.284	19	0.146	29	0.099	39	0.074	49	0.06	59	0.05
10	0.259	20	0.14	30	0.096	40	0.073	50	0.059	60	0.049

대안별 운영비용 및 잔존가치에 대한 항목별 세부 내용은 다음과 같다.

(가) 운영 유지보수

① 부품 및 자제 교체 : 시스템의 교체 주기 등을 고려한 부품 및 자체 교체 단가 및 수량을 입력
② 인력 투입 : 시스템 운영에 투입되는 인력대비 단가와 수량 입력
③ 예비비용 및 기타비용 : 앞서 언급한 두 가지 외 필요한 단가와 수량 입력

(나) 에너지 비용

시스템 설계에서 입력된 시스템 COP와 사용 에너지 단가, 운영시간, 축열조 운영여부에 따른 연간 에너지 비용을 산정된 결과를 가져온다.

(다) 잔존가치

본 연구에서는 폐기비용은 부품 및 자제 교체에서 고려되기 때문에 고려되지 않았다. 반면 잔존가치의 경우 비교적 기계 설비에 정확한 정률법을 이용하여 산정할 수 있도록 하였으며, 이때 상각률은 법인세법 시행규칙에 나와 있는 값을 기준으로 하였다(표 5.4.7).

(5) 분석 결과 Sheet

분석 결과는 그림 3-5-17과 같이 구성하였으며, 앞서 정의한 대안별 시스템의 기본 정보와 재정변수를 사용자가 본 Sheet에서 확인할 수 있도록 하였다. 또한 총 발생하는 비용에 대해서 앞서 계산된 결과를 모두 확인할 수 있도록 하였다. 이를 통해 비교 대안별로 내용연수에 따라 순현재가치로 비용을 환산하고 그 결과를 토대로 NPV, IRR, B/C Ratio, Payback을 비교하고자 하는 대안별로 도출하도록 하였으며, 이를 도식화 할 수 있도록 하였다. 이는 향후 주로 지열 경제성 분석에 주로 사용되어 왔던 기존의 경제성 분석 프로그램과 비교를 통해 적정성을 평가할 예정이다.



그림 3-5-17 분석결과 Sheet

마. 요약 및 향후 연구

본 연구 범위 내에서 실시한 국내 실정과 지열 냉난방 시스템에 특성화된 경제성 분석 Excel Program 개발 연구 결과 다음과 같은 연구 요약 및 결론을 도출하였다.

(1) 국내의 설계, 시공, 현장 조건 그리고 에너지원(전력 요금제, 도시가스 및 지역난방 요금제 등) 조건을 고려할 수 있는 경제성 분석 Module을 개발하였다.

(2) 기존 경제성 분석에서는 에너지 비용이 평균 단가(률)로 고려되었던 것에 반해 본 분석 Module에서는 전기, 도시가스, 지역난방의 용도별, 절기별, 시간별 단가를 고려하여 적용 시스템 COP를 기준으로 산정할 수 있도록 Module을 구성하였으며, 이로 인해 운전비의 정확성이 10% 정도 향상될 수 있음을 알 수 있었다.

(3) 기존의 경제성 분석 프로그램에서는 도입하지 않았던 축열시스템에 대해 분석할 수 있는 해석 Module을 개발하였다. 이는 일반적으로 야간과 주간의 에너지 비용이 다른 전기 경우에만 반영 될 수 있도록 하였으며, 이는 전력 요금 기준(최대부하, 중간부하, 경부하 비용)에 따라 운영되도록 Program을 설계하였다.

(4) 본 연구를 통해 개발된 경제성 분석 프로그램은 생애주기비용 분석에 기반을 두고 기존 설비뿐만 아니라 지중열 교환기 형태별 대안에 따른 NPV, IRR, B/C Ratio, Payback Period 등 검토하여 사용자가 시스템별 경제성을 검토 할 수 있도록 하였다.

(5) 향후 개발된 경제성 분석 프로그램과 기존 경제성 분석 프로그램의 결과를 비교 검토 하여 본 경제성 분석 프로그램의 적정성을 판단할 예정이다.

6절. 시스템 검증 및 운영 평가

지중열 시스템은 발생하는 냉·난방부하(cooling & heating load)에 따라 필요한 에너지를 공급해줌으로 경제적이며 효율적인 운영을 할 수 있다. 특히, 지중열 시스템이 완전부하 상태가 아닐 때 지중 순환회로는 보다 알맞은 온도에서 운전될 수 있기 때문에 부하효율을 높을 수 있으며, 지열히트펌프(GHP: geothermal heat pump)를 통해 생산되는 열량의 효율적 운영(축열 등)을 통해 에너지 절감효과를 이끌어 낼 수 있다. 따라서 지열시스템에 운영되는 펌프의 제어 및 열교환기 배치를 통해 효율을 효과적으로 활용해야 할 필요가 있으며, 시스템의 운영에 있어 지열히트펌프에서 냉난방 Unit 으로 바로 연결하는 방법보다는 축열조 설비 구축을 통한 전기 요금에 따른 탄력적 운영 또는 버퍼 탱크 등의 설치를 통해 히트펌프에게 치중되는 담당부하를 분산시킴으로 장비 장기적 운영과 에너지 효율을 높일 수 있다.

본 절에서는 전체 지열 시스템의 효율을 극대화하기 위해 부하에 따른 지열히트펌프와 순환펌프(circulating pump)의 운영방안에 대한 경제적 운영 방안과 Mockup2 시공을 통한 버퍼 탱크 운영에 따른 실증 시스템의 최적 운전방안 도출에 대해 다루었다. 또한 이는 운영비의 대부분을 차치하고 있는 펌프에 대한 전력 사용량을 최소화하는 방안을 마련하는 기초 연구로 설계 및 운영적 측면에 대한 고려사항들을 다루었다.

1. 경제적 운영방안 제시

가. 부하 산정의 일반 사항

시설물에 대한 냉·난방 설비의 설계는 시설물의 구조에 따른 부하량 계산에서 시작된다. 지열시스템 역시 시설물의 정확하고 상세한 부하량 계산 결과를 토대로 지열히트펌프의 용량을 결정하게 되며 이를 통해 지중열교환기(GHE: geothermal heat exchanger)의 설치 수량이 결정되게 된다.

(1) 시설물 부하의 분류

시설물의 부하는 겨울철에 실내에서 외부로 빼앗기는 열량인 난방부하와 여름철에 외부에서 실내로 유입되는 열량인 냉방부하로 볼 수 있다. 이러한 부하는 일반적으로 건축적인 요인과 설비적인 요인으로 구성되어 있다. 건축적인 요인으로는 구조체 자체의 열전도성과 같은 건물의 단열성과 틈새 바람의 양과 같은 기밀성에 의해 결정되는 냉방부하가 있고 설비적인 요인으로는 실내에 설치되어 있는 조명, TV 와 같은 발열기구와 실내에 거주하는 거주자의 인체로부터 생성되는 발열 등에 의한 냉방부하가 있다(한정상 외 2010).

(2) 부하량 산정 방법

냉·난방부하의 산정은 정해법, 간이법, 전부하 상당 운전 시간법 및 시간대대시간법 등이 있으며 이러한 방법들을 통해 다양하게 산정하여 부하량을 결정하여야 한다. 또한 난방 부하 산정 시에는 설계조건, 통과 부하, 틈새 바람 부하 및 외기부하 등을 고려해야 하며, 냉방 부하 산정 시에는 설계조건, 통과부하, 투과부하, 틈새바람 및 외기온도, 내부발열 등을 고려하여야 한다.

(3) 부하량 결정

앞에서 제시한 방법을 통해 산정된 시설물의 최대 부하는 시간별, 일간, 월간, 년간 부하량을 산출하게 되며, 이를 기준으로 지열히트펌프의 용량 및 지중열교환기를 통해 얻어야할 열량을 결정하게 된다.

나. 히트 펌프 용량 산정 및 용량별 설치

최대 부하에 따라 산정된 지열히트펌프 용량에 따라 지중열교환기 설치 조건이 결정되게 되는데 이를 좀 더 효과적이게 운영하기 위해서는 건물의 시간대별 부하를 계산하여 그에 따라 탄력적인 지열히트펌프의 설계 및 운영이 이루어져야 한다. 이 때 총 부하에 따른 지열히트펌프 용량은 실제 주로 필요한 부하량에 따른 수량을 결정하며 이에 따른 지중열교환기의 설치 zone 도 히트펌프의 용량에 따라 형성해야 그 효과가 높아질 것으로 예상된다.

다. 경제적 운영방안 예시

앞에서 언급한 지중열교환기 설치 zone 의 구분과 펌프의 운영에 대해 예를 들어 보면, 최대 냉방부하가 440.8 kW 이며 냉방 운영 시간은 24 시간 중 08 시~17 시까지인 시설물의 일일 최대 부하에 따른 운전계획이 표 3-6-1 및 그림 3-6-1 과 같다면(2013 년 설치의무화 사업 지열이용검토서, 인천국제공항공사 인재개발원), 이 때 평균적으로 사용되는 부하량을 기준으로 지열히트펌프 용량을 결정하고 그 이상의 부하에 대해서는 추가적인 지열히트펌프를 설치하여 필요에 따라 탄력적으로 운영될 수 있도록 하는 것이 적절하리라 판단된다.

이 때 평균적으로 필요로 하는 부하는 290 kW 이기 때문에 그림 3-6-2 와 같이 지열히트펌프 150 kW 용량을 2 대와 지열히트펌프 100 kW 와 50kW 용량을 설치하여 그에 따른 순환펌프와 지중열교환기 zone 을 형성하여 운영하게 되면 일반적으로 적용되는 전체 용량을 운영하는 방안에 비해 상대적으로 전력 사용량이 줄어 경제적일 것이라 판단된다.

표 3-6-1 최대부하일 냉방 운전 예시

시간	최대 냉방부하(kW)	부하지수(%)	적용부하(kW)	평균부하
0	440.8		0	
1	440.8		0	
2	440.8		0	
3	440.8		0	
4	440.8		0	
5	440.8		0	
6	440.8		0	
7	440.8		0	
8	440.8	50.0	220	290
9	440.8	55.0	242	290
10	440.8	58.0	256	290
11	440.8	61.0	269	290
12	440.8	68.0	300	290
13	440.8	87.0	384	290
14	440.8	88.0	388	290
15	440.8	75.0	331	290
16	440.8	65.0	287	290
17	440.8	50.0	220	290
18	440.8		0	
19	440.8		0	
20	440.8		0	
21	440.8		0	
22	440.8		0	
23	440.8		0	

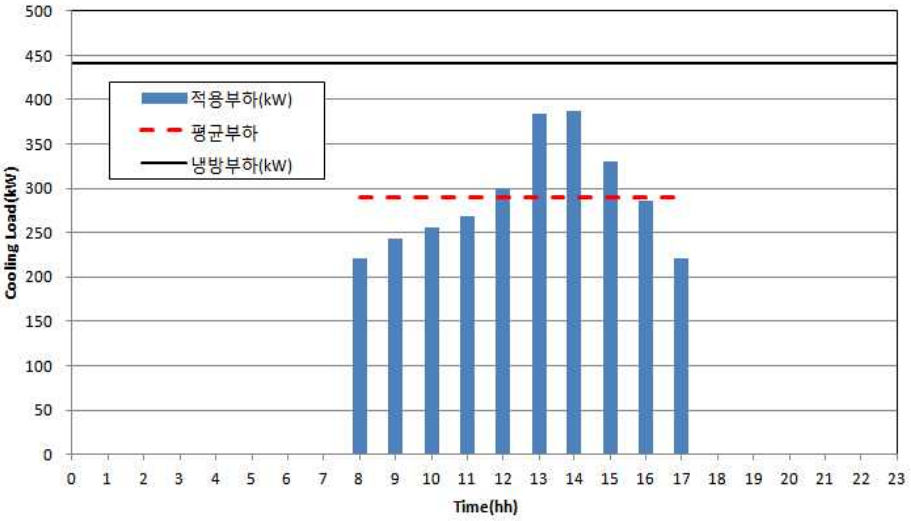


그림 3-6-1 최대부하일 냉방 운전 예시

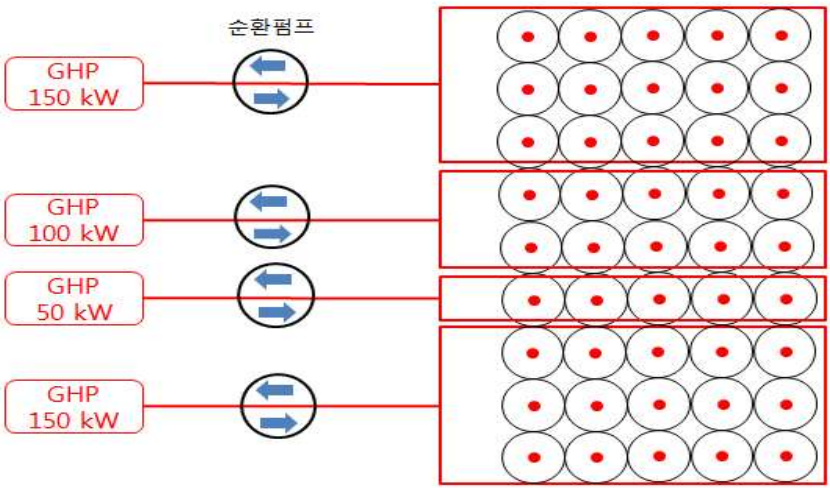


그림 3-6-2 지열히트펌프 및 지중열교환기의 Zoning 예시

또한 운영을 예를 들어보면 08 시~09 시의 경우 220~240 kW 에너지가 필요하기 때문에 150 kW 와 100 kW 의 지열히트펌프가 운영되어 전력 소비를 상대적으로 줄일 수 있으며, 2 개 150 kW 용량의 지열히트펌프가 교차 운영되면 설비의 수명도 증가될 것이라 예상된다.

모든 지열히트펌프와 순환펌프가 가동되는 전력량과 본 연구에서 제시하는 방법으로 운영되었을 때의 전략량 소비량 계산하여 보면 표 3-6-2 와 같이 1 일 기준 약 30.2%의 전력량이 절감됨을 알 수 있었다.

- GHP 소비 동력 예시 : 33.4 kW(150 kW), 21.2 kW(100 kW), 10.6 kW(50 kW)
- 순환 펌프 소비 동력 : 4.3 kW(150 kW), 3.12 kW(100 kW, 50 kW)

표 3-6-2 지열히트펌프 운영에 따른 사용 전력 비교 예시

시간	적용부하 (kW)	모든 GHP 및 순환펌프 운용 사용 전력(kW)	본연구 제시 운용		대비 전력(%)
			GHP 운영 조합	사용 전력(kW)	
8	220	113.44	150+100	62.02	54.7
9	242	113.44	150+100	62.02	54.7
10	256	113.44	150+150	75.4	66.5
11	269	113.44	150+150	75.4	66.5
12	300	113.44	150+150+50	89.12	78.6
13	384	113.44	150+150+100	100.9	88.9
14	388	113.44	150+150+100	100.9	88.9
15	331	113.44	150+150+50	89.12	78.6
16	287	113.44	150+150	75.4	66.5
17	220	113.44	150+100	62.02	54.7
Total	2,879	1,134.4		792.3	69.8

2. Mockup2 에너지 파일 시스템 구축

가. 개요

본 연구를 통해 개발 예정인 지중열 시스템 설계 프로그램(에너지 파일 포함)의 등록 및 실제 설계에서 사용하기 위해서는 에너지 관리공단의 인증이 필요하다. 이는 실제 운영 자료를 이용한 검증이 이루어져야 하기 때문에 에너지 파일의 설치와 운영 자료 확보를 위해 Mockup2를 실시하였다. 또한 실증 시스템의 최적 운영방안 도출을 위해 본 과정을 진행하였다. 이를 위해 그림 3-6-3에 위치한 인천국제공항공사 건설시험소(인천광역시 중구 운서동)에 6개의 에너지 파일과 2개의 수평형 열교환기를 그림 3-6-4와 같이 설치하였다. 설치된 공간의 상세 도면은 그림 3-6-5과 같다. 운영 시 지열 시스템의 유량, 온도, 전력량 등을 모니터링 하여 시스템의 COP등을 산정하고 이를 프로그램 검증용으로 사용할 수 있도록 하였다.



그림 3-6-3 시공 위치

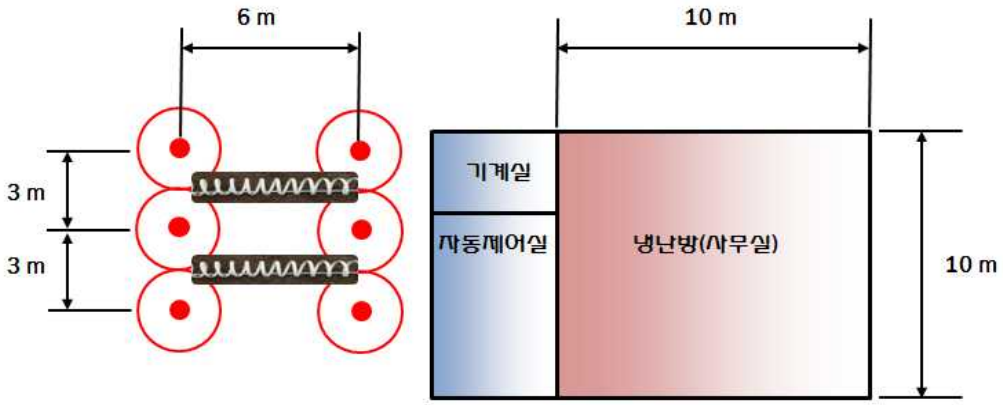


그림 3-6-4 에너지 파일 시공 도면(개략도)

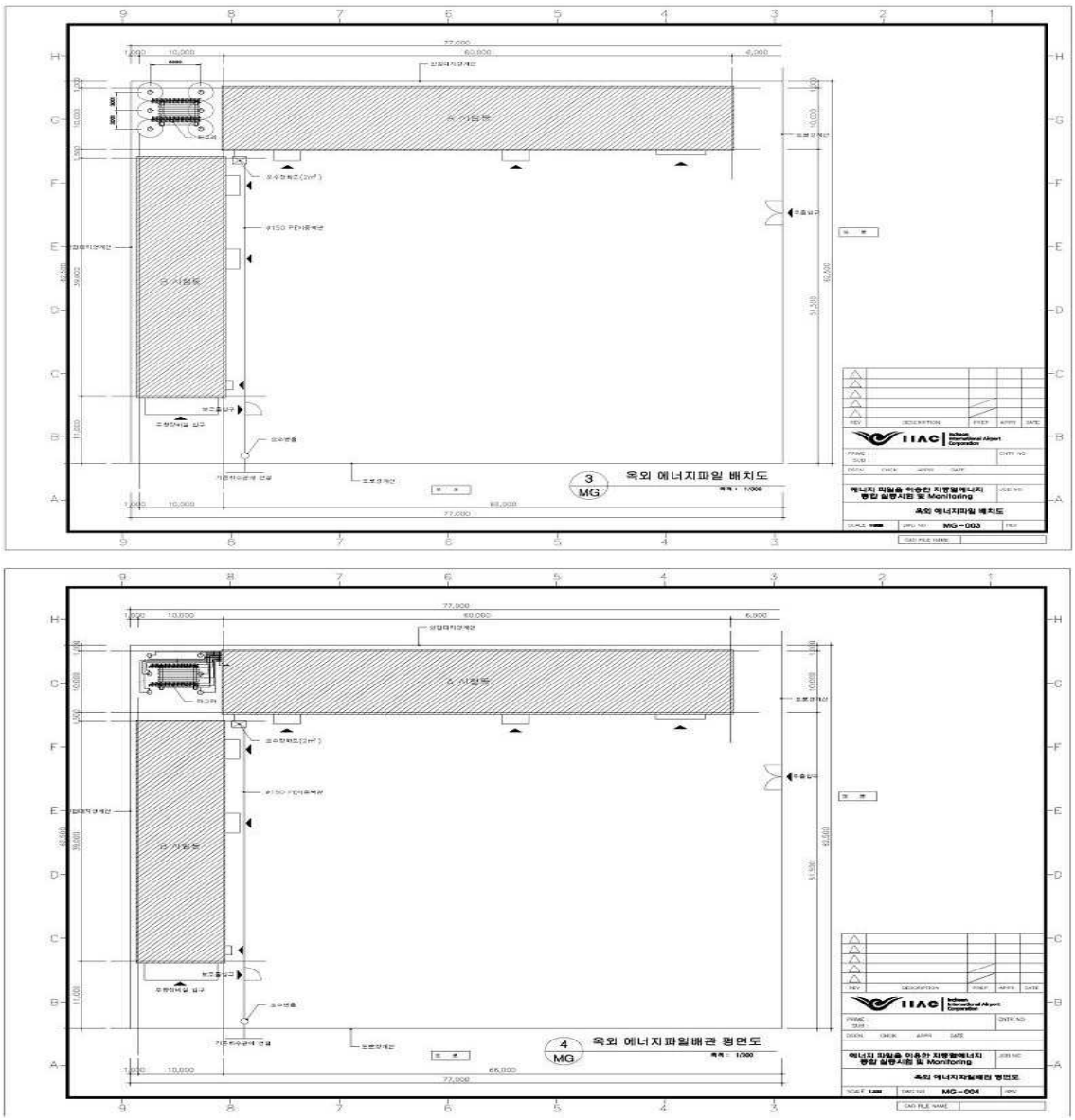


그림 3-6-5 에너지 파일 시공 도면(상세)

나. 최적운전 방안 도출을 위한 고려사항

지열시스템에서 축열조(버퍼 탱크)는 온도의 급격한 변화에 따른 설비에 무리가 가는 것을 방지하고 일부 열을 축열함으로써 시스템의 에너지 효율 향상을 위해 설치된다. 지열시스템에 버퍼 탱크가 없을 시 지열히트펌프가 직접 Fan Coil등 냉난방 Unit에 바로 연결됨에 따라 히트펌프의 가동 시간에 많은 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 에너지 파일 지열 시스템에 포함된 Buffer Tank를 운영하였을 때와 운영하지 않았을 때의 시스템 효율 비교를 통한 최적 운영방안을 도출하고자 하였다. 따라서 Buffer Tank의 유무에 따른 운영 결과 도출을 위해 2가지 대안(버퍼 탱크 운영, 버퍼 탱크 비운영(직류연결))을 비교하고자 하였다. 이를 위해 그림 3-6-6와 그림 3-6-7 같이 별도로 운영될 수 있도록 시스템을 설치 배관 배치와 운영 계획을 수립하였다. 각각의 시스템 운영 구성은 표 3-6-3과 같다. 일반적인 지열 냉난방 시스템과 동일한 형태인 지열열교환기-지열순환펌프-Heat Pump-대류순환펌프-축열조(버퍼 탱크)-냉온수 순환펌프-팬코일 유닛으로 연결되는 형태로 설치하였다.

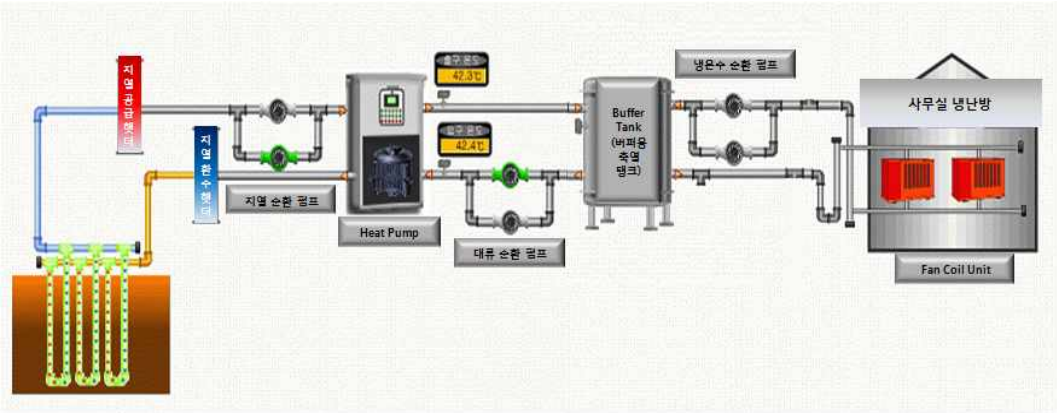


그림 3-6-6 Mockup2 축열조(Buffer-Tank) 운영 시스템

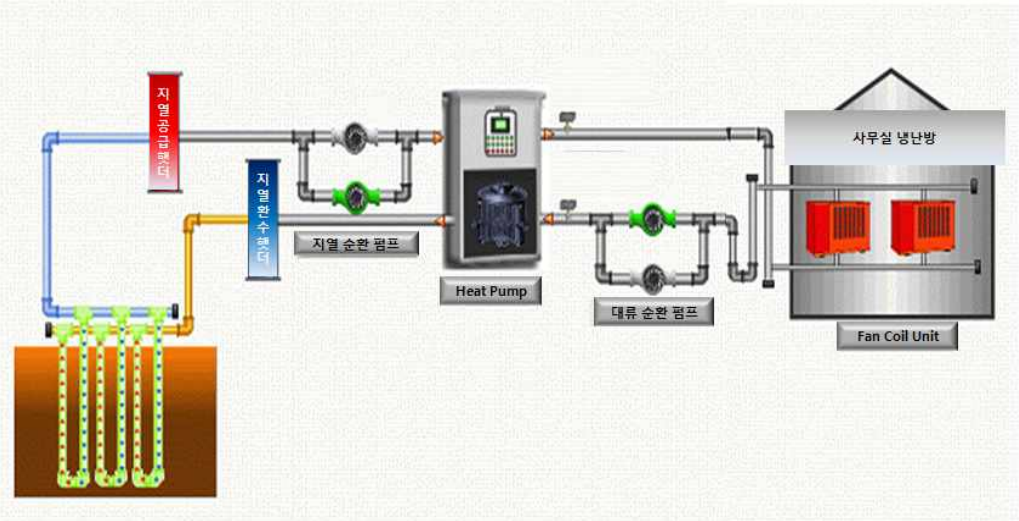


그림 3-6-7 직류 연결 운영 시스템

표 6.2.1에서 확인할 수 있듯이 직류연결의 경우 시스템 구성에서 축열조가 제외되며, Heat Pump 운전 제어는 축열조의 설정온도가 아닌 Heat Pump가 생산해 내는 온도 또는 팬코일 유닛의 설정온도에 의해 이루어진다. 각각의 시스템 운영을 진행하여 최종적으로는 전력사용량 및 COP 비교를 통해 적정 운전 대안을 제시하고자 한다.

표 3-6-3 운영방안 평가를 위한 시스템 구분

구분	시스템 구성	냉난방 제어 (Heat Pump 운전)	계측 항목	비교 항목
축열조(Buffer-Tank) 운영	지열열교환기 → 지열순환펌프 → Heat Pump → 대류순환펌프 → 축열조(버퍼 탱크) → 냉온수 순환펌프 → 팬코일 유닛	축열조 설정 온도	- 입출구 온도 - 입출구 유량 - 사용 전력량	시스템 COP
직류 연결 운영	지열열교환기 → 지열순환펌프 → Heat Pump → 대류순환펌프 → 팬코일 유닛	Heat Pump 온도 및 FCU 설정 온도	- 입출구 온도 - 입출구 유량 - 사용 전력량	

다. Mockup2 시공

Mockup2 에너지파일 시스템 설치를 위해 그림 3-6-8의 공정에 따라 2013년 11월 2일 ~ 2014년 2월 10일 동안 진행되었다.

PHC파일 항타	- PHC 규격(D500), 유압 직타, 15m 관입
⬇	
열교환기 설치, Grouting	- 지중 열교환 Pipe(Coil 형) 삽입 후 Grouting 충진, - 수평형열교환기(Coil) 설치
⬇	
트렌치 배관설치	- 수평배관 형태 - Header에 지중 열교환기 연결
⬇	
실내장비 설치 및 배관	- 지열히트펌프(5RT), 지열순환펌프, 냉, 온수 순환펌프, 대류 순환펌프, 버퍼탱크, 팽창탱크, FCU(fan coil unit), 밸브 설치
⬇	
자동제어 모니터링 설치	- 열원측 입출구 온도, 유량, 압력, 실내온도, HP(heat pump) 및 CP(circulating pump) 소비전력, HP 및 시스템 COP(coefficient of performance)

그림 3-6-8 에너지 파일 공사 공정

그림 3-6-3의 에너지 파일 설치부지에 PHC(Pretensioned spun High strength Concrete) 파일 6 본을 15 m 깊이로 항타한 후 coil 형 열교환기 설치를 설치하고, 무수축 mortar를 이용해 그라우팅(grouting)하였다. 에너지 파일형 열교환기 설치 후 트렌치 배관 작업 시 수평형 열교환기 coil형 2본을 지표면에서 1.5m 깊이에 설치하였다. 다음으로 실내 장비인 지열히트펌프(heat pump, 5RT), 순환펌프(circulating pump), 버퍼탱크(buffer tank), 팽창탱크(expansion tank) 등을 설치하고 배관 및 밸브(valve) 작업을 마무리 하였다. 마지막으로 자동제어 모니터링 프로그램 설치하고 지열이용검토서 작성을 마지막으로 모든 작업이 마무리하였다.

다. 에너지 파일 공사 세부 내용

(1) PHC 파일 항타

본 공사에 사용된 PHC 파일의 규격과 외형은 표 3-6-4와 그림 3-6-9의 (a)와 같다. 그림 3-6-9 (b)의 항타장비는 가장 긴 파일보다 최소한 3 m 더 긴 것을 박을 수 있는 장비로 유압해머를 이용하여 항타 하였다. PHC 파일 내 레이턴스는 항타를 통해 충분히 제거하였고, 항타가 완료된 모습은 그림 3-6-9의 (c)와 같다. 트랜치 작업을 고려하여 PHC 파일의 상부 끝단이 기존 노면에서 약 1 m 깊이에 위치할 수 있도록 설치하였다.

표 3-6-4 PHC 파일 규격

외경(D)	두께(t)	길이(L)	무게(W)	설계기준강도	종류
500 mm	80 mm	15 m	274 kg/m	800 kgf/㎠	A


(a) PHC 파일


(b) 항타 장비


(c) PHC 파일 항타 완료

그림 3-6-9 PHC 파일 항타

(2) 열교환기 설치

Coil형 열교환기 파이프의 규격과 외형은 표 3-6-5와 그림 3-6-10의 (a)와 같이 Coil형 파이

프와 직관 파이프를 연결하여 1 set의 지중열 교환기에 조립하였다. 조립된 지중열 교환기중 에너지 파일에는 그림 3-6-10의 (b)와 같이 PHC 파일 내부에 삽입하였고, 수평형 열교환기는 그림 3-6-10의 (c)와 같이 트랜치를 통해 기존 노면에서 약 1.5 m 깊이에 매설하였다. 이때, 에너지 파일의 coil 설치를 원활히 하기 위해 한단에 무게감 있는 추를 달아서 삽입하였다. 지중열교환기는 PHC 파일 내벽에 최대한 밀착되게 설치하였고, PB(poly butylene) 제품의 20A 배관을 사용하였으며 설치 후 압력테스트를 통해 누수여부를 확인 하였다.

표 3-6-5 Coil형 열교환기 파일 규격

재질	관경	전체 직관길이
PB(Poly Butylene)	20 A	150 m



(a) coil형 지중열교환 파이프 (b) 에너지 파일 열교환기 설치 (c) 수평형 열교환기 설치

그림 3-6-10 열교환기 설치

(3) 그라우팅(Grouting)

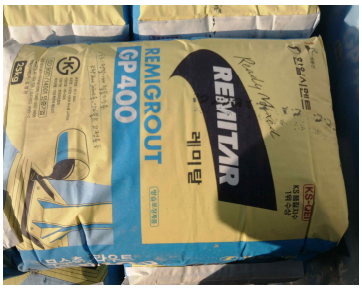
에너지 파일의 그라우팅 재료로는 무수축 mortar를 사용하였다. 물, 시멘트, 혼화재(표준사)를 표 3-6-6의 비율로 그림 3-6-11의 (a)와 같이 혼합하여 타설하였으며 타설이 완료된 모습은 그림 3-6-11의 (b)와 같고, 그림 3-6-11의 (c)는 이때 사용된 재료이다.

표 3-6-6 무수축 mortar 배합비

물	시멘트	표준사
0.5	1	2.5


(a) 무수축 mortar 혼합


(b) grouting 완료



(c) 무수축 cement

그림 3-6-11 Grouting

또한 지중열 열교환기내에 순환수 입출입을 구분하기 위해 파이프에 IN/OUT 표시를 하였다. 열교환기 상세단면은 그림 3-6-12과 같다.

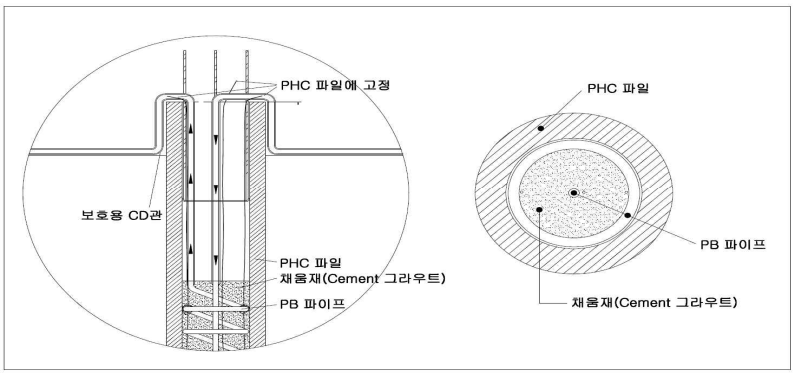
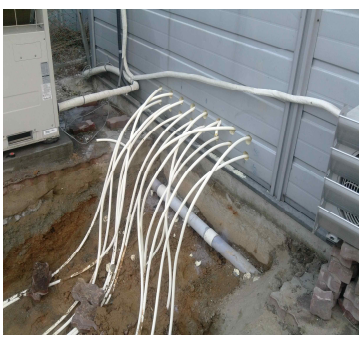


그림 3-6-12 에너지 파일 열교환기 설치 상세 단면도

(4) 트렌치(Trench) 배관

트렌치 배관은 그림 3-6-13의 (a)와 같이 수평배관으로 설치하였으며, 이를 헤더(header)에 연결하기 위해 그림 3-6-13의 (b)와 같이 배관을 기계실 쪽으로 배치하였다. 설치된 배관을 그림 3-6-13 (c)와 같이 헤더와 연결시키고, 모든 배관 내부는 flushing, purging 작업을 실시하였다.


(a) 트렌치 배관 전경


(b) 배관 배치

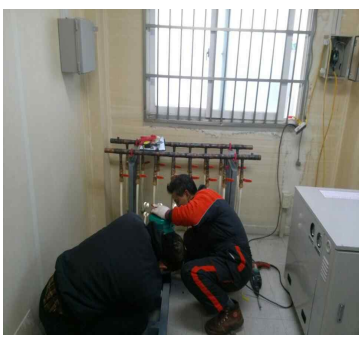

(c) 배관과 header 연결

그림 3-6-13 트렌치 배관

(5) 실내 장비 설치

기계실 내부 장비인 CP(순환펌프)와 HP(히트펌프), Buffer Tank, Expansion Tank를 그림 3-6-14의 (a)~(c)와 같이 설치하였다. 또한 기계실 및 외부의 모든 배관은 그림 3-6-15의 (a), (b)와 같이 보온처리 하였고, 기계실 내부에 그림 3-6-15의 (c)와 같이 MCC 판넬 및 제어 판넬을 설치하였다. 기계실 장비의 설치가 완료된 후 냉난방을 위한 Fan Coil Unit을 그림 3-6-16의 (a)와 같이 설치함으로써 지중열교환기의 모든 시스템의 설치가 완료되었다.



(a) Heat Pump 설치



(b) Circulating Pump 설치



(c) Buffer Tank 설치

그림 3-6-14 기계실 내부 장비 설치



(a) 외부배관 보온처리



(b) 내부배관 보온처리



(c) MCC판넬 및 제어판넬

그림 3-6-15 배관 보온처리 및 제어판넬 설치



(a) FCU 설치



(b) 기계실 설치 마무리

그림 3-6-16 FCU 설치 및 기계실 설치 마무리

(6) 자동제어 모니터링 시스템 구축

설치된 지열 시스템을 운영하고, 이에 따른 효율을 확인하기 위한 모니터링을 시스템을 그림 3-6-17과 같이 구축하였다. 계측되는 data는 열원측 입출구 온도, 유량, 압력, 실내온도, HP 및 CP 소비전력 등으로 이를 통해 적산된 결과를 통해 System COP를 표출하게 된다. 자동제어 모니터링 시스템에 대한 상세 내용은 “부록.C 자동제어 모니터링 시스템 매뉴얼”에서 다루었다. 현재 모니터링 시스템은 컴퓨터에서 실시간으로 계측 제어되고 있으나 향후에는 이를 스마트 폰으로 연동하여 스마트 폰으로 지열시스템의 가동 현황을 계측할 수 있는 방안을 검토할 예정입니다.

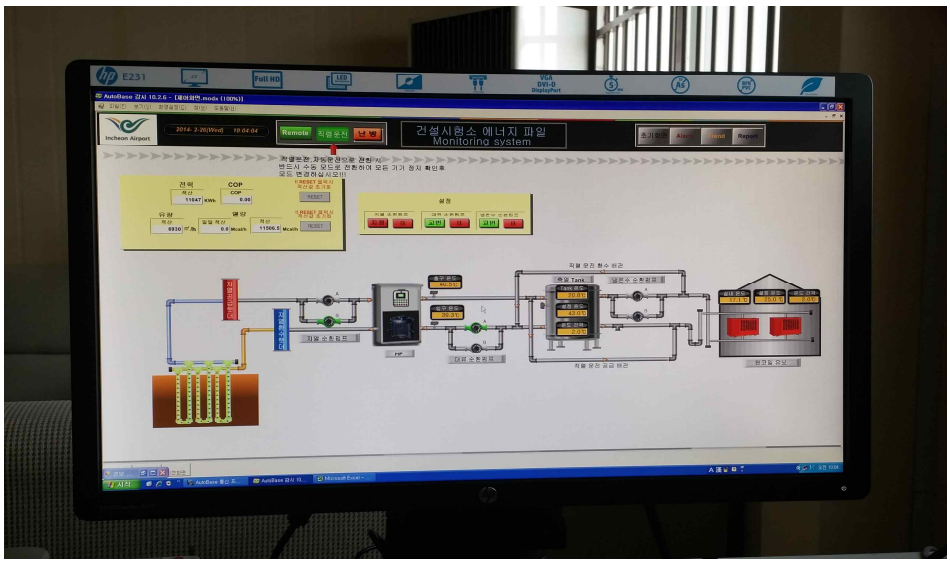


그림 3-6-17 자동제어 및 모니터링 프로그램

마. 시스템 운영 및 시운전

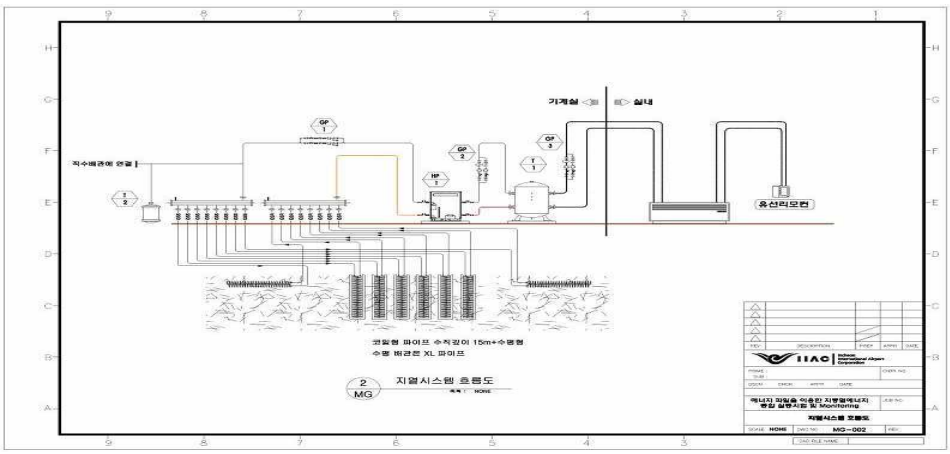


그림 3-6-18 에너지 파일형 지열시스템 흐름도

구축이 완료된 지열시스템의 전체적인 흐름도면은 그림 3-6-18과 같으며, 설치된 설비와 성

적서, 상세 도면은 “부록.D 에너지 파일형 지열 이용검토서”에 상세히 다루었다. 설치 완료된 시스템의 운영은 앞서 언급한 봐와 같이 축열조를 포함한 운영과 축열조가 없는 직류 운영 형태로 분리하여 진행하였다.

(1) 시스템 운영

에너지 파일 지열시스템의 설치 완료시기인 2월 6일 부터 시스템 시운전을 진행하여 2월 6일 ~ 10일에 걸쳐 운영 시 추가적인 필요사항에 대해 점검을 실시하였다. 초기 운영은 축열조(버퍼 탱크)를 포함하여 2월 11일부터 정상적으로 가동을 진행하였다.

(2) 시운전 Data

2014년 2월 11일에 시운전된 결과는 그림 3-6-19와 같으며 이때 시스템의 일일 평균 COP는 약 3.1정도를 보였다. 당초 2013년 11월부터 난방가동을 시작할 예정이었으나 시공 과정이 지연되어 전체적인 난방 운전 결과를 취득할 수는 없었다. 따라서 향후 2014년 냉방 및 난방 데이터를 근거로 본 연구에서 개발된 설계프로그램의 전체적인 정합성을 검증할 예정이며 향후 프로그램의 인증작업도 추진할 예정이다.

일일 보고서

자료 날짜: 2014년 2월 11일 출력 시간: 2014년 2월 17일 17:19

시간	입구 온도 ℃	출구 온도 ℃	유량 m^3/h	열량 Mcal/h	전력량 Kw/h	COP	비고
0~1시	41.6	41.2	29.0	93.0	36.0	3.0	
1~2시	38.7	38.7	43.0	135.6	55.0	2.9	
2~3시	43.6	40.0	41.0	139.1	56.0	2.9	
3~4시	39.8	39.8	31.0	95.4	38.0	2.9	
4~5시	37.7	37.8	58.0	185.6	75.0	2.9	
5~6시	42.1	41.7	28.0	94.3	38.0	2.9	
6~7시	38.9	38.7	40.0	118.4	51.0	2.7	
7~8시	43.1	39.6	47.0	160.4	63.0	3.0	
8~9시	40.3	40.4	29.0	97.4	37.0	3.1	
9~10시	38.2	37.9	34.0	103.7	38.0	3.2	
10~11시	42.9	39.6	41.0	137.9	51.0	3.1	
11~12시	41.1	41.2	24.0	78.6	29.0	3.2	
12~13시	40.2	40.0	23.0	78.0	30.0	3.0	
13~14시	39.1	39.0	23.0	76.3	28.0	3.2	
14~15시	39.4	39.2	44.0	140.0	53.0	3.1	
15~16시	42.3	41.6	23.0	76.5	29.0	3.1	
16~17시	40.1	40.1	27.0	88.8	29.0	3.6	
17~18시	38.9	38.5	25.0	83.1	28.0	3.5	
18~19시	39.8	39.5	45.0	149.2	56.0	3.1	
19~20시	42.0	41.5	25.0	83.4	32.0	3.0	
20~21시	39.7	39.5	27.0	88.4	31.0	3.3	
21~22시	37.9	37.5	54.0	180.0	66.0	3.2	
22~23시	43.0	41.7	29.0	93.0	34.0	3.2	
23~24시	39.7	39.6	27.0	89.5	33.0	3.2	
합계			817	2666	1016	74	
일일 평균 운전데이타				111,067 kcal/h	42,333 kw/h	2.6	

인천 공항 공사

그림 3-6-19 에너지 파일형 지열시스템 시운전 Data 예시(2014년 2월 11일)

3. Mockup2 시스템 최적운전방안

가. 축열시스템 개요

본 연구에서는 그림 3-6-7과 표 3-6-3과 같이 에너지파일 Mockup2 현장에 축열조 운영 시스템과 직류 연결 운영시스템에 대한 성능비교를 수행하여 시스템 최적운전방안을 도출하고자

하였다. 14년 3월 10과 14일 오전 8:00에서 저녁 12시까지 16시간 동안 축열조 시스템과 직렬 운전 시스템을 가동하여 실내온도 및 시스템 COP를 측정하였다. 그림 3-6-20은 시간별 외기온도 변화를 나타내고 있으며 그림 3-6-21은 실내온도 변화를 그림 3-6-22은 시스템 COP를 보여주고 있다. 하지만 이는 동일 조건하에서의 운전 결과가 아니기에 동일 조건하에서의 효율 비교를 위해 PSM (Propensity score matching)이라는 통계 모듈을 이용하여 실험군과 대조군의 동질성 여부를 검토하였다.

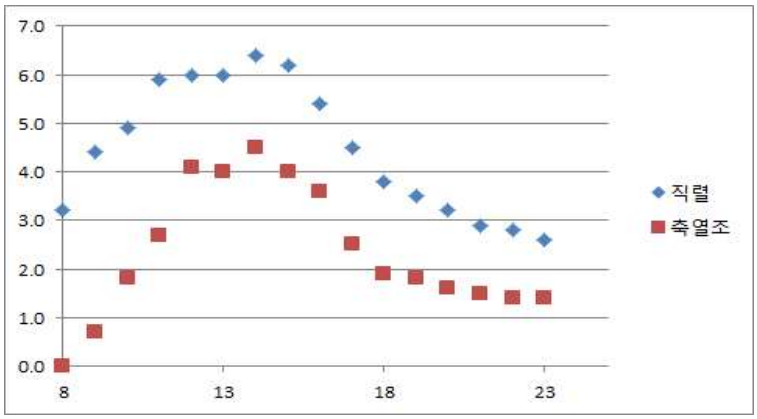


그림 3-6-20 시간대별 외기온도 변화

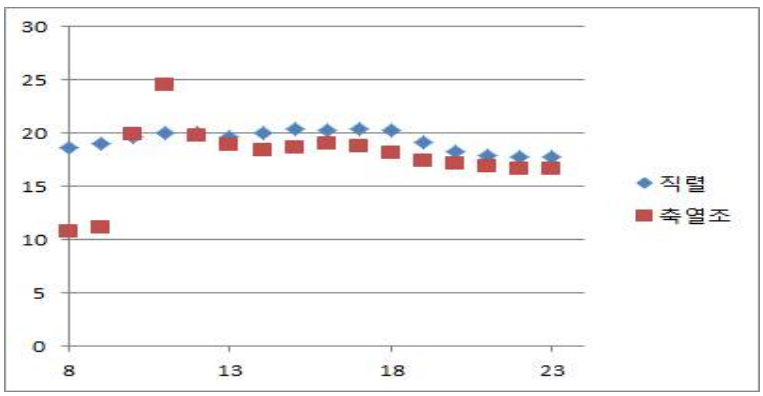


그림 3-6-21 시간대별 실내온도 변화

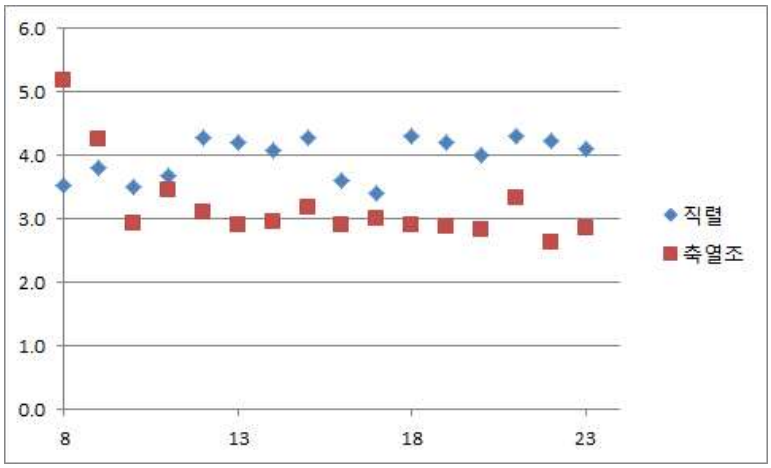


그림 3-6-22 시간대별 시스템 COP 변화

나. 운전방안 비교

(1) PSM 기법

실험 연구의 목적은 처치를 한 집단과 처치를 하지 않은 집단간에 처치에 의한 명확한 차이를 확인하는데 있다. 또한 처치 전 두 집단이 동일한 조건하에서 실험 분석이 이루어져야 하며 조건의 동질성 여부를 확인하는 것은 처치의 효과를 판단하기 앞서 반드시 거쳐야 할 과정이다. PSM(Propensity score matching) 기법은 동질성 여부를 확인하는 대표적인 방법으로 실험군과 대조군에 영향을 미치는 변수들을 통제하기 위하여 실험군에 맞는 대조군을 짝짓는 방법을 뜻한다. 식 (6.3.1)은 Propensity score(성향점수:PS)를 뜻하는 것으로써 대상자들의 관찰 가능한 특성들이 주어졌을 때 이들이 실험군이 될 조건부 확률을 뜻한다. 즉 실험군 값이 발생할 확률이 대조군과 가장 유사한 것이 실험군과 짝짓기되는 개체라고 할 수 있다(제 71차 SPSS 실습세미나, 2014).

$$\mathrm{P}ropensity\,Score = e(x_i) = \Pr(z_i = 1 | X_i = x_i) \tag{6.3.1}$$

(2) PSM 분석 결과

표 3-6-7은 2014년 3월 10과 14일 오전 8:00에서 저녁 12시까지 16시간 동안 축열조 시스템과 직렬 운전 시스템을 가동 결과를 나타낸다. 본 연구에서는 SPSS 평가판 PS matching 모듈을 이용하여 실험 결과를 분석하였다. treat 값이 0인 것은 직렬 운전 시스템을 뜻하며 treat 값이 1인 것은 축열조 운전 시스템을 뜻한다. 표 3-6-8은 PSM 기법 도입 전, 축열조 운전과 직렬 운전 결과를 그대로 비교한 결과이다. P 값이 0.05이하이며 이는 실험군과 대조군이 동일하지 않다는 것을 뜻한다. 따라서 PSM 기법을 도입하여 PS 점수가 유사한 것끼리 묶어 재분석을 수행한 결과 p 값이 0.566이 나왔으며 이는 실험군과 대조군간에 조건이 동일하다는 것을 뜻한다(표 3-6-9). 또한 그림 3-6-23에 의하면 PS matching에 의해 대조군의 PS 분포가 실험군과 유사해졌음을 알 수 있다. 따라서 외기온도와 실내온도가 거의 비슷한 시간대만 묶어서 PSM 분석을 수행하여 직렬운전과 수축열 운전에 따른 COP를 비교하였다.

표 3-6-7 PS matching을 위한 입력인자

ID	treat	외기온도	실내온도	COP
1	0	3.2	18.6	3.5
2	0	4.4	19	3.8
3	0	4.9	19.7	3.5
4	0	5.9	20	3.7
5	0	6.0	20	4.3
6	0	6.0	19.7	4.2
7	0	6.4	20	4.1
8	0	6.2	20.4	4.3
9	0	5.4	20.3	3.6
10	0	4.5	20.4	3.4
11	0	3.8	20.3	4.3
12	0	3.5	19.2	4.2
13	0	3.2	18.3	4.0
14	0	2.9	17.9	4.3
15	0	2.8	17.8	4.2
16	0	2.6	17.8	4.1
17	1	0	10.8	5.2
18	1	0.7	11.1	4.3
19	1	1.8	19.9	2.9
20	1	2.7	24.5	3.5
21	1	4.1	19.8	3.1
22	1	4	18.9	2.9
23	1	4.5	18.4	3.0
24	1	4	18.7	3.2
25	1	3.6	19	2.9
26	1	2.5	18.8	3.0
27	1	1.9	18.1	2.9
28	1	1.8	17.4	2.9
29	1	1.6	17.2	2.8
30	1	1.5	16.9	3.3
31	1	1.4	16.7	2.6
32	1	1.4	16.6	2.8

표 3-6-8 불균형 검정 통계량 (PS mathing 전)

Overall balance test (Hansen &Bowers, 2010)			
Overall	chisquare	df	p.value
	12.691	2.000	.002

표 3-6-9 불균형 검정 통계량 (PS mathing 후)

Overall balance test (Hansen &Bowers, 2010)			
Overall	chisquare	df	p.value
	1.137	2.000	0.566

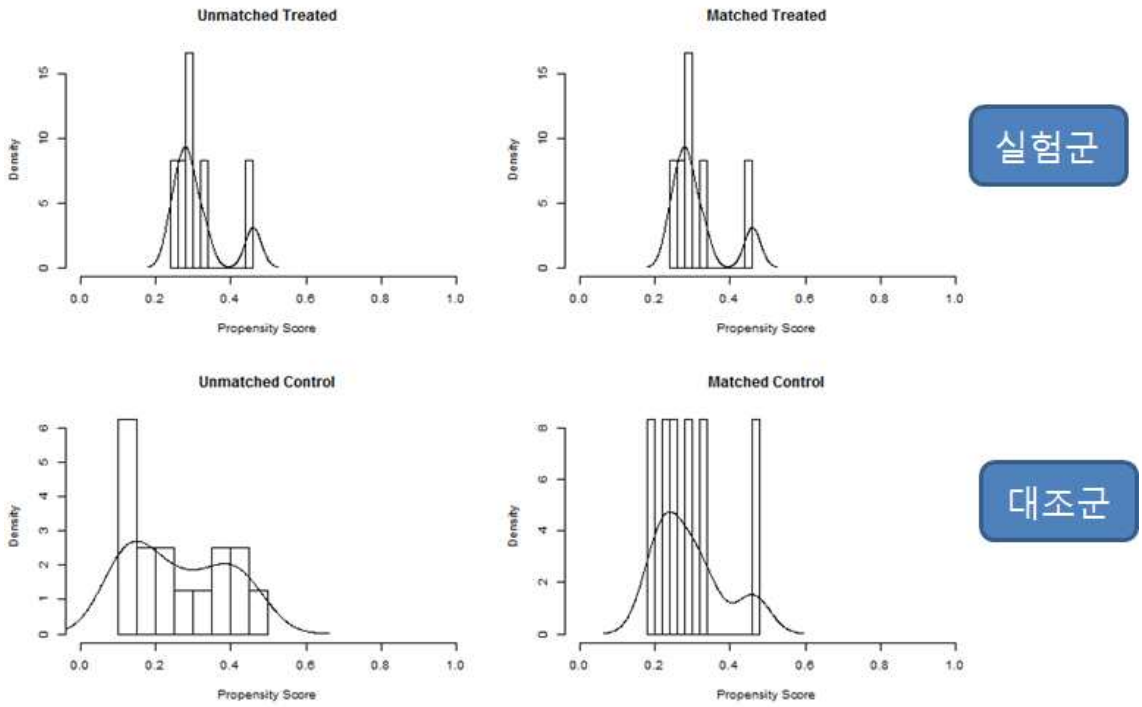


그림 3-6-23 PS matching에 따른 PS 분포

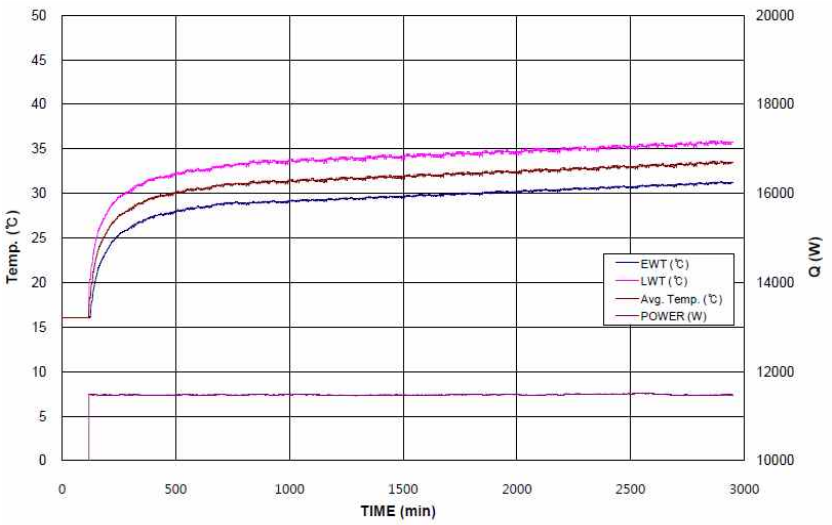
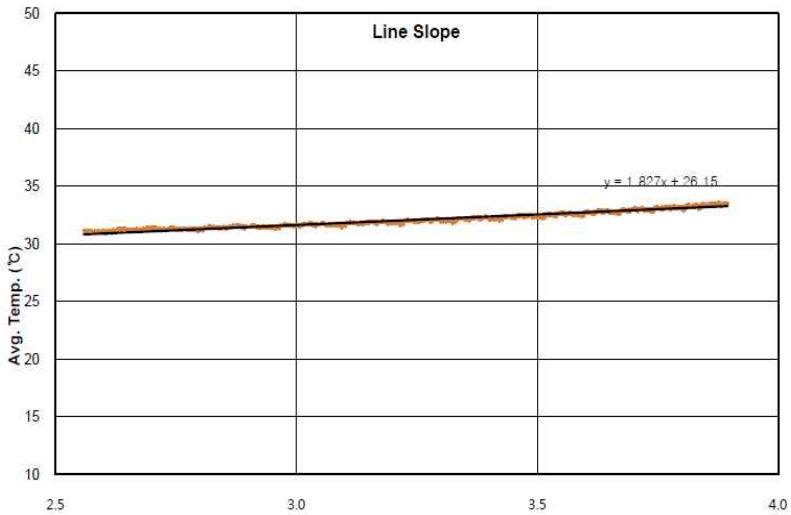
표 3-6-10 PS matching에 따른 통계량

PS matching 전				PS matching 후			
	Treat	N	평균		Treat	N	평균
COP	.00	16	3.8833	COP	.00	6	3.9688
	1.00	16	3.0167		1.00	6	3.2062

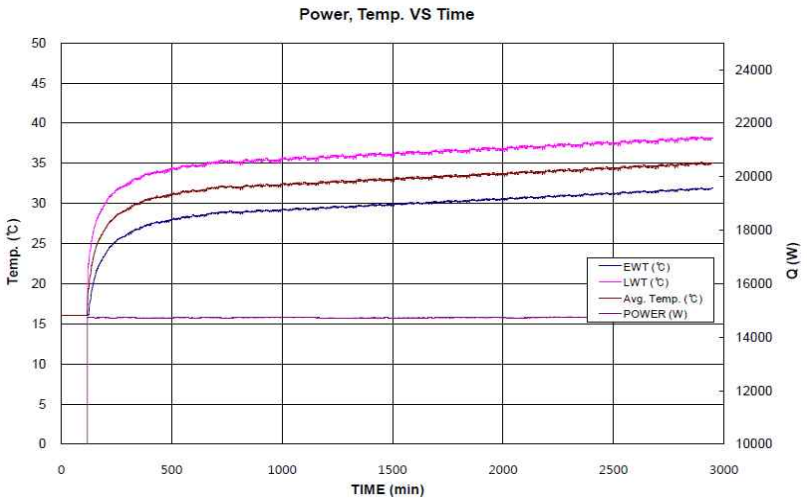
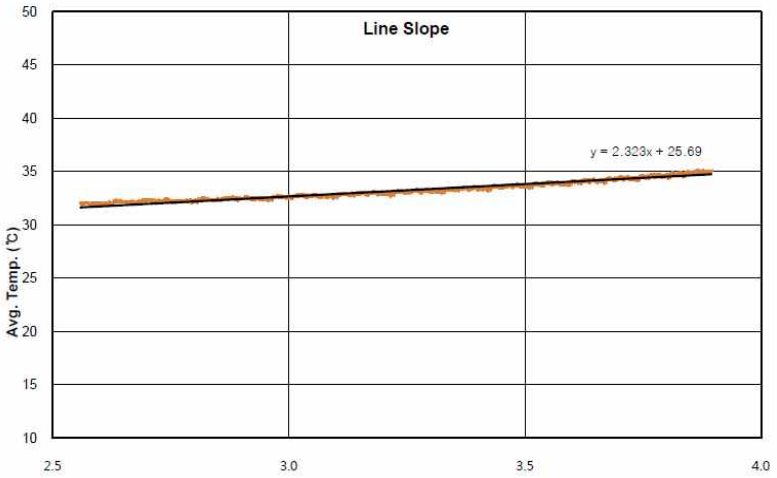
PSM 분석 결과 matching 이전과 이후의 COP는 직렬 운전이 수축열 운전보다 높게 나타났다. matching 이후 COP 차이가 감소하긴 했지만 전체적으로 직렬 운전의 COP높게 나타남을 알 수 있다. 본 축열조는 건물부하 용량에 맞게 설치된 것이 아니기에 축열의 기능보다는 버퍼 역할을 하는 것으로 판단된다. 또한 축열조를 적용할 경우 히트펌프가 간헐적으로 운전되므로 장비의 수명이 더 길어질 것으로 판단되며 축열조의 본래 기능대로 건물부하에 맞게 축열탱크의 용량을 설정한 후 심야 전력 단가를 고려하면 축열조의 효율이 더 좋을 것으로 예상된다.

부록.A 열교환기 유형별 열전도도 Test 결과

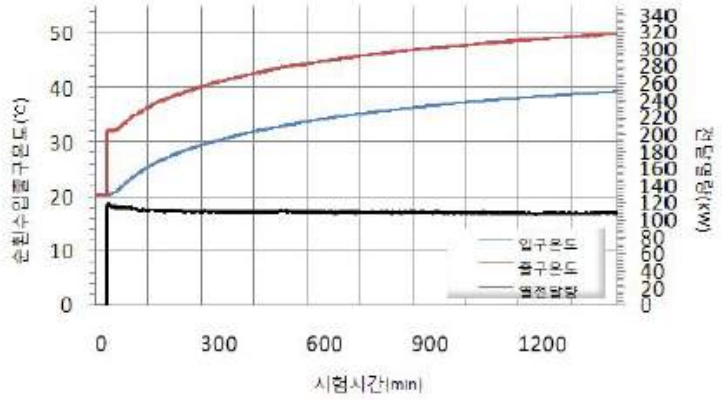
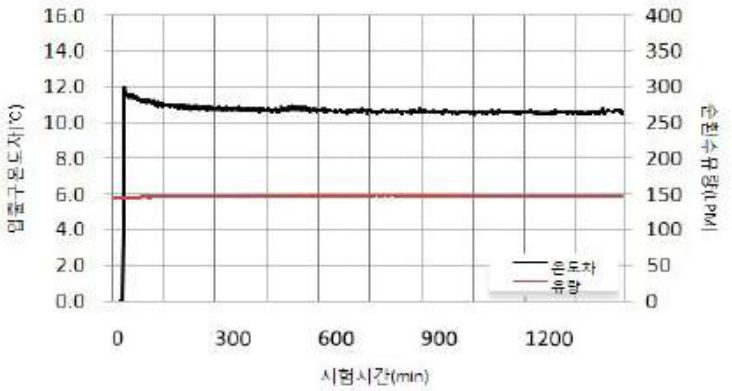
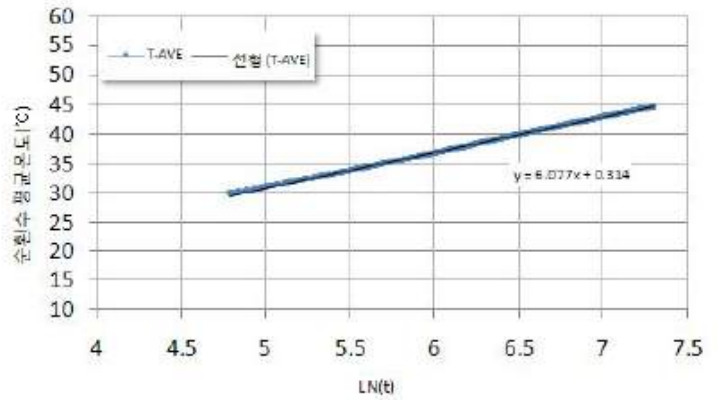
A.1 수직밀폐형(Single U-Type, 콩자갈+무수축 mortar) 열전도도 측정 결과

항목	기본값	단위
지중 초기온도	16.49	℃
투입열량	11,483	W
기울기	1.827	-
측정 Graph	 (a) 초기지중온도, 지중열교환기 순환수 온도 및 순환수 전달량  (b) 온도 시간대수에 의한 기울기	
유효 열 전도도(K)	2.43	W/(m.K)

A.2 수직밀폐형(Double U-Type) 열전도도 측정 결과

항목	기본값	단위
지중 초기온도	16.49	℃
투입열량	14,731	W
기울기	2.323	-
측정 Graph	 (a) 초기지중온도, 지중열교환기 순환수 온도 및 순환수 전달량  (b) 온도 시간대수에 의한 기울기	
유효 열 전도도(K)	2.48	W/(m.K)

A.3 함몰 방지 개방형 열전도도 측정 결과

항목	기본값	단위
지중 초기온도	20.40	℃
투입열량	109,169	W
기울기	6.078	-
측정 Graph	 (a) 초기지중온도, 지중열교환기 순환수 온도 및 순환수 전달량  (b) 순환수 순환유량 및 입.출구 온도차  (c) 온도 시간대수에 의한 기울기	
유효 열 전도도	3.34	W/(m.K)

부록.B 개방형 적용을 위한 영향성 조사

B.1 영향조사의 목적 및 조사개요

본 영향조사는 인천국제공항공사 지중열에너지 시험천공(개방형)에 의한 것이며, 조사지역의 영향조사 범위는 그림 B.1과 같이 지하수 개발 예정지를 중심으로 반경 0.5 Km 및 집수유역 면적을 설정하여 기초 수문조사 및 지질조사, 오염원 현황 조사, 우물의 산출능력을 평가하기 위한 대수성 시험 등을 실시하였다(그림 B.2).

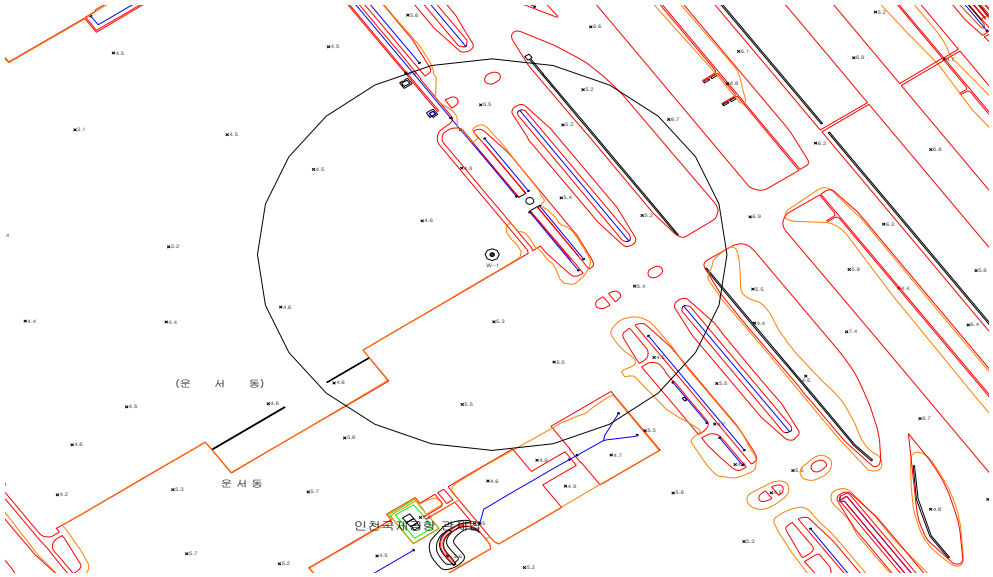


그림 B.1 지하수 영향성 조사 집수유역

B.2 수문 및 수리지질조사

조사지역 일대의 기상조사는 인천기상대의 지난 30년간의 자료를 토대로 실시한 결과 평균 강수량은 1,271.1 mm인 것으로 나타났다. 함양량 분석을 위해 산출된 유역면적은 785,000 ㎡로, 통계자료를 이용한 지하수 함양계수를 토대로 산출한 유역면적 내 평균 지하수 함양량은 399.3 ㎥/day로 조사되었다. 또한, 대권역 한강서해의 함양량 72. 8%를 적용하여 개발 가능량을 산정한 결과 290.7 ㎥/day 이다.



(a) 양수시험-자연수위측정



(b) 양수시험-단계수위측정



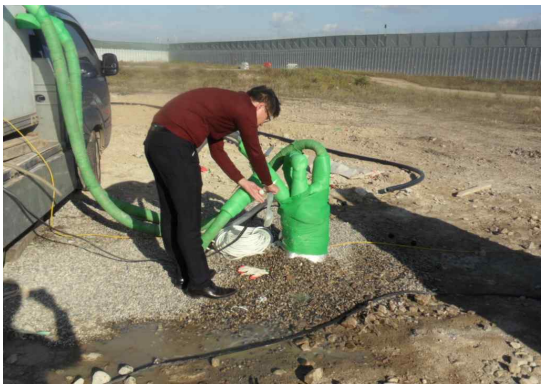
(c) 양수시험-장기수위측정



(d) 양수시험-양수량측정



(e) 양수시험-간이수질측정



(f) 양수시험-원수채수

그림 B.2 지하수 영향성 조슬 위한 양수 시험

B.3 대수성시험

적정 취수량 및 우물계수를 파악하기 위하여 자연수위 측정 후 단계양수시험을 총 4단계에 걸쳐 시행한 결과 적정 양수량은 70 ㎥/day으로 나타났으며 단계대수성시험의 결과는 표 B.1과 같다.

표 B.1 단계대수성시험 결과

구 분	적정 양수량 (㎥/day)	대수층수두 손실계수(B)	정호수두 손실계수(C)	우물효율(%)
W-1호공	70	0.45	0.00383	62.7

또한, 단계대수성시험 종료 후 장기대수성시험 결과는 표 B.2와 표 B.3과 같다.

표 B.2 장기대수성시험 결과-1

구 분	심 도 (m)	양 수 량 (㎥/day)	자연수위 (m)	안정수위 (m)
W-1호공	500	70	4.02	56.74

표 B.3 장기대수성시험 결과-2

구 분		T (㎡/day)	k (m/day)	S	적용방법
W-1호공	장기양수시험	0.656	0.0015	0.0008726	Theis
	장기양수시험	0.694	0.0015	0.0008078	Cooper & Jacob
	회 복 시 험	0.497	0.0011	-	Theis Recovery
	선택치(평균)	0.616	0.0014	0.0008402	유효우물반경 적용 : 0.93m

B.4 적정취수량 및 영향범위 분석

적정 양수량은 단계대수성시험 결과 70 ㎥/day으로 나타나 적정 취수량은 70 ㎥/day이하로 판단되며 조사공의 취수계획량이 30 ㎥/day이므로 이용하는데 문제는 없을 것으로 판단되며, 지중열을 이용한 냉·난방시설은 폐쇄시스템으로 지하수를 양수하여 지상으로 올라온 지하수를 다시 지하로 환원시켜 줌으로 이용하는데 문제는 없을 것으로 판단된다. 한편, 지하수 취수에 따라 주변으로 형성되는 포획구간은 표 B.4와 같으며 조사지역으로 하천이 흐르고 있지 않으므로 지하수개발이 인근하천에 미치는 영향은 없는 것으로 판단된다.

표 B.4 지하수 취수에 따른 포획구간

공 번	포획기간	최대반경 포획구간(m)	최소반경 포획구간(m)
W-1호공	1,825일(5년)	56.4	53.6

B.5 수질의 적정성 평가

양수시험 시 채취한 시료를 전주대학교 농식품안전연구센터에 생활용수 기준으로 수질검사 결과를 살펴본 결과 염소이온에서 생활용수 수질 기준을 초과하는 판정이 나왔다. 이는 개발된 시추공 내에 해수가 유입되는 것으로 판단되며, 본 조사지역의 특징은 지하수를 개발하여 해수를 이용한 지열공이므로 염소이온이 수질 기준을 초과하는 것은 큰 의미는 없는 것으로 판단된다. 또한, 본 지열공은 bleeding 없이 이용되므로 해수유입에 따른 주변지역의 수질오염은 발생되지 않으므로 이용하는데 문제는 없을 것으로 판단된다.

B.6 정천현황 및 잠재오염원조사

정천현황 조사결과 조사공을 제외한 조사지역내의 지하수 사용량은 없는 것으로 파악되었다. 잠재오염원은 조사결과 5년 후 포획구간 내에 특별한 오염원은 없으며, 영향반경 외부도 인천국제공항 부지 외의 특별한 오염원은 없으나 지표오염가능성에 주의를 요한다.

B.7 지하수개발・이용시설의 활용계획

본 지하수 영향조사 결과 인천광역시 중구 운서동 2868번지에 위치한 조사공을 지열공으로 이용함에 있어 오염방지시설을 철저히 하여 지표로부터 오염물질의 유입을 방지하고, 정기적으로 수위 및 유량측정과 수질검사 등을 실시하여 그 결과를 기록 후 비치하고 과도한 취수를 지양하여 돌발적인 사고를 방지할 수 있도록 하여야 할 것이다.

부록.C 자동제어 및 모니터링 시스템 메뉴얼

C.1 프로그램 사용상 유의 사항



그림 C.1 에너지 파일형 지열시스템 흐름도

(1) 감시프로그램의 컴퓨터 본체 뒤쪽의 USB슬롯에 삽입되어진 키락(KeyLock, 붉은색 USB)의 분실/훼손에 주의. 감시프로그램이 작동되지 않을 수 있음.

(2) 모니터링 프로그램의 컴퓨터에서 다른 프로그램 사용을 자제해 주기 바람. 타 프로그램의 영향이 미칠 수 있음.

(3) 컴퓨터의 이동 시 반드시 설치자 또는 담당자와 상담하시길 바람. 통신라인 또는 프로그

램에 영향을 미칠 수 있음.

(4) 컴퓨터의 오류가 발생할 시 임의대로 조작 또는 프로그램 변경이 이루어져서는 안 됨. 반드시 상담 후 조치 하도록 할 것.

(5) 모니터링 프로그램을 임의대로 조작/변경하여서는 안 됨.

(6) 모니터링 프로그램은 항상 작동 되어야 하므로 컴퓨터를 임의대로 ON/OFF 시켜서는 안 됨. 부득이하게 재부팅을 하여야 할 경우 윈도우 시작 후 바로 바탕화면의 **모니터링 프로그램 실행** 아이콘을 더블 클릭하여 실행.

(7) 초기 화면 **상단 메뉴바**(그림 C.1 붉은선)를 클릭하여 원하는 모니터링 화면으로 이동할 수 있음.

※ 감시프로그램이 꺼져있어도 자동제어에는 영향을 미치지 않으나 경보, 데이터 저장 기능이 작동되지 않음.

C.2 프로그램 운영 메뉴얼

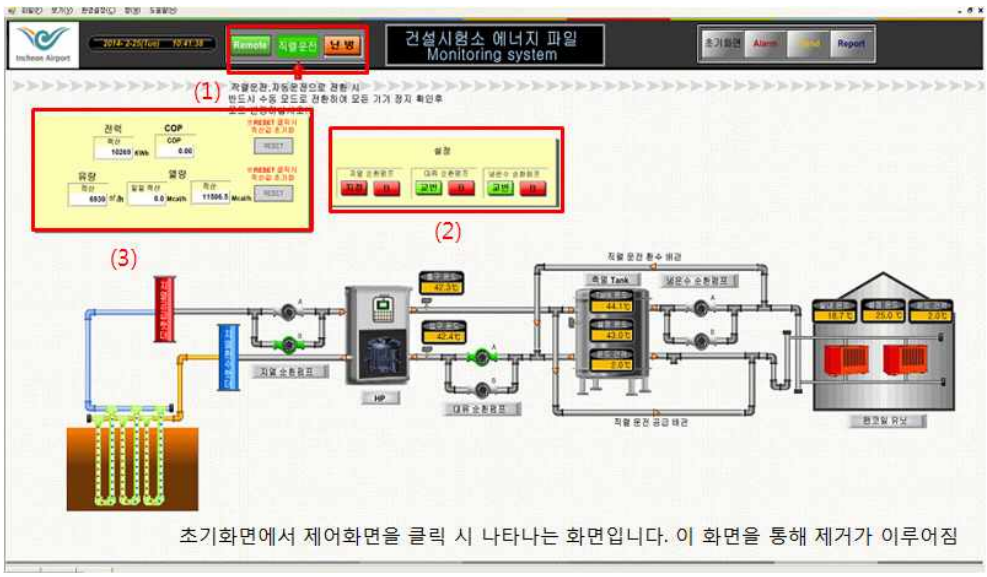


그림 C.2 모니터링 Interface

(1) 전체시스템 모드를 선택, 감시 (그림. C.2 (1)).

① REMOTE/LOCAL : 현장 PANEL 선택 스위치의 상태를 나타내며 REMOTE 상태 시에만 PC제어 가능

② 자동/수동/직렬 : 직렬 및 자동 운전 전환시 반드시 수동모드로 전환하여 모든 기계 장치를 확인 후 모드를 변경하여야 함. 자동 선택 시 각 기기는 축열조, 실내 설정온도에 의해 자동으로 ON/OFF 되며 축열조를 이용한 운영 또는 축열조와 직렬 모두를 이용하여

운영할 수 있음. 직렬 운전 시에는 실내 설정온도에 의해 자동으로 ON/OFF 되며 중간에 축열조 없이 Heat Pump에서 바로 Fan Coil로 연결하여 운영되는 것임.

- 자동 운전(축열조, 직렬 모두 운영) : 그림 C.3 제어 밸브의 1, 2, 3, 4, 5, 6의 모든 밸브를 열고 운영
- 자동 운전(축열조만을 이용한 운영) : 그림 C.3 제어 밸브의 1, 2 밸브는 잠그고, 3, 4, 5, 6 밸브를 열고 운영
- 직렬 운전(축열조 이용 없이 직렬로 운영, 실내온도 설정온도에 의한 운영) : 그림 C.3 제어 밸브의 1,2 밸브는 열고, 3, 4, 5, 6 밸브는 잠그고 운영
- 축열조 설정온도 적용기기 : 지열순환펌프, HP, 대류순환펌프
- 실내온도 설정온도 적용기기 : 냉·온수 순환펌프, 팬코일 유닛

③ 난방/냉방 : 상황에 따라 난방/냉방 전환을 할 수 있음. 전환은 사용자 명령에 따라 이루어지며, HP 운전 시에는 난방/냉방 전환을 할 수 없음.

- 난방 : 난방 운전 선택 후 자동 운전 시 기준 온도가 설정온도 보다 온도간격 만큼 낮을 때 기기가 가동되며 설정온도에 도달하면 기기 정지
- 냉방 : 냉방 운전 선택 후 자동 운전 시 기준온도가 설정온도 보다 온도간격 만큼 높을 때 기기가 가동되며 설정온도에 도달하면 기기 정지



그림 C.3 제어 밸브

(2) 각 펌프의 운전 방법을 선택, 감시 (그림 C.2 (2)).

① 교번/지정: 교번 선택시 펌프는 기동/정지 조건이 반복 될 때 번갈아 가며 동작하며, 지정 선택시 펌프는 A/B 둘 중 지정 된 것만 동작함.

(3) 전력, 유량, 열량, COP 값을 모니터링 (그림 C.2 (3)). RESET 버튼 클릭시 적산된 값이 0으로 리셋(주의)

C.3 운영 시 알람

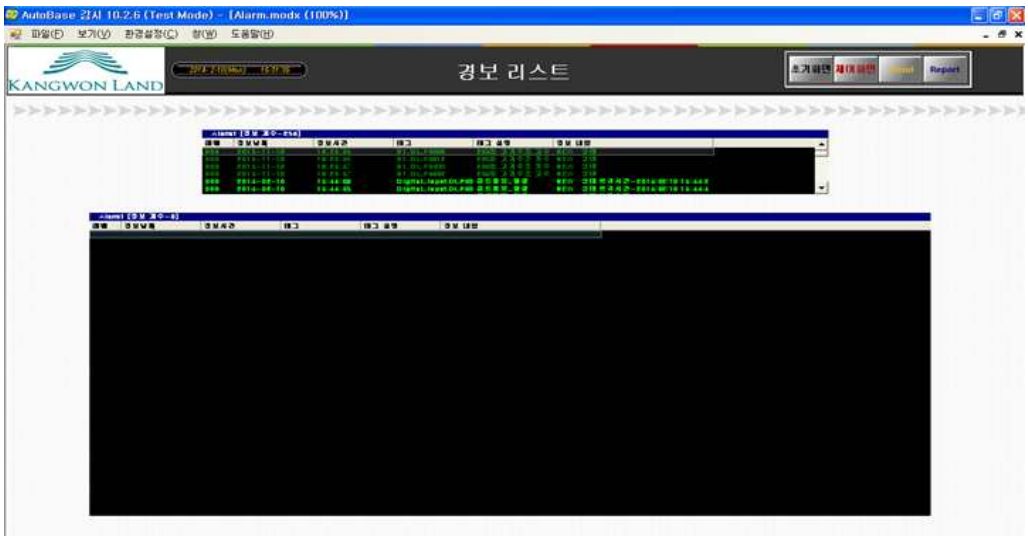


그림 C.4 경보 리스트

- 경보 리스트 화면을 통해 발생한 알람의 내역 확인. 그림 C.4의 상단에는 사용자 미확인 경보의 내용이 나타나며 해당 알람을 우클릭 시 나타나는 내용 중 알람확인 항목을 선택하면 하단의 확인경보 창으로 이동하여 상세 내용 확인

C.4 온도 Graph 표출



그림 C.5 온도 트렌드

- 그림 C.5의 화면을 통해 각 온도의 트렌드 그래프를 확인. 각 항목을 클릭하여 그래프 상 나타낼 것인지를 설정 할 수 있으며 간격시간, 시작일시를 설정 할 수 있음.

C.5 계측 Data 표출(Report)



그림 C.6 Report 표출

- 그림 C.6 Report 화면을 통해 Excel 리포트를 불러 올 수 있음. 리포트의 종류는 일보 와 월보가 있으며 일보 선택 시에는 년, 월, 일을 선택 후 월보 선택 시에는 년, 월을 선택 후 report 버튼을 클릭하면 해당 Excel 리포트를 호출. 월보의 경우 많은 데이터 연산으로 인해 호출 시간이 늦어질 수 있음.

부록 D. 에너지 파일형 지열 이용 보고서

D.1 설계 요약서

<table>
<tr><th colspan="11">지열열펌프 시스템 설계요약서(에너지파일형)</th></tr>
<tr><td>기 관 명</td><td colspan="4">인천국제공항공사</td><td>건 물 명</td><td colspan="4">건설시험소</td></tr>
<tr><td rowspan="3">열에너지
부하량 및
설치 용량</td><td></td><td colspan="3">건축물 전체
부하량(kW)</td><td colspan="3">지열 담당
부하량(kW)</td><td colspan="2">지열시스템
설치용량(kW)</td></tr>
<tr><td>냉방</td><td colspan="3">-</td><td colspan="3">-</td><td colspan="2">17.437</td></tr>
<tr><td>난방</td><td colspan="3">-</td><td colspan="3">-</td><td colspan="2">16.441</td></tr>
<tr><td rowspan="10">지열열펌프
(설계 자료)</td><td>인증 여부</td><td>○</td><td colspan="3">총 유량/총
설계용량(lpm/kW)</td><td colspan="4">3.44</td></tr>
<tr><td rowspan="4">냉방</td><td colspan="2">설계용량(kW) x
수량</td><td>COPc</td><td colspan="2">열원측</td><td colspan="2">부하측</td></tr>
<tr><td>EWT
(℃)</td><td>유량
(lpm)</td><td>EWT
(℃)</td><td>유량
(lpm)</td></tr>
<tr><td colspan="2">17.437 × 1(물-물)</td><td>3.47</td><td>30</td><td>60</td><td>12</td><td>60</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="4">난방</td><td colspan="2">설계용량(kW) x
수량</td><td>COPh</td><td colspan="2">열원측</td><td colspan="2">부하측</td></tr>
<tr><td>EWT
(℃)</td><td>유량
(lpm)</td><td>EWT
(℃)</td><td>유량
(lpm)</td></tr>
<tr><td colspan="2">16.441 × 1(물-물)</td><td>3.81</td><td>5</td><td>60</td><td>40</td><td>60</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">보어홀</td><td>보어홀깊이(m)
x 수량</td><td colspan="3">15 m × 6</td><td>총 보어홀
길이(m)</td><td colspan="3">90 m</td></tr>
<tr><td>최소 보어홀
간격(m)</td><td colspan="3">3</td><td>지중열교환
기 방식</td><td colspan="3">에너지파일형(coil)</td></tr>
<tr><td>보어홀 직경(mm)</td><td colspan="3">500</td><td>파이프
규격</td><td colspan="3">PB, 20A</td></tr>
</table>

지열열펌프 시스템 설계요약서(에너지파일형)						
배관	트랜치 배관 깊이	1.0		기계실 배관 재질	동관	
그라우팅	종류	무수축 시멘트		혼합비율(%) (물:시멘트:표준사)	12.5 : 25.0 : 62.5	
지중 순환수	종류	물		혼합비율(%)	-	
	비중	0.969		동결온도(℃)	-	
보온재	재질	고무발포		두께(mm)	19T	
순환펌프	총소비전력/열펌프 총설계용량(kW/kW)			0.50		
	형식	정격용량 (kW)	소비전력 (kW)	유량(lpm) x 수량 (예비펌프 여부)	양정(m)	비고
	인라인 (지열순환)	2.2	2.2	60 × 2(예비1)	26	
	인라인 (냉온수순환)	1.1	1.1	60 × 2(예비1)	15	
	인라인 (대류순환)	0.55	0.55	50 × 2(예비1)	10	
팽창 탱크	형식	용량(l) x 수량		재질		
	밀폐형 브레더식	60 × 1		SS 400		
버퍼 탱크	형식	용량(l) x 수량		재질		
	밀폐형	600 × 1		STS 304		
타열원의 백업 여부	냉·난방기(전기)					
모니터링 계획	당 현장은 자동제어 계측기중에서 지열 MCC반 전기인입에 전력량계, 지중측 공급 및 환수 배관에 유량계와 온도센서의 DATA값을 받아 모니터링 합니다.					
참고 사항						

D.2 주요자재 설치 사양서

<table>
<tr><th colspan="11">주요자재 설치사양(수직밀폐형)</th></tr>
<tr><td>기관명</td><td colspan="4">인천국제공항공사</td><td>건물명</td><td colspan="4">건설시험소</td></tr>
<tr><td>설치용량(kW)</td><td>냉방</td><td colspan="2">17.437</td><td>난방</td><td colspan="2">16.441</td><td>급탕</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td rowspan="8">지열열펌프</td><td rowspan="4">냉방</td><td colspan="2">정미능력(kW) x 수량</td><td colspan="2">COPc</td><td colspan="2">유량(lpm)</td><td colspan="3">열원측 / 부하측</td></tr>
<tr><td colspan="2">17.437 × 1
(열원 EWT 30℃)</td><td colspan="2">3.47</td><td colspan="2">60</td><td colspan="3">60</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td rowspan="4">난방</td><td colspan="2">정미능력(kW) x 수량</td><td colspan="2">COPh</td><td colspan="2">유량(lpm)</td><td colspan="3">열원측 / 부하측</td></tr>
<tr><td colspan="2">16.441 × 1
(열원 EWT 5℃)</td><td colspan="2">3.81</td><td colspan="2">60</td><td colspan="3">60</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td rowspan="3">보어홀</td><td>보어홀깊이x수량</td><td colspan="9">15 m × 6</td></tr>
<tr><td>최소보어홀간격</td><td colspan="3">3 m</td><td>열교환기방식</td><td colspan="4">에너지파일형(coil)</td></tr>
<tr><td>천공 직경(mm)</td><td colspan="3">150</td><td>파이프 규격</td><td colspan="4">PB, 20A</td></tr>
<tr><td>배관</td><td>트랜치배관깊이</td><td colspan="3">1.0</td><td>기계실배관재질</td><td colspan="4">동관</td></tr>
<tr><td>그라우팅</td><td>종류</td><td colspan="3">물 : 시멘트 : 표준사</td><td>혼합비율(%)</td><td colspan="4">12.5 : 25 : 62.5</td></tr>
<tr><td>보온재</td><td>재질</td><td colspan="3">고무발포</td><td>두께(mm)</td><td colspan="4">19T</td></tr>
<tr><td>지중 순환수</td><td>종류</td><td>물</td><td colspan="2">혼합비율(%)</td><td>-</td><td>비중</td><td colspan="3">0.969</td></tr>
<tr><td rowspan="4">순환펌프</td><td>형식</td><td>정격용량 (kW)</td><td>소비전력 (kW)</td><td colspan="3">유량(lpm) x 수량 (예비펌프 여부)</td><td>양정 (m)</td><td colspan="2">비 고</td></tr>
<tr><td>인라인 (지열순환)</td><td>2.2</td><td>2.2</td><td colspan="3">60 × 2(예비1)</td><td>26</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>인라인 (냉온수순환)</td><td>1.1</td><td>1.1</td><td colspan="3">60 × 2(예비1)</td><td>15</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>인라인 (대류순환)</td><td>0.55</td><td>0.55</td><td colspan="3">50 × 2(예비1)</td><td>10</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">팽창 탱크</td><td>형식</td><td colspan="4">용량(l) x 수량</td><td colspan="5">재질</td></tr>
<tr><td>밀폐형 브레더식</td><td colspan="4">60Lit × 1대</td><td colspan="5">SS 400</td></tr>
<tr><td rowspan="2">버퍼 탱크</td><td>형식</td><td colspan="4">용량(l) x 수량</td><td colspan="5">재질</td></tr>
<tr><td>밀폐형</td><td colspan="4">600Lit × 1대</td><td colspan="5">STS 304</td></tr>
</table>

D.3 성능 예측표

(1) 난방

<지열히트펌프 포인트별 성능특성 실험>

GSKE-005R												
HEATING LOAD-EWT												
SOURCE-EWT	40 ℃				42.5 ℃				45 ℃			
	유량(ℓ/s)	난방열(W)	소비전력(W)	COP	유량(ℓ/s)	난방열(W)	소비전력(W)	COP	유량(ℓ/s)	난방열(W)	소비전력(W)	COP
5 ℃	1.00	17437	6023	3.47	1.00	17013	6276	3.22	1.00	16688	6629	3.00
6 ℃	1.00	17944	6046	3.66	1.00	17537	6300	3.31	1.00	17130	6565	3.08
7 ℃	1.00	18460	6068	3.64	1.00	18061	6325	3.39	1.00	17672	6581	3.17
8 ℃	1.00	18967	6091	3.72	1.00	18686	6349	3.47	1.00	18214	6607	3.26
9 ℃	1.00	19483	6114	3.81	1.00	19110	6373	3.56	1.00	18756	6633	3.33
10 ℃	1.00	19970	6137	3.89	1.00	19634	6398	3.64	1.00	19298	6659	3.41
11 ℃	1.00	20477	6159	3.97	1.00	20168	6422	3.72	1.00	19839	6684	3.49
12 ℃	1.00	20983	6182	4.05	1.00	20682	6446	3.80	1.00	20381	6710	3.67
13 ℃	1.00	21490	6205	4.13	1.00	21207	6470	3.88	1.00	20923	6736	3.66
14 ℃	1.00	21996	6227	4.21	1.00	21731	6495	3.95	1.00	21465	6762	3.73
15 ℃	1.00	22503	6250	4.29	1.00	22255	6519	4.03	1.00	22007	6788	3.80
	A1 = 506.6		A2 = 22.7		A1 = 524.26		A2 = 24.3		A1 = 541.9		A2 = 25.9	
	B1 = 14904		B2 = 4909.6		B1 = 14391.26		B2 = 5164.5		B1 = 13878.6		B2 = 5399.5	

난방열(KW) = A1*SOURCE EWT(℃)+B1 , 소비전력(KW) = A2*SOURCE EWT(℃)+B2

난방성능계산(붉은 글씨만 입력)

LOAD EWT(℃)	난방열(W)	소비전력(W)	COP	난방계수	전력계수
40 ℃	17437	6023	3.47	-169.8	101.2
45 ℃	16688	6629	3.00	24229	975

SOURCE EWT(℃)	LOAD EWT(℃)	LOAD LLT(℃)	난방열(W)	소비전력(W)	COP
5 ℃	40 ℃	44.2	17,437	6,023	3.47

(2) 냉방

GSKE-005R												
COOLING LOAD-EWT												
SOURCE-EWT	10 ℃				11 ℃				12 ℃			
	유량(ℓ/s)	냉방열(W)	소비전력(W)	COP	유량(ℓ/s)	냉방열(W)	소비전력(W)	COP	유량(ℓ/s)	냉방열(W)	소비전력(W)	COP
25 ℃	1.00	16059	3831	4.19	1.00	16791	3903	4.30	1.00	17522	3975	4.41
26 ℃	1.00	15860	3913	4.05	1.00	16583	3978	4.17	1.00	17306	4043	4.28
27 ℃	1.00	15662	3994	3.92	1.00	16376	4053	4.04	1.00	17089	4111	4.16
28 ℃	1.00	15463	4076	3.79	1.00	16168	4127	3.92	1.00	16873	4179	4.04
29 ℃	1.00	15264	4157	3.67	1.00	15961	4202	3.80	1.00	16657	4247	3.92
30 ℃	1.00	15065	4239	3.55	1.00	15753	4277	3.68	1.00	16441	4315	3.81
31 ℃	1.00	14867	4320	3.44	1.00	15546	4352	3.57	1.00	16224	4383	3.70
32 ℃	1.00	14668	4402	3.33	1.00	15338	4427	3.47	1.00	16008	4451	3.60
	A1 = -198.7142857		A2 = 81.67142857		A1 = -207.6		A2 = 74.78571429		A1 = -216.2857143		A2 = 68	
	B1 = 21026.85714		B2 = 1791.714286		B1 = 21978		B2 = 2033.4		B1 = 22929.14286		B2 = 2276	

냉방열(KW) = A1*SOURCE EWT(℃)+B1 , 소비전력(KW) = A2*SOURCE EWT(℃)+B2

냉방성능계산(붉은 글씨만 입력)

LOAD EWT(℃)	냉방열(W)	소비전력(W)	COP	냉방계수	전력계수
10	16066.42857	4238.857143	3.55	687.5714286	38.07142857
12	16440.57143	4315	3.81	8189.714286	3868.142857

SOURCE EWT(℃)	LOAD EWT(℃)	LOAD LLT(℃)	냉방열(W)	소비전력(W)	COP
30 ℃	12 ℃	8.1	16,441	4,315	3.81

D.4 지열 열펌프 인증서 및 시험성적서

시 험 성 적 서
TEST REPORT

성적서번호 Test No.	KRAAC-B-10-066	페이지 (1)/(총7) (1)/(7)pages

1. 의뢰인 (Client)

기업명	신성엔지니어링	대표자	박대휘
사업자등록번호	107-81-41621	E-mail	kwonhh@ishinsung.com
대표 전화번호	041-537-7400	담당 전화번호	041-537-7413
의뢰일자	2010년 10월 20일		
주소	충남 아산시 탕정면 동산리 1번지		

2. 시험성적서의 용도 (Use of Report) : 성능특성시험

3. 시료 (Test Sample)

시험품명	물-물 지열 열펌프유니트	용량	17 500 W
모델명	GSKE-005R	제조사	신성엔지니어링
제조번호	10-000001-HVGSH	제조일자	2010년 10월 1일

4. 시험기간 (Period of Test) : 2010년 10월 24일, 11월 15일 ~ 11월 16일

5. 시험방법 (Test method used) : 에너지관리공단 운영규정(NR GT 101 : 2009)

6. 시험환경 (Testing Environment) : 온도 (20 ~ 31) ℃, 상대습도 (24 ~ 50) %R.H.

7. 시험결과 (Testing Results) : 별첨 참조

위 의뢰인으로부터 제공된 시료에 대하여 시행한 시험성적서임을 증명함.
This is to certify that the sample submitted by client above has tested.
※ 이 시험성적서는 용도 이외의 사용을 금함.
This report should only be used for the purpose of use above.
※ 이 시험성적서의 사본은 무효임.
The copy of this test reports is invalid for use.

확 인	작성자 (Tested by)	승인자 (Technical Manager)
	성 명 : 최 연 성 (서명)	직 위 : 기술책임자 성 명 : 최 충 현 (서명)

2010년 11월 23일

한 국 냉 동 공 조 인 증 센 터 이 사 장

KOREA REFRIGERATION & AIR-CONDITIONING ASSESSMENT CENTER
경기도 안산시 상록구 사동 1271-11 경기테크노파크 113호
TEL:031-500-3820 FAX:031-500-3825 www.kraac.or.kr

KRAAC-TP-5101-01(06)

시 험 결 과
TEST RESULT

성적서번호 Test No.	KRAAC-B-10-066	페이지 (2)/(총7) (2)/(7)pages

1. 일반사항

표 1. 제품 일반 사양

구분	규격	구분	크기	
용량	17 500 W	외형 크기	폭	480 mm
중량	165 kg		너비	600 mm
순환수 배관경	25 A		높이	1 225 mm
냉매	R-410A	공급 전원	3상 3선 60 Hz 380 V	

표 2. 부품 사양

구분	형식	수량	모델	제조사(국명)	세부사양
Compressor	Scroll	1	ZP61KCE-TF7-497	COPELAND (Thailand)	17 100 W x 1 EA
Heat exchanger	Plate	3	B25THx40/1R-SC-S	SWEP (Malaysia)	21 000 W x 3 EA
4-Way V/V	Electronic	1	STF-0401G	SAGINOMIYA (China)	23 800 W x 1 EA
Expansion V/V	Thermostatic	1	TGEL-6.5	DANFOSS (China)	21 570 W x 1 EA

시 험 결 과
TEST RESULT

성적서번호 Test No.	KRAAC-B-10-066	페이지 (3)/(총7) (3)/(7)pages

2. 시험 조건

표 3. 냉방용량 산정을 위한 시험 조건

시험 항목	부하 측 순환수의 열펌프 유입온도 ℃	열원 측 순환수의 열펌프 유입온도 ℃	부하 측 순환수량 L/s	열원 측 순환수량 L/s
시험-1	10	25	1.00	1.00
시험-2	10	32	1.00	1.00
시험-3	12	15	1.00	1.00
시험-4	12	25	1.00	1.00
시험-5	12	32	1.00	1.00

표 4. 난방용량 산정을 위한 시험 조건

시험 항목	부하 측 순환수의 열펌프 유입온도 ℃	열원 측 순환수의 열펌프 유입온도 ℃	부하 측 순환수량 L/s	열원 측 순환수량 L/s
시험-1	40	5	1.00	1.00
시험-2	40	15	1.00	1.00
시험-3	45	5	1.00	1.00
시험-4	45	15	1.00	1.00

3. 시험 방법

3.1 시험방법은 NR GT 101 "물-물 지열 열펌프 유니트 설비심사기준"을 적용하여 시험함.

3.2 능력에 영향을 주는 개조나 접속을 하지 않고, 냉매 충전량은 제조자가 지정하는 냉매량을 충전하여 시험함.

3.3 컨트롤은 최대 능력상태로 설정하고, 시험조건이 평형상태에 도달한 후 5분 간격으로 7회 측정하여 35분 동안 데이터를 평균값으로 산출함.

시 험 결 과
TEST RESULT

성적서번호 Test No.	KRAAC-B-10-066	페이지 (4)/(총7) (4)/(7)pages

4. 시험 결과

표 5. 냉방용량 시험 결과

시험 항목		단위	시험 결과
시험-1	정미 냉방능력	W	16 059
	유효 전력	W	3 831
	EER	W/W	4.19
시험-2	정미 냉방능력	W	14 668
	유효 전력	W	4 402
	EER	W/W	3.34
시험-3	정미 냉방능력	W	19 372
	유효 전력	W	3 379
	EER	W/W	5.73
시험-4	정미 냉방능력	W	17 522
	유효 전력	W	3 975
	EER	W/W	4.41
시험-5	정미 냉방능력	W	16 008
	유효 전력	W	4 451
	EER	W/W	3.60

표 6. 난방용량 시험 결과

시험 항목		단위	시험 결과
시험-1	정미 난방능력	W	17 437
	유효 전력	W	5 023
	COP	W/W	3.47
시험-2	정미 난방능력	W	22 503
	유효 전력	W	5 250
	COP	W/W	4.29
시험-3	정미 난방능력	W	16 588
	유효 전력	W	5 529
	COP	W/W	3.00
시험-4	정미 난방능력	W	22 007
	유효 전력	W	5 788
	COP	W/W	3.81

시 험 결 과
TEST RESULT

성적서번호 Test No.	KRAAC-B-10-066	페이지 (5)/(총7) (5)/(7)pages

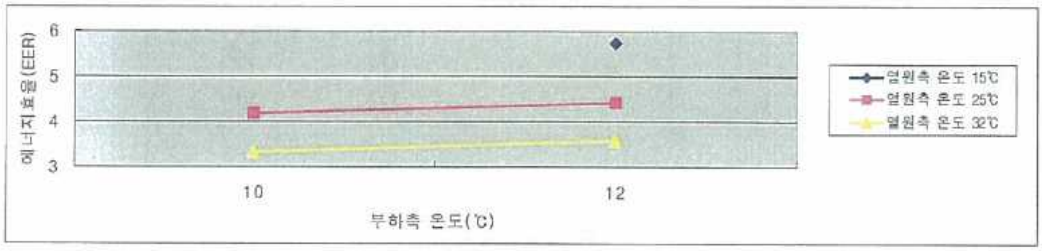


그림 1. 부하측 온도에 따른 성능변화(냉방시험)

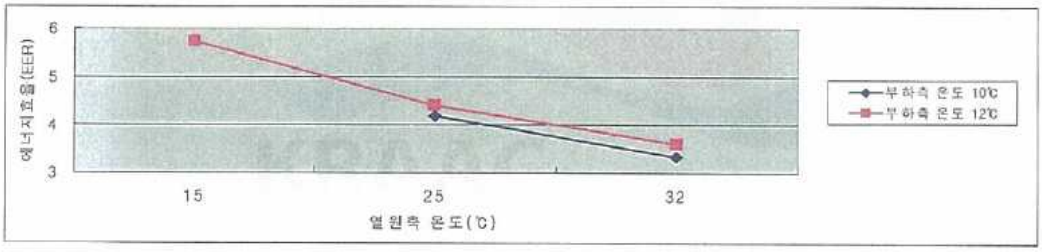


그림 2. 열원측 온도에 따른 성능변화(냉방시험)

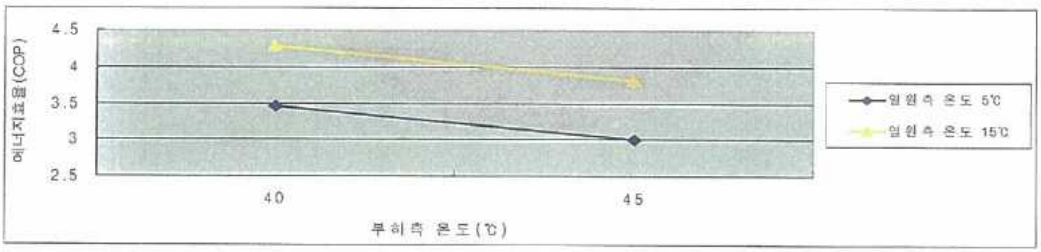


그림 3. 부하측 온도에 따른 성능변화(난방시험)

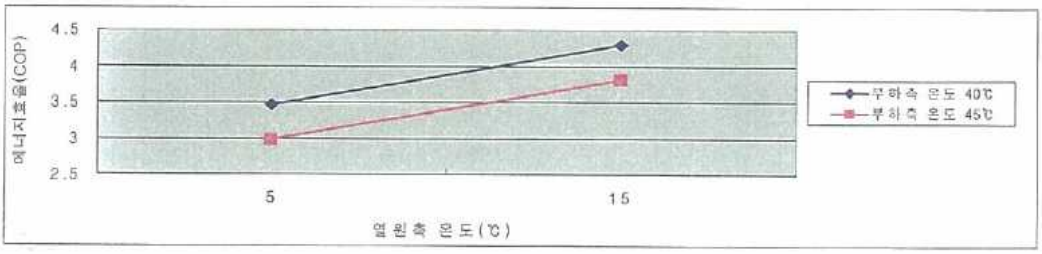


그림 4. 열원측 온도에 따른 성능변화(난방시험)

시 험 결 과
TEST RESULT

성적서번호 Test No.	KRAAC-B-10-066	페이지 (6)/(총7) (6)/(7)pages

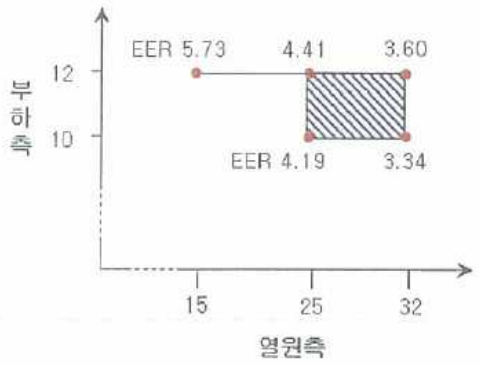


그림 5. 사용온도범위(냉방운전)

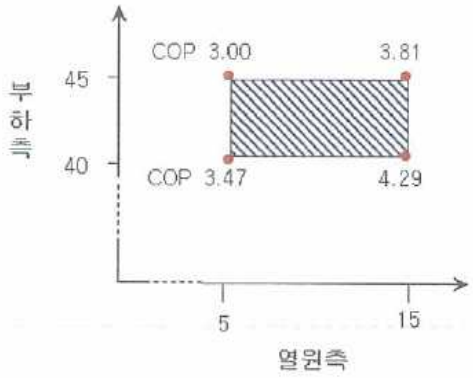


그림 6. 사용온도범위(난방운전)

5. 시스템 계통도 및 외형도 - 별도 도면 참조

6. 시험 사진

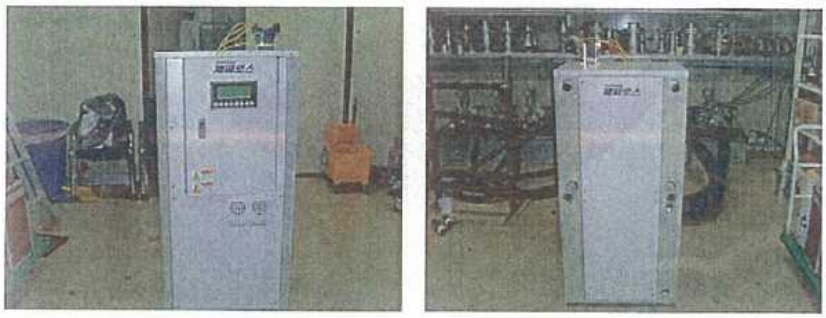


그림 7. 전면, 후면



그림 8. 좌측, 우측

KRAAC-TP-5101-02(02)

시 험 결 과
TEST RESULT

성적서번호 Test No.	KRAAC-B-10-066	페이지 (7)/(총7) (7)/(7)pages



그림 9. 압축기



그림 10. 열교환기



그림 11. 4-Way V/V

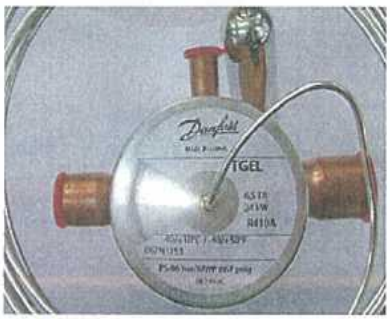


그림 12. 팽창밸브



그림 13. 전기판넬

KRAAC-TP-5101-02(02)

지열시스템 장비일람표

지 열 히 트 펌 프

장비번호	수량	용 도	형식	용량(KW) 냉방 / 난방	냉 방 능 력					난 방 능 력					전 원	크 기 W X L X H (mm)	냉 매	비 고
					용 량 (KW)	유 량 (LPM)	입구온도(°C) 부하	입구온도(°C) 지열	소비전력 (KW)	용 량 (KW)	유 량 (LPM)	입구온도(°C) 부하	입구온도(°C) 지열	소비전력 (KW)				
HP-1	1	냉난방	W-W	17.52 / 17.43	17.52	60	12	25	4.0	17.43	60	40	5	5.0	380V x 3Φ x 60Hz	600 x 480 x 1,225	R-410A	W-W

순 환 펌 프

장비번호	수량	명 칭	형 식	유 량 (LPM)	양 정 (M)	전 동 기 동력 (KW)	전 동 기 전 원	구 경 (MM) 흡 입	구 경 (MM) 토 출	설치위치	예 비	비 고
GP-1	2	지열순환펌프	인라인	60	26	2.2	3 x 200V x 60HZ	32	32	기계실	1	메카니칼실, 표준부속품 일체포함
GP-2	2	냉온수순환펌프	인라인	60	15	1.1	3 x 200V x 60HZ	40	40	기계실	1	메카니칼실, 표준부속품 일체포함
GP-3	2	대류순환펌프	인라인	50	10	0.55	3 x 200V x 60HZ	32	32	기계실	1	메카니칼실, 표준부속품 일체포함

탱 크 류

장비번호	수량	용 도	용 량 (LIT)	규 격	최고 사용 압력	배관 연결구	최고 사용 온도	설치위치	비 고
T-1	1	밀폐형팽창탱크	60	D409 X 740H	10.0kg/cm2	25A	115 (°C)	기 계 실	수직형, 지압용, 표준부속품 일체포함
T-2	1	냉온수저장탱크	600	D740 X 1,880H		40A		기 계 실	수직형, 지압용, 표준부속품 일체포함

1 / MG 장비 일람표

축척 : NONE

REV	DESCRIPTION	PREP	APPR	DATE
△				
△				
△				
△				
△				

IIAC Incheon International Airport Corporation

PRIME :
SUB :

CNTR NO

DSGN CHCK APPR DATE

에너지 파일을 이용한 지중열에너지 종합 실증시험 및 Monitoring

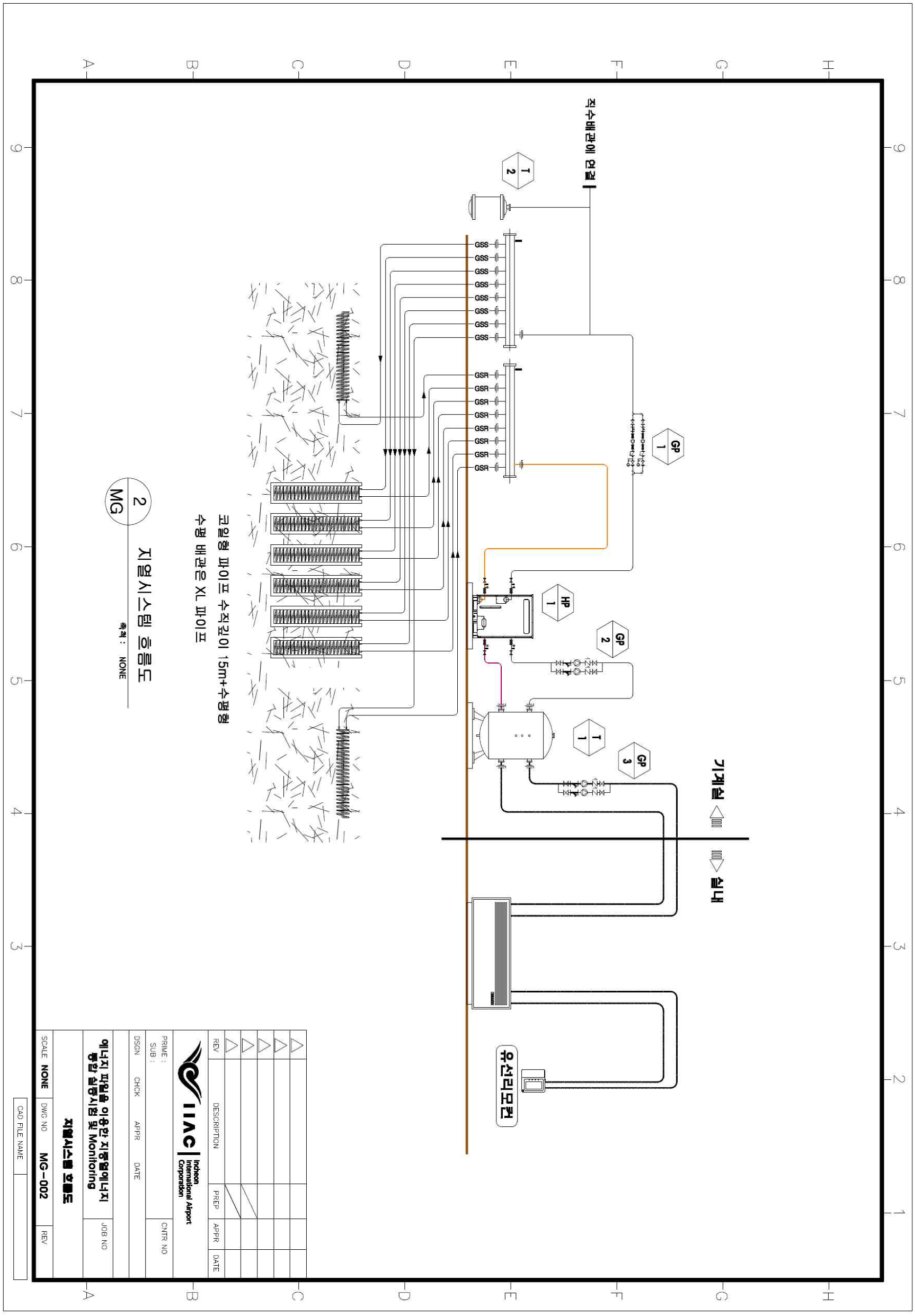
JOB NO

장비 일람표

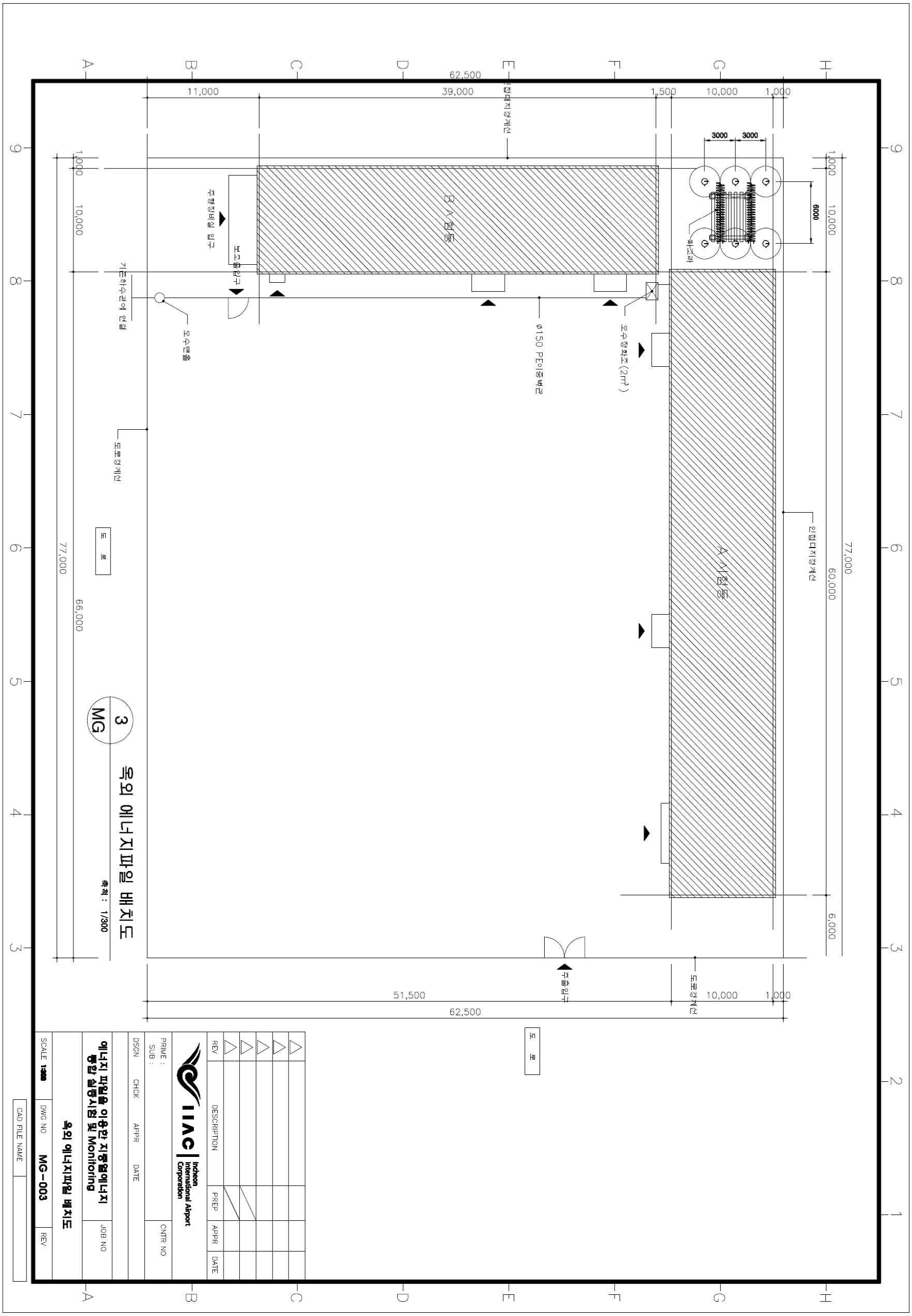
SCALE NONE | DWG NO MG-001 | REV

CAD FILE NAME

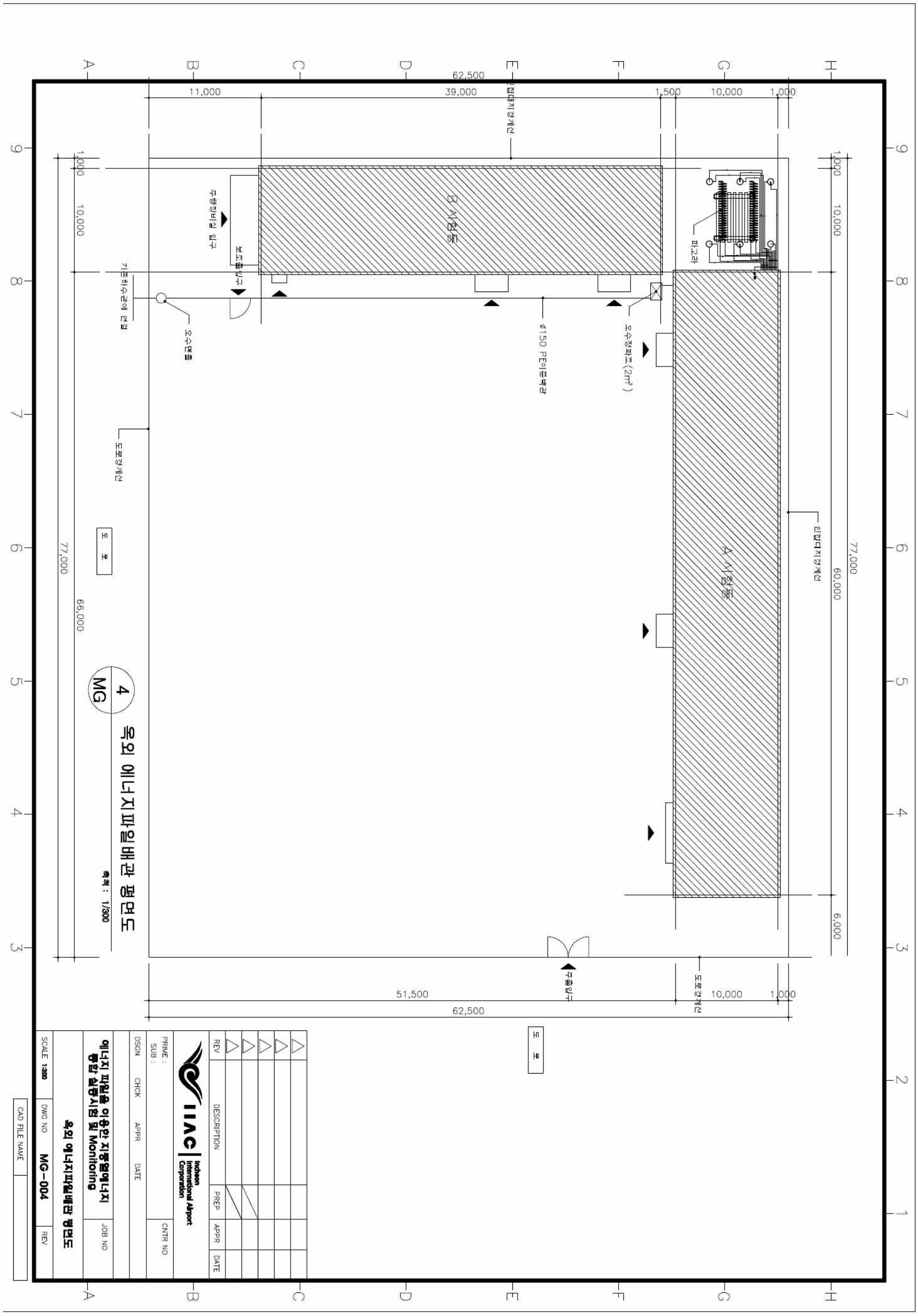
(2) 지열시스템 흐름도


직수배관에 연결
GSS
GSR
GP 1
GP 2
GP 3
HP 1
T 1
T 2
기계실
실내
유선리모콘
코일형 파이프 수직깊이 15m+수평형
수평 배관은 XL 파이프
2 MG
지열시스템 흐름도
축척 : NONE
Incheon International Airport Corporation
PRIME :
SUB :
DSGN
CHCK
APPR
DATE
CNTR NO
JOB NO
REV
DESCRIPTION
PREP
APPR
DATE
에너지 파일을 이용한 지중열에너지 응답,효율시험 및 Monitoring
지열시스템 흐름도
SCALE NONE
DWG NO MG-002
CAD FILE NAME

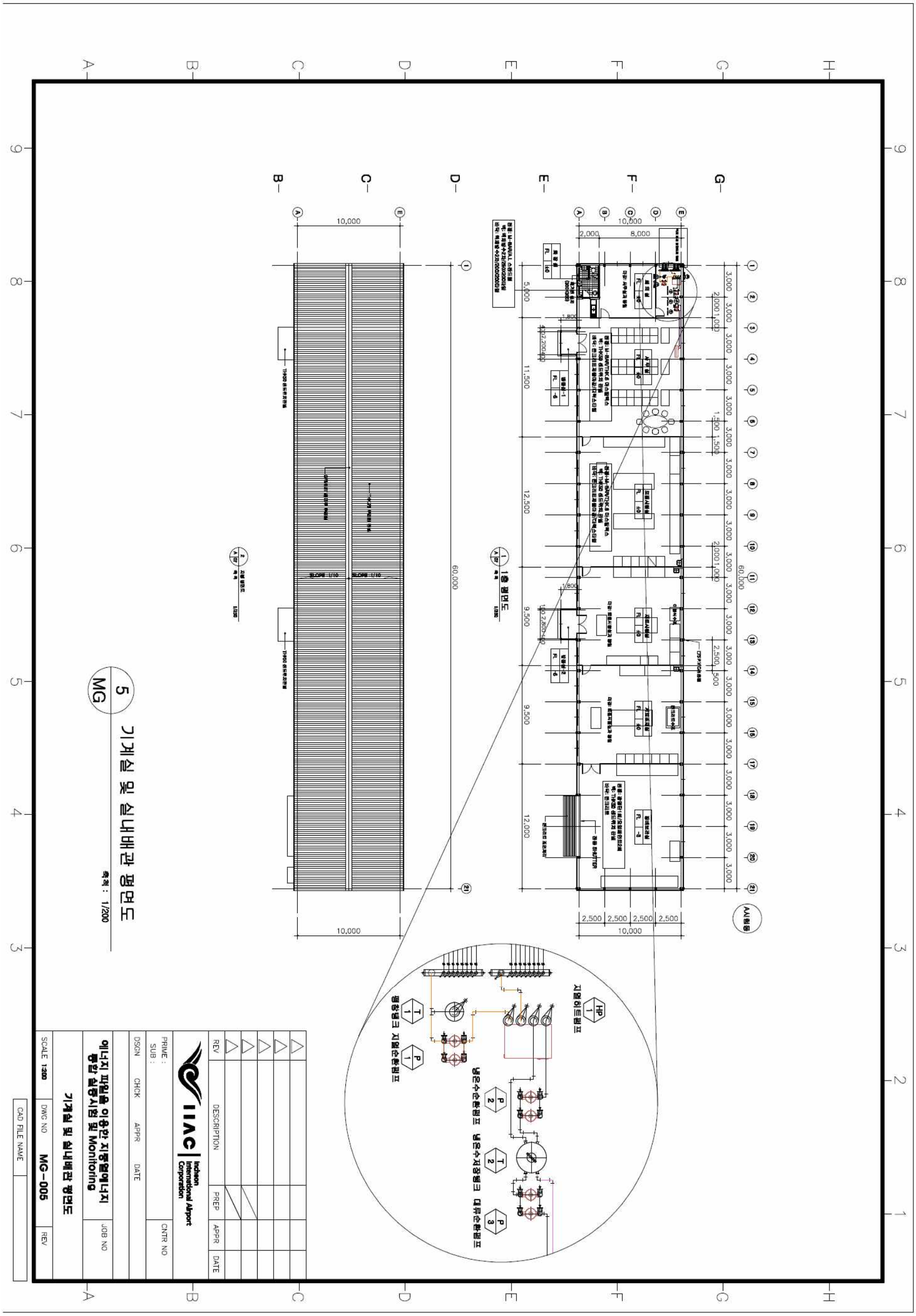
(3) 에너지파일 배치도


62,500
11,000
39,000
1,500
10,000
1,000
77,000
60,000
6,000
66,000
51,500
10,000
1,000
3000
3000
6000
B/A 연결동
A/A 연결동
주출입구
도로경계선
입점대지경계선
파고라
주출입구 및 입구
보조출입구
기존하수관에 연결
오수맨홀
ø150 PE이중벽관
오수정화조(2m³)
옥외 에너지파일 배치도
3
MG
축척 : 1/300
PRIME :
SUB :
CNTR NO
DSGN
CHCK
APPR
DATE
IIAC
Incheon International Airport Corporation
REV
DESCRIPTION
PREP
APPR
DATE
에너지 파일을 이용한 지중열에너지 통합 활용시범 및 Monitoring
옥외 에너지파일 배치도
JOB NO
SCALE 1:300
DWG NO MG-003
REV
CAD FILE NAME

(4) 에너지파일 배관평면도



(5) 기계실 배관평면도


5
MG
기계실 및 실내배관 평면도
축척 : 1/200
에너지 파일을 이용한 지중열에너지 융합, 실용시험 및 Monitoring
기계실 및 실내배관 평면도
SCALE 1:200
DWG NO MG-005
REV
JOB NO
CNTR NO
PRIME :
SUB :
DSGN
CHCK
APPR
DATE
DESCRIPTION
PREP
Incheon International Airport Corporation
CAD FILE NAME
지열히트펌프
냉온수순환펌프
냉온수저장탱크
대류순환펌프
팽창탱크
지열순환펌프
1층 평면도
A/A 평면
60,000
10,000
12,500
11,500
9,500
8,000
2,000
2,500

제 4 장 연구 목표 달성도

1. 연차별 연구 목표 및 연구개발 수행 현황

구분	과제명 (연구기관)	연구목표	연구목표별 Activity	1차년도				2차년도				3차년도			
				1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
주관	지중 열에너지 전환·활용·저장 시스템 설계 및 성능 평가 기술 개발 (KAIST)	지반 조건을 고려한 지중 열 물성 D/B 구축 및 평가 기술 개발	추정모델 비교 및 확률론적(p-value 등) 검증 tool 사용												
			지역별 지반특성에 (간극비,함수비)에 따른 열전도도 실험 건수												
		지반의 열전달 거동 모델 개발	이론 해석모델 및 실내 모형토조와의 실험값과 비교												
			기존 알고리즘과 개발된 알고리즘 (열-수리-역학)과의 비교												
		지열 전환 및 저장 해석 모델 개발	기존 설계 프로그램 (Pilesim2 등)과의 비교												
공동	지중 열에너지 전환·활용·저장 시스템 설계 및 성능 평가 기술 개발 (인천국제공항공사)	경제성 예측 기법 연구	기존의 예측기법과 LCC기법의 결과 비교 분석												
주관	지중 열에너지 전환·활용·저장 시스템 설계 및 성능 평가 기술 개발 (KAIST)	지반 열 물성 추정프로그램개발	개발된 인공신경망 기반 예측 기술의 R2 값 비교												
		GHE 시스템 설계 프로그램 개발	기존 설계프로그램 (GLD등)과의 비교를 통한 설계프로그램 국산화												
			Mockup 시험결과와의 비교 검증												
	지중 열에너지 전환·활용·저	광대역 지반의 장기	실제 에너지파일 시스템 운용 실험 결과와의												

구분	과제명 (연구기관)	연구목표	연구목표별 Activity	1차년도				2차년도				3차년도			
				1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
	장 시스템 설계 및 성능 평가 기술 개발 (KAIST, 울산대)	열저장/전환 거동 시뮬레이션	비교를 통한 알고리즘의 정확성 확보												
공동	지중 열에너지 전환·활용·저장 시스템 설계 및 성능 평가 기술 개발 (인천국제공항공사)	최적 운용비 산정 기법 개발	최적 운영비 산정 방법의 적절성 도출												
주관	지중 열에너지 전환·활용·저장 시스템 설계 및 성능 평가 기술 개발 (KAIST)	UTECUS 스마트 모니터링 네트워크 개발	스마트 센서와 기존 전기식 센서와의 오차비교												
주관	지중 열에너지 전환·활용·저장 시스템 설계 및 성능 평가 기술 개발 (KAIST)	설계 프로그램 모듈의 다양성 및 정확성	Mockup2 시험결과 및 상용 수치해석 프로그램과의 비교												
	지중 열에너지 전환·활용·저장 시스템 설계 및 성능 평가 기술 개발 (KAIST)	설계 프로그램 상용화	개발된 프로그램으로 기본 설계												
공동	지중 열에너지 전환·활용·저장 시스템 설계 및 성능 평가 기술 개발 (인천국제공항공사)	최적 운전을 위한 경제성 예측 기법 개발	기존 경제성 분석 기법과의 비교												

구분	과제명 (연구기관)	연구목표	연구목표별 Activity	1차년도				2차년도				3차년도			
				1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
주관	지중 열에너지 전환·활용·저장 시스템 설계 및 성능 평가 기술 개발 (KAIST)	최적 운영 방안 구현	최적 운영방안과 결과 비교												

2. 연구개발 목표의 달성도

연 차	연구목표	달 성 도 (%)	주요 연구내용
1차 년도	▪ 지반 조건을 고려한 지중 열 물성 D/B 구축 및 평가 기술 개발 (I)	120%	▪ 국내 주요 화강 풍화토 및 암반의 열 물성 변화 특성 실험 수행과 데이터베이스 구축
	▪ 지반의 열전달 거동 해석 모델 개발 (I)	100%	▪ 포화/불포화 다공질 지반에 대한 열-수리-역학적 구성 모델의 개발 ▪ 다공질 재료의 열-수리-역학적 지배 방정식에 의한 유한요소 프로그램 개발
	▪ 지열 전환 및 저장 해석 모델 개발 (I)	100%	▪ 기초 구조물 매입형 지열 교환기와 주변 지반 간 열적 상호 거동 해석 기법 개발 ▪ 지열 교환 파이프의 배치 형태 (U 또는 코일형)를 고려한 해석 기법 개발
	▪ 경제성 분석 및 예측 기법 연구	100%	▪ 기존 경제성 분석 사례 조사 및 합리적 예측 기법 도출
2차 년도	▪ 지반 열 물성 추정 프로그램 개발	100%	▪ 광물 특성, 지반 함수비, 간극비 등의 지반의 기본 물성치를 활용한 인공신경망 이론 기반 열 특성 추정 모델의 개발 ▪ 사용자 친화적 인터페이스를 갖춘 열특성 추정모델 프로그램 개발
	▪ 지반의 열전달 거동 해석 모델 개발 (II)	100%	▪ 개발된 열-수리-역학 유한요소 프로그램을 이용한 UTECUS 지열 저장거동 매개변수 해석 ▪ 하이브리드 지중 열 저장 능력 및 지하수위, 지표면 온도 변화 등에 의한 장기적인 효율성 및 지중 열환경 평가
	▪ 지열 전환 및 저장 해석 모델 개발 (II)	90%	▪ 불균질한 지반의 열전달 특성을 고려한 지열교환기-지반 열 교환/저장 거동 해석 기법 개발 ▪ 다층 지반 및 지반의 불균질성을 고려한 등가 열 물성계수 역해석 기법 개발
	▪ 시공 경제성 평가 및 운영 중 지반 열환경 평가 연구	100%	▪ 지열교환기 배치 간격으로 인한 열간섭 효과에 대한 연구 ▪ 열교환 파이프 배치 형태 및 간격별 열효율

			평가 ▪ 광대역 지반의 장기 열 저장/전환 거동 평가
	▪ UTECUS 스마트 모니터링 네트워크 개발	100%	▪ 핵심 계측 인자 및 계측 지점 도출 ▪ 다중 계측 센서 배치를 통한 스마트 모니터링 네트워크 시스템 개발
	▪ 1차 Mockup 시험 수행	100%	▪ 설계, 모니터링 기술 및 경제성 평가 모델 검증을 위한 Mockup 시험 수행
3차 년도	▪ UTECUS 설계 프로그램 개발	100%	▪ 하이브리드 에너지 및 에너지 피크 부하를 고려한 지열에너지 전환/활용/저장 시스템 설계 프로그램의 완성 ▪ 열-수리-역학, 하이브리드모듈 추가 ▪ 설계프로그램의 적용: 개발된 프로그램으로 기본 설계 실시
	▪ UTECUS 경제성 분석 및 최적운전 방안 도출	100%	▪ 경제성 예측 기법 개발: 기존 경제성 분석 기법과의 비교 ▪ 모니터링을 통한 최적운영방안 도출: 제안된 운영방안 전후 운영비 비교 ▪ 최적 운전을 위한 경제성 예측 기법 개발
	▪ Mockup 실증 실험을 통한 기술 패키지 구축 및 검증	100%	▪ Mockup 실증 실험을 통한 최적 운전 방안 검증 ▪ 실증 실험을 통한 설계 프로그램 검증 ▪ 최적 운영 모드 프로그램화 ▪ 모니터링 시스템 및 설계 프로그램의 보완 및 수정을 통한 통합화 ▪ 지열 시스템 제도 개선: 기존의 제도화 및 지침서 보완

제 5 장 연구개발결과의 활용 계획

※연구성과 활용계획 요약

(1) 화강풍화토 열전도도 D/B 및 추정 모델의 적용 가능

- 본 연구에서 구축된 강원, 충청, 부산, 호남권 대표 화강풍화토에 대한 열전도도 D/B는 동 연구에서 제안된 열전도도 추정 모델과 함께 지열 히트펌프 시스템을 적용하기 위한 지반의 열 물성 추정 시 활용이 가능함.

(2) 지열시스템 설계 시 지반 열 물성 추정 프로그램의 활용

- 개발된 열전도도 추정 프로그램을 통해서 지역별 혹은 지반조건에 따라 달라지는 흙의 열전도도를 손쉽게 예측 가능하기 때문에, 열전도도 지열시스템 설계 및 시공에 쉽게 적용될 수 있다. 또한 추후 UTECUS 하이브리드 설계프로그램의 한 모듈로서 접목이 용이하다.

(3) 범용 열원모델 및 효율적인 이론해 산정 기법의 설계 프로그램 적용

- 본 연구에서 개발된 Coil형 열원 모델 및 이론해 산정 기법은 본 연구에서 수행중인 지열시스템 설계 프로그램 개발에 사용될 예정이며 상용 설계 프로그램들이 고려하지 못하는 Coil 형태의 지중열교환기에 대한 설계변수 산정 시 매우 유리한 장점을 가지고 있기 때문에 그 활용도가 매우 높다.
- 지반의 열전도도 뿐만 아니라, 지중 열저항, 열 간섭 효과 등 다른 방면의 설계변수에도 Coil형 열원 모델이 적용되어 Coil형 지중열교환기를 좀 더 정확하게 고려할 수 있어 사용성이 좋으며, 수직 밀폐형 지열시스템 외에도 Coil형 교환기가 주로 사용될 수 있는 지중 깊이가 낮은 에너지 파일 시스템에도 적용할 수 있는 프로그램을 개발 중에 있어 더욱 더 광범위하게 이용될 수 있다.
- 보어홀 열저항 역시 지중열교환기 설계에 있어 중요한 설계인자인데 본 연구를 통해 보어홀의 열저항은 지반의 열전도도에 의해 변화한다는 것을 실험적으로 증명하였으며 향후 이러한 보어홀 열저항 모델이 지중열교환기 설계 프로그램이 활용될 것이다.
- 기존에 주로 적용되고 있는 일반 수직밀폐형에서는 U 또는 Coil형 형태보다 W자나 2U자의 열교환기 적용시 초기 시공비를 5% 정도 절감할 수 있는 것으로 분석되었다. 따라서 향후에는 기존의 U자형을 대신해 충분히 적용할 가치가 있을 것으로 판단된다.

(4) 에너지 파일의 열-수리-역학적 안정성에 대한 통합적 평가

- 에너지파일의 열교환거동은 파일의 역학적 거동에 영향을 끼치며 이에 기존 연구자들은 열-역학 연동 모델을 이용한 안정성을 평가함. 그러나 지반은 지하수 흐름 및 강우로 인해 지반 내 수분의 흐름이 동반되기 때문에 기존의 열-역학 연동 모델은 한계가 있음. 따라서 본 연구개발에서 개발된 열-수리-역학적 해석 프로그램은 통

합적인 에너지파일의 안정성 평가에 매우 적합할 것으로 사료됨.

(5) 열-수리-역학적 구성 모델 및 유한요소해석 코드의 다양한 활용 가능

- 본 연구에서 개발된 열-수리-역학 유한요소해석 프로그램은 지열 관련 연구 뿐만 아니라 동결-융해, 핵방폐장 보호시설 지반의 안정성 및 가스관주변 지반의 안정성 평가 등과 같은 열-수리-역학적 메커니즘이 연관된 문제에 다양하게 적용이 가능함.

(6) 지열히트펌프 시스템의 합리적 경제성 분석

- 정확하고 합리적인 비용 분석을 통하여 보다 개선된 경제성 분석에 활용될 것으로 보인다. 또한 LCC 이론을 바탕으로 한 IRR, NPV, B/C Ratio 등의 다른 경제성 지표까지 도출하여 보다 다양한 관점에서 지중열 시스템의 경제성을 검토할 수 있을 것으로 판단된다. 차년도에는 LCC 이론을 바탕으로 지중열 시스템을 구성하는 요소들의 최적화 조합을 도출하여 제시할 예정이다.

(7) UTECUS 스마트 모니터링 네트워크 개발

- 지중 열교환기 성능 분석을 위해서는 지중 열교환기 입출부의 온도 측정이 필수적이다. 본 연구에서는 실내 모형토조를 이용해 기존에 주로 사용되고 있는 전기식 센서와 내구성이 우수하고 멀티플렉싱 기능이 가미된 광섬유 온도 센서도 새롭게 설치하여 광섬유 센서의 적용성을 판단하였다. 향후 많은 계측기가 요구되는 모니터링 현장에 광섬유 센서를 적용하면 보다 쉽고 효율적으로 모니터링 체계를 구축할 수 있을 것으로 생각된다.

제 1 절 연구결과의 활용방안

1. 인천국제공항 지열 설비 설계 및 유지관리 현장 적용 및 실용화 방안 모색

- 본 연구개발의 참여기업인 인천국제공항공사 연구개발단은 제2여객터미널 신축 현장에 신재생 에너지 설비 의무도입 정책에 의거 총 건축공사비의 5% 이상을 신재생에너지 설비 설치에 투자하기로 하였으며 2010년 타당성 분석을 통해 지열에너지 도입을 위해 총 신·재생에너지 설비 투자의 10%, 약 13억 원의 시설투자를 검토 중임 (표 5-1).

- 제2여객터미널 파일 및 굴토작업 착수는 2013년 5월경 예정이며 부대건물은 2014년 상반기이후 착수 예정으로, 현재 설계 입찰이 진행중에 있음. 시간 관계상 본 연구개발의 기술이 설계에 직접 반영되기는 어려우나 연구개발단 입장에서 시공 전 설계 시나리오에 따른 경제성 및 성능 평가, 유지관리 방안에 대한 기술개발이 절실한 상황임.

- 따라서 예상되는 설계 시나리오를 모사한 Mockup 시험을 본 연구개발 중 총 2회 (2차년도 3/4 분기, 3차년도 2/4 분기)에 수행하여 설계 및 모니터링 기술의 검증은 물론 실용화를 추진하여 참여기업에 기술 지원을 수행할 예정임.

표 5-1-1 인천국제공항공사의 지열 활용 및 투자 검토 (안)

대상지역	시설규모(kW)	예상투자비(백만원)
제2여객터미널(3단계신축)	1,750	1,272
동절기장비고B	350	406
소방대분소B	175	203
중수처리장	105	122
청사	700	812
배전변전소3	140	162
배전변전소4	140	162
합계	3,220	3,139

Note) 제 2여객터미널은 '신에너지 및 재생에너지 개발이용보급 촉진법에 의무화될 것으로 예상되나 나머지 대상시설은 기존 시설로서 지열적용 타당성여부 검토에 따라 변동예정

2. 추후 연구

a. 현장 적용성 개선을 통한 기술의 제품화 및 경쟁력 강화

- 과제 종료 후 인천국제공항공사와 더불어 실제 제 2 여객터미널 신축 설계 및 시공등을 담당하는 지열 엔지니어링 업체와 협력을 추진하여 개발 기술을 실제 시공 현장에 적용-보완하는 피드백 연구 개발을 수행하고자 함. 이를 통해 개발된 설계 프로그램 코드 및 모니터링 유닛을 개선하고 기술적 완성도를 높여 향후 설계-유지관리 관련 시장에서 현장 적합성을 바탕으로 제품화를 공동 수행할 계획임.

- 또한 공항 터미널 등 대규모 에너지소비형 건축물에 대한 하이브리드 지열 적용 기술개발을 통해 해외공항사업 등에 적극 활용하고자 함.

b. 지중열에너지 저장시스템 연구

- 국제 협력 과제의 일환으로 덴마트 DTU와 함께 High-temperature aquifer thermal energy storage (HT-ATES) 시스템의 적용성 평가를 수행하고자 함.

제 2 절 기대성과 및 파급효과

1. 학문적, 인력양성 측면

- 본 연구를 통해 국제적으로 미진한 UTECUS 설계기술의 독자적 연구 역량의 확보가 가능할 것으로 기대됨.

- 또한 저심도 지열을 이용한 에너지 기술은 지반공학 분야의 새로운 학문 분야로 건설 분야의 녹색 기술 개발의 활성화에 이바지 할 것으로 예측됨.

- 본 연구에서 수행될 건설기술 및 IT 기술의 융합적인 연구를 통하여 국내적으로 많이 부족한 녹색 건설 기술의 고급 연구 인력 배출 (석박사 급)이 기대되며 이는 정부의 제 3차 신재생 에너지 추진 전략의 녹색 인력 양성 지원 계획과 부합하는 것으로 판단됨.

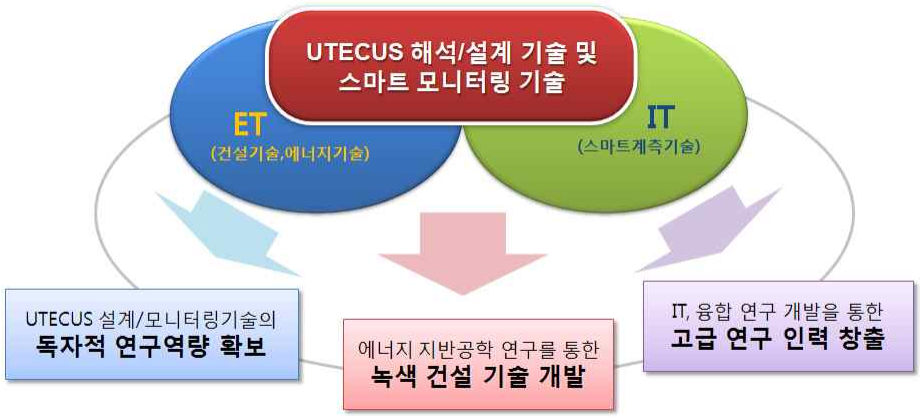


그림 5-2-1 본 연구 과제의 학문적, 인력양성 측면 기대성과 및 파급효과

2. 기술적, 경제·산업적 측면

- 본 연구를 통한 기대 성과 중 경제·산업적인 측면으로는 UTECUS의 적용을 통해 차세대 녹색 성장의 동력으로서 국내 총에너지 소비의 약 23%를 차지하는 주거용 냉난방 에너지 비용의 획기적인 절감효과와 CO2 배출 저감 효과 등을 기대할 수 있음.

- 기후 변화 대응을 위한 환경 지속성 에너지 고효율화 기술로서 IT와의 융합기술을 통해 새로운 일자리 창조효과가 큰 건설시장에서 친환경 요소기술을 추구하는 그린 시티, 홈, 빌딩 등 새로운 시장을 형성할 것임. 더불어 시장의 기술 도입뿐만 아니라 국내에서 지열 산업이 도약하는데 많은 기여를 할 것으로 예상됨.

- 특히 국내 지열 교환기 및 히트펌프 시장이 2030년까지 연평균 25%성장을 이루는 것으로 예상됨을 고려해 볼 때, 고효율의 에너지 활용을 위한 UTECUS 적용은 더욱 확대될 것으로 예상됨.

- UTECUS와 기존 지열 히트펌프 기술은 시공적인 측면에서 근본적으로 동일한 반면 다양한 하이브리드 열원을 지중에 저장하고 다시 활용한다는 측면에서 차이가 있기 때문에 설계 및 유지관리에서 차이를 보임. 현재 지열 교환기 설계 및 유지관리 측면에서 국내 대부분의 엔지니어링 업체와 연구기관에서 해외 설계 프로그램 및 유지관리 시스템을 적용하고 있는 바, 본 연구개발의 성과물은 **수입 대체의 효과 및 설계-모니터링 핵심기술의 국산화**라는 중요한

의미를 가짐.

- 2030년 저심도 지열 히트펌프 시설 시장의 규모를 5조 (대우증권, 2009)로 가정하고 설계 및 유지관리 비용을 전체 시설비의 2%로 가정할 경우 약 1000억의 지열 설계 및 유지관리 엔지니어링 시장이 예상되기 때문에 본 연구의 개발 기술의 실용화를 통해 상당량의 부가가치를 획득할 수 있을 것으로 사료됨.

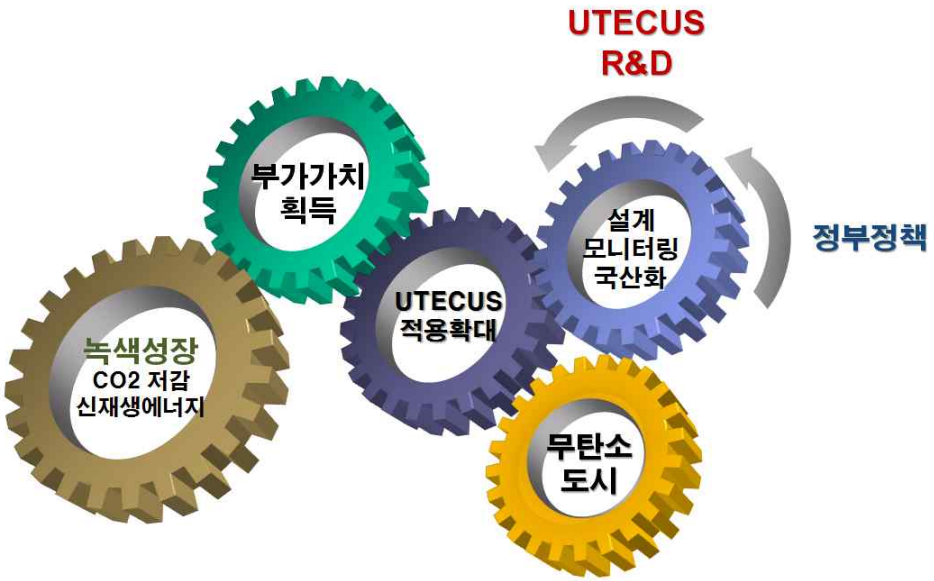


그림 5-2-2 본 연구 과제의 기술적, 경제·산업적 측면 기대성과 및 파급효과

3. 국가이미지 제고 및 해외 시장 진출

- 향후 전 세계에서 폭발적으로 증가하는 태양열/풍력 플랜트에서 발생하는 열에너지 저장 기지로써 합리성, 신뢰성 및 효율성을 가지고 있어 그 적용이 확대될 것으로 예측됨.

- 개발도상국의 녹색 에너지 정책에 부합하는 열 에너지 저장/활용 시스템 설계/유지관리 기술 패키지를 통한 합리적 시공 방안 마련 등을 통해 고부가 가치 그린 에너지 건설 인프라(공항, 플랜트, 항만 등) 수주에 일익을 담당할 수 있음.

- 세계 1위의 국내 냉난방 히트펌프 기술 (삼성, LG 등)과 결합할 경우 지열 재생 에너지를 활용한 세계 냉난방 시장에서의 시너지효과를 기대할 수 있음.



그림 5-2-3 본 연구 과제의 국가이미지 제고 및 해외 시장 진출 관련성

제 3 절 연구결과의 기업 활용방안

1. 참여기업의 현황분석

인천국제공항공사 현황

- 본 연구개발의 참여 기업인 인천국제공항공사는 인천국제공항을 6년 연속 세계최고공항으로 이끈 세계적 공항 운영 기업으로써 보다 더 높은 도약을 위하여 제2여객터미널 및 3단계 개발 사업을 추진하고 있음. 정부의 신재생 에너지 설비 적용 의무 정책에 따라 해당 사업에 향후 130억 원 이상의 태양열/지열을 활용한 대규모 하이브리드 신재생 에너지 시스템 적용을 계획하고 있으며 참여기업의 현황은 표 5-3-1과 같음.

표 5-3-1 참여기업(인천국제공항공사) 현황

업태	종목	매출액 / 당기순이익 (2010년)	고용 현황
서비스 통신업 부동산	공항 설비 운영 부가 통신 임대 교육 공항관리 운영	1조 2860억 / 3241억	임직원 905명 (임원 13, 직원 853명) 연구개발전담부서 (연구개발단 7인)

연구개발 참여를 통한 부가가치 추구 사항

- UTECUS 시스템의 설계 및 모니터링 기술의 활용 연구 지원을 통한 인천공항 내 UTECUS 시스템의 적합성 평가 및 성능평가·경제성분석·모니터링 관련 매뉴얼 개발.
- 향후 인천국제공항 지열 에너지 설비 설계 및 시공 업체와 본 연구진(KAIST) 과의 협력을 통한 인천국제공항 내 적용 및 제품화.
- 연구개발비 지원을 통한 개발 기술의 지적 재산권 및 사업 활용 권리에 대한 지분 확보 및 사업화를 통한 부가가치 창출.

혁신 역량

- 2009년 4월 'The World's Best Green Airport'를 비전으로 하는 '녹색성장 전략'을 수립하여 국가의 비전인 녹색성장 실현에 동참하고 있음.
- 신재생에너지의 활용과 관련하여 2009년 국제업무지역에 있는 중수처리시설 부지 내 태양광 100㎾와 풍력 50㎾, 공항진입로 등에 하이브리드 가로등 42기를 설치하는 등 신재생에너지 시범단지를 조성하여 연간 약 195MWh의 전력 공급이 가능해져, 약 83t의 온실가스 배출 저감효과를 얻음.
- 자유무역지역의 경우 태양광 15㎾ (전력), 태양열 254Gcal 지열 61Gcal을 이용하는데 성공함.

발전 전망

- 제 2 여객 터미널 및 3단계 개발 사업에서 태양광, 태양열 및 지열을 이용한 신재생 에너지 설비를 총 에너지의 10% 이상으로 활용할 계획을 수립하고 있으며 하이브리드(태양열+지열) 지중 열 에너지 전환/활용/저장 시스템을 적극 활용하기로 함.
- 인천국제공항공사의 해외 개발 사업 (표 5-3)을 통하여 본 연구개발의 설 계 기술 및 모니터링 기술을 패키지화하여 해외 사업에 적용하고자 함.

표 5-3-2 참여기업 인천국제공항공사의 해외 개발 사업 추진 계획

사 업 명	기 간	비 고
스리랑카 남부신공항 활주로 감리 및 수도공항 확장사업 F/S 조사사업	컨설팅	IIAC (인천국제공항공사)
캄보디아 시엠립 신공항 후속사업	컨설팅	IIAC
네팔 신공항 후속사업	컨설팅	IIAC
필리핀 팔라완공항 확장사업 설계검토 및 공사감리	컨설팅	IIAC
필리핀 막탄세부공항 신규터미널 BOT사업	BOT	IIAC
도훅신공항 건설사업관리용역	컨설팅	IIAC
러시아 하바롭스크공항 지분투자	지분투자	IIAC

2. 참여기업별 연계방안 및 추진전략

- 참여기업인 인천국제공항공사 연구개발단과의 협력을 통해 해당 기업이 필요로 하는 터미널, 물류창고 등의 대형 국가 시설물에 대한 UTECUS 시스템 적용을 가정한 Mock-up 시험을 수행하고 이를 기초로 개발된 설계 프로그램과 모니터링 기법의 검증 및 기술 통합화를 수행.

- 특히 인천국제공항공사가 추진하는 하이브리드 (태양열+지열) 신재생 에너지 시스템을 활용한 하이브리드 UTECUS 설계 및 모니터링 관련 기술 개발 수행.

- 본 연구개발이 성공적으로 수행된 후 개발성과물 (설계프로그램 및 모니터링 시스템)을 실제 설계 및 유지관리에 활용 또는 기존 설계 검증 및 Pilot 시험 모니터링에 적극 활용.

- 향후 인천국제공항 지열 에너지 설비 설계 및 시공 업체와 본 연구진(KAIST)과의 협력을 통한 인천국제공항 내 적용 및 제품화.
- 연구개발비 지원을 통한 개발 기술의 지적 재산권 및 사업 활용 권리에 대한 지분 확보 및 사업화를 통한 부가가치 창출.

표 5-3-3 참여기업과의 연계방안

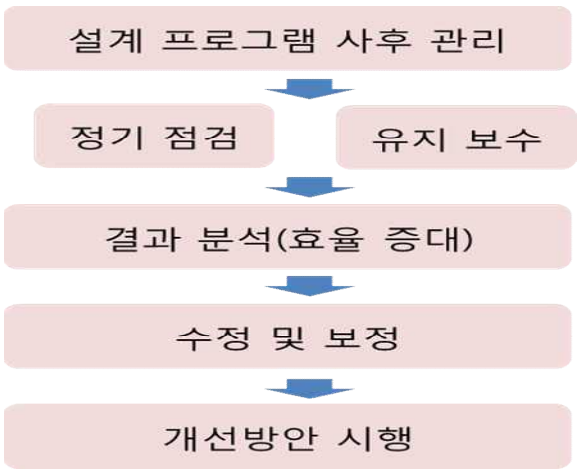
번호	기업명	과제에 대한 기업 관심영역	연계방안								
			기업활용	장비활용	교육연계	기술상담	정보제공	기술지도	기술이전	공동연구	창업지원
1	인천국제공항공사 연구개발단	• 설계프로그램 활용 • 모니터링시스템 적용 • 경제성분석 매뉴얼	o	o			o	o	o	o	
합계		3건	1건	1건			1건	1건	1건	1건	

설계프로그램 사후 관리방안

KAIST 지반공학 연구실

1. 개요

○ 개요 : 지중 열에너지 전환·활용·저장 시스템 설계 및 성능평가기술 개발 과제를 통한 특허, 소프트웨어 등록, 제도개선(정부인증) 및 사업화를 통한 향후 사후관리 방안 강구



2. 사후 관리 추진 방안

	KAIST	인천국제공항공사
지열 설계 프로그램 소프트웨어 등록 및 정부 인증	. 설계 프로그램 소프트웨어 등록 (단 소프트웨어 등록은 공사측과 지분율 배분 후 공동협약을 통한 공동성과 등록) . 설계 프로그램 정부 인증을 통한 운영자료 확보확보	설계 프로그램 정부 인증 추진

3. 향후 추진 계획

○ 지열 설계 프로그램 제도 개선 (정부 인증) 및 소프트웨어 등록 : 15.4월~

- 소프트웨어 등록을 위한 KAIST-공사 공동협약서 작성 병행

○ 지열 설계 프로그램 기술실시 및 제품화 사업화 : 정부 인증작업 이후 (16.3월~)

- 소프트웨어 등록시 협의했던 지분율에 따라 기술실시 수행

제 6 장 참고 문헌

1. 공형진. (2012). “주거용 지열 히트펌프 시스템의 성능 특성에 관한 연구”, 박사학위 논문, 호서대학교.
2. 김영상 (2005), “비압밀-비배수(UU) 삼축실험과 피에조콘 실험결과를 이용한 국내 연약지반의 비배수 전단강도 추정 인공신경망 모델”, 한국지반공학회 논문집, 제21권 8호 PP.73-84
3. 김용수 (1998), “아파트 건물의 수명주기비용 예측을 위한 운영관리비 분석 및 예측모델의 개발”, 대한건축학회집 구조계 제14권 10호.
4. 김창법, 이재성 (2010), “ 투자와 기업성과관의 관계에 관한 연구” 한국회계정보학회, 재무와회계정보저널, 제10권, 3호, pp. 31-58.
5. 박상우, 이철호, 박용부, 손정락, 최항석 (2012) “코일형 PHC 에너지파일의 열교환 특성에 관한 연구” 한국지반공학회 봄학술 발표회, pp. 215-226.
6. 박스칸. 2012. “코일형 지중열교환기 해석모델과 이론해 개발 및 응용”. 박사학위 논문. 한국과학기술원
7. 박차식, 박 경우, 권오경 (2011), “열원에 따른 열펌프의 성능 비교 및 경제성 평가” 한국지열에너지학회 논문집, Vol. 7, No. 1, pp. 23-31.
8. 박한솔 (2010), ″불포화 특성을 고려한 국내 화강 풍화토의 열전도도에 관한 연구″, 한국과학 기술원 대학원 석사학위 논문.
9. 박현구, 박한솔, 이승래, 고규현 (2012), “화강풍화토의 열전도도 산정에 대한 연구” 대한토목학회 논문집, 제32권, 제2C호, pp. 69-77
10. 박현준 (2006), “광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 구조물의 동특성 추정과 손상 검색”, 한국과학기술원 대학원, 석사학위논문
11. 산업자원부 (2005), “국내 지하 열 자원 활용기술 개발의 중장기 계획”, 최종보고서.
12. 안은영, 김성용, 송윤호 (2005), 지열자원 활용에 대한 사적, 공공적 관점에서의 비용편익분석, 한국지구시스템공학회지, Vol. 42, No. 4. pp. 318-329.
13. 윤석, 박스칸, 박현구, 고규현, 이승래 (2011), “이층지반과 단일지반의 열전달 거동 특성 평가”, 한국지열에너지학회 논문집 Vol. 7, No.2, pp. 43-50.
14. 윤석, 이승래, 박현구, 박스칸 (2012), “코일형 지중열교환기를 이용한 지반의 열전도도 산정” 대한토목학회 논문집, 제32권, 제5C호, pp. 177-183.
15. 이세균, 우정선, 노정근. (2005). “지중열원 열펌프시스템의 성능해석”, 한국태양에너지학회 논문집, 제 25권, 4호.
16. 이승래, 박현구, 박한솔, 고규현, 윤석 (2012), ″화강 풍화토의 열전도도 산정에 대한 연구″, 대한토목학회논문집.
17. 이승래, 윤석, 박현구, 박스칸, NV Nikhil (2012) ″코일형 지중열교환기의 피치 간격에 따른 열전달 거동 분석“ 한국지반공학회 봄학술 발표회, 639-644.

18. 인천국제공항 (2010), 신・재생에너지 도입 타당성 분석용역 보고서.
19. 임효재, 공형진 (2010), “지중 유효 열전도도 측정방법 및 결과 분석”, 지열에너지저널, 제6권, 제1호, pp. 39-44.
20. 임효재, 공형진, 강성재, 최재호 (2011), “지중열교환기 설치조건이 지중 유효 열전도도와 보어홀 열저항에 미치는 영향”, 설비공학논문집, 제 23권, 제 2호, pp. 95-102.
21. 조정식, 손병후 (2009), “지열원 열펌프 이용 학교건물 냉난방시스템의 경제성 고찰” 한국지열에너지학회 지열에너지저널, 제 5권, 제 4호, pp. 16-22.
22. 지열인력양성센터. (2011). “지열설계사”, 건기원.
23. 한국형 지중 열교환기 최적설계 패키지 개발(2007), 산업자원부
24. 한정상, 한규상, 한혁상, 한찬 (2004), “친환경 대체에너지인 천부 지중 열을 이용한 지열펌프 냉난방 시스템”, 한림원.
25. 한정상, 한혁상, 한 찬. (2010). “지열 에너지 - 지열냉난방, 지열발전”, 한림원.
26. 현지형 지중열전도도 예측기술 개발(2003), 산업자원부
27. 에너지파일을 활용한 변전소 냉난방 표준설계 시스템 개발(2013), 전력연구원.
28. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE (1997), Handbook of Fundamentals, Chapter 26, pp. 47-49, Atlanta, GA.
29. Anil Misra and Shiping Huang(2011),"Effect of Loading Induced Anisotropy on the Shear Behavior of Rough Interfaces", Tribology International Vol.44, Issue 5, pp. 627 - 634
30. Arslan, U., Huber, H. (2013). “Numerical Back-Analysis of Geothermal Laboratory Tests with Forced Groundwater Flow”, Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 11-13, 2013 SGP-TR-198.
31. Bandos, T, Montero, A, Fernandez, E, Santander, J, Isidro, J, Perez, J, Fernandez de Cordoba, P and Urchueguia, J (2009). “Finite line-source model for borehole heat exchangers: effect of vertical temperature variations,” Geothermics, Vol. 38, pp 263 - 270.
32. Barcenilla, J. R., Nutter, D. W., and Couvillion, R. J., 2005. "Effective Thermal Conductivity for Single- Bore Vertical Heat Exchangers with Groundwater Flow", ASHRAE Transactions - Research, 111(2), 4807.
33. Baudoin, A (1988). Stockage intersaisonnier de chaleur dans le sol par batterie d'echangeurs baionnette verticaux: modele de predimensionnement, Ph.D. Thesis, Universite de Reims, France.
34. Bennet, J., Claesson, J., Hellstrom, G., (1987). “Multipole method to compute the conductive heat flows to and between pipes in a composite cylinder”, Notes on Heat Transfer 1987;3:1-42.
35. Blackwell JH. Misener AD. Approximate solution a transient heat flow problem.

Proc Phys Soc 1951;A64:1132-3.
36. BLOCON, 2008, EED 3.0 - Earth Energy Designer
37. Bose, J (1991). Design and Installations Standards, International Ground Source Heat Pump Association, Stillwater.
38. Brandon, T.L. and Mitchell, J.K. (1989), "Factors Influencing Thermal Resistivity of Sands", Journal of Geotechnical Engineering 115 (12):1683-1698.
39. Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C. (1946). "Conduction of heat in solids", Claremore Press, Oxford.
40. Carslaw, H and Jaeger, J (1947). Conduction of Heat in Solids, Oxford.
41. Cengel, Y. A. and Ghajar, A. J.,2012, Heat and Mass Transfer - Fundamentals and Applications, McGraw-Hill, New York, NY.
42. Claesson J. and Hellstrom, G.(2011)."Multipole method to calculate borehole thermal resistances in a borehole heat exchanger", HVAC&R Research, Vol. 17(6), 895-911.
43. Clauser, C and E. Huenges, (1995), "Thermal Conductivity of Rocks and Minerals", Rock Physics and Phase Relations, Ed. T. Ahrens, AGU.
44. Comsol Inc. Comsol Multiphysics ver 4.3a. USA; 2012.
45. Côté, J., and Konrad, J.M. (2005), "A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials", Canadian Geotechnical Journal, 42(2): 443 - 458. doi:10.1139/t04-106.
46. Cui, P, Li, X, Man, Y and Fang, Z (2011). "Heat transfer analysis of pile geothermal heat exchangers with spiral coils," Applied Energy, Vol. 88, pp 4113-4119.
47. De Vries, D.A. (1952), "The Thermal Conductivity of Soil", Mededelingen van de Landbouwhogeschool te Wageningen 52 (1):1-73, translated by Building Research Station (Library Communication No.759), England.
48. Diao, N., Li, Q., Fang., Z. (2004). "Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection.", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 43, pp.1203-1211.
49. Diersch, H.G., Bauer, D., Heidemann, W., Rühaak, W., Schätzl, P. (2011) Finite element modeling of borehole heat exchanger systems: Part 1. Fundamentals. ;Computers & Geosciences, 1122-1135
50. Domenico, P.A., and V.V. Palciauskas. 1973. Theoretical analysis of forced convective heat transfer in regional groundwater flow. Geological Society of America Bulletin 84, 3803 - 3814.
51. Esch, D. C. (2004), "Thermal Analysis, Construction and Monitoring Methods for Frozen Ground", Vol.492 Resteon, VA: American Society of Civil Engineers.
52. Eskilson (1987). Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes, Ph.D. Thesis, University of Lund, Sweden.

53. European Geothermal Energy Council. GROUND SOURCE HEAT PUMP: A GUIDE BOOK, Brussel, 2008.
54. Farouki, O.T. (1986), "Thermal properties of soils", Clausthal-Zellerfeld, Germany: Trans Tech Publications.
55. Fredlund, D. G., A. Xing, and S. Huang (1994), "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve", Canadian Geotechnical Journal., 31: 533-546.
56. Fujii, H., Itoi, R., Fujii, J., and Uchida, Y. 2005. Optimizing the design of large-scale ground-coupled heat pump systems using groundwater and heat transport modeling, Geothermics, 34, 347 - 364.
57. Gaia Geothermal. Ground Loop Design Software, GLD2012. USA.
58. Gemant, A. (1952), "How to Compute Thermal Soil Conductivities", Heating, Piping, and Air Conditioning 24 (1):122-123.
59. Gu. Y. and O'Neal, D.L. (1998). "Development of an Equivalent Diameter Expression for Vertical U-Tubes Used in Ground-Coupled Heat Pumps", ASHRAE Transactions, Vol. 104, 347-355.
60. Harlan, RL and J. F. Nixon (1978), "Ground thermal regime", Chapter 3 in Geotechnical Engineering for Cold Regions, McGraw-Hill Book, New York, N.Y.
61. Hart, G.K. and Whiddon, W.I. (1984), "Ground Source Heat Pump Planning Workshop, Summary of Proceedings", EPRI Report RP 2033-12. Palo Alto: Electric Power Research Institute.
62. Hellstrom G. Burkhard S. (2000), EED (Earth Energy Designer) User's manual. Sweden.
63. Horai, K. (1971), "Thermal conductivity of rock-forming minerals", Journal of Geophysical Research, Vol. 76, pp. 1278-1307.
64. Incropera, F. and Dewitt, D. (2008). "Heat Transfer", sixth edition, John Wiley and Sons, New York.
65. Ingersoll, L and Plass, H (1948). "Theory of the ground pipe heat source for the heat pump," Piping and Ari conditioning, Vol. 20, pp 119-122.
66. Ingersoll, L, Zobel, O and Ingersoll, A (1954). Heat Conduction with Engineering Geological and other Applications, McGraw-Hill, New York.
67. Ingersoll, L.R., Zobel, O.J. (1954). "Heat conduction with Engineering Geological and other Applications", Mc Graw-Hill, New York.
68. International Ground Source Heat Pump Association (IGSHPA), (1988), Closed-loop/ground-source Heat Pump Systems. Installation guide (National Rural Electric Cooperative Association(NRECA) Research project 86-1). IGSHPA, Oklahoma State University, Stillwater, OK.

69. Jalaluddin, A. Miyara, K. Tsubaki, and K. Yoshida, 2010. Thermal Performances of Three Types of Ground Heat Exchangers in Short-Time Period of Operation, International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, West Lafayette, Indiana, USA
70. Johansen, O. (1975), "Thermal Conductivity of Soils". Ph.D. thesis, Trondheim, Norway, (CRREL Draft Translation 637, 1977) ADA 044002.
71. Jun, L., Xu, Z., Jun, G. Jie, Y. (2009). "Evaluation of heat exchange rate of GHE in goethermal heat pump systems." Renewable energy, Vol.34, pp.2898-2904.
72. Kavanaugh, S. (1995). "A design method for commercial ground-coupled heat pumps", ASHRAE Transactions Vol. 101, pp.1088-1094.
73. Kavanaugh, S. (2010) "Ground Source Heat Pump System Designer - GshpCalc Version 5.0 - An Instruction Guide for Using a Design Tool for Vertical Ground-Coupled, Groundwater and Surface Water Heat Pumps Systems", Energy Information Services.
74. Kavanaugh, S., Rafferty., K. (1997). "Ground-Source Heat pumps : Design of Geothermal systems for Commercial and Institutional Buildings", ASHRAE, USA.
75. Kersten, M.S. (1949), "Thermal Properties of Soils". Bulletin 28, Engineering Experiment Station, Minneapolis: University of Minnesota.
76. Laloui, L., Nuth, M., Vulliet, L. (2006). "Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.30, pp.763-781.
77. Lewis, R.W., and Schrefler, B.A. (1998). "The finite element method in the static and dynamic deformation and consolidation of porous media", New York, John Wiley.
78. Man, Y, Yang, H, Diao, N, Liu, J and Fang, Z. (2010), "A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchangers," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, pp 2593 - 2601.
79. Marcotte, D., Pasquier, P., Sheriff, F., Bernier, M. (2010). "The importance of axial effects for borehole design of geothermal heat-pump systems", Renewable energy, Vol.35, pp.763-770.
80. Molina-Giraldo, N., Blum, P., Zhu, K., Bayer, P., Fang, Z. (2011). "A moving finite line source model to simulate borehole heat exchangers with groundwater advection", International Journal of Thermal Sciences, Vol.50, pp.2506-2513.
81. National Renewable Energy Laboratory(NREL), 2004, Projected Benefits of Federal Energy Efficiency and Renewable Energy Programs FY2005-FY2050, U.S. Department of Energy, p. 384.
82. Ngoc Bao Vu., Seung Rae Lee., Skhan Park., Seok Yoon., and Han Byul

Kang.(2012)."Evaluating Borehole Thermal Resistance of Single U-type, Double U-type and Triple U-type Heat Exchangers by Equivalent Diameter Method" , 25th KKCNN Symposiumon Civil Engineering, Busan, KOREA.

83. Ngoc Vau Bu. (2013). "Life Cycle Cost Analysis of Ground-Coupled Heat Pump Systems including Several Types of Heat Exchangers", M.S. Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Republic of Korea.
84. Oklahoma State University. (2007). "GLHEPRO 4.0 For Windows - User's Guide", International Ground Source Heat Pump Association.
85. Olivella, S., Gens, A., Carrera, J., and Alonso, E.E. (1996). "Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media", Engineering Computations, Vol. 13, pp. 87-112.
86. Pahud, D. (2007). "PILESIM2 - Simulation Tool for Heating/Cooling Systems with Energy Piles or multiple Borehole Heat Exchangers - User Manual", ISAAC-DACD-SUPSI.
87. Park, H., Lee, S., Yoon, S., Choi, J. (2013). "Evaluation of thermal response and performance of PHC energy pile: Field experiments and numerical simulation", Applied Energy, Vol.103, pp.12-24.
88. Park, S. (2012). "Development and verification of analytical model and its solution for spiral coil type ground heat exchangers", Ph.D. Dissertation, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Republic of Korea.
89. Philippe, M., Bernier, M., Marchio, D. (2009). "Validity ranges of three analytical solutions to heat transfer in the vicinity of single boreholes", Geothermics, Vol.38, pp.407-413.
90. Rees, SW., Adjali, M., Zhou, Z., Davies, M., Thomas, HR. (2000). "Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures", Renewable & Sustainable Energy Reviews, Vol.4, pp.213-265.
91. Remund, P. (1999). "Borehole Thermal Resistance : Laboratory and Field Studes". ASHRAE Transactions, Vol. 105, pp. 439-445.
92. RETScreen International Website: www. retscreen.net
93. Rybach and Gord (2005), "Country Update for Switzerland", World Geothermal Conference 2005, p. 11.
94. Sutton, MJ., Nutter, D., Couvillion, R. (2003). "A Ground Resistance for Vertical Bore Heat Exchangers with Groundwater Flow", Journal of Energy Resources Technology, Vol.125, pp.183-189.
95. Tarnawski, V. R., Leong, W. H., Momose, T., Hamada, Y. (2009), "Analysis of ground source heat pumps with horizontal ground heat exchangers for northern Japan, Renewable Energy, Vol. 34, pp. 127-134.

96. Wagner, V., Blum, P., Kübert, M., & Bayer, P. (2013). Analytical approach to groundwater-influenced thermal response tests of grouted borehole heat exchangers. Geothermics, 46, 22-31.
97. Yavuzturk, C.,Spitler,J.,Rees,S.,1999.A transient two-dimensional finite volume model for the simulation of vertical u-tube ground heat exchangers. ASHRAE Transactions 105(2),465 - 474.
98. Yoon, S., Lee, S., Go, G., Jianfeng, X., Park, H., Park, D. (2014). "Thermal transfer behavior in two types of W-shape ground heat exchangers installed in multilayer soils", Geomechanics Engineering, Vol.6, No.1, pp.79-98.
99. Zeng, H., Diao, N., Fang, Z. (2002). "A finite line-source model for boreholes in Geothermal Heat Exchangers", Heat Transfer-Asian Research, Vol.31, pp.558-567.
100. Zhang, W., Yang, H., Lu, L., Fang, Z. (2013). "The analysis on solid cylindrical model of foundation pile ground heat exchangers with groundwater flow", Energy, Vol.55, pp.417-425.