creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

碩士學位論文

지열원 히트펌프 성능 예측 및 검증 기술에 관한 연구

濟州大學校 大學院

機械工學科

金　容　煥

2006年　12月

지열원 히트펌프 성능 예측 및 검증 기술에 관한 연구

指導敎授　玄　明　擇

金 容 煥

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함

2006年　12月

金容煥의 工學碩士學位 論文을 認准함

審査委員長＿＿＿＿＿＿＿＿印
委　　員＿＿＿＿＿＿＿＿印
委　　員＿＿＿＿＿＿＿＿印

濟州大學校 大學院

2006年　12月

A study of geothermal heat pump performance prediction and assessment technique

Yong-Hwan Kim
(Supervised by Professor Myung-Taek Hyun)

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

2006 . 12

Department of Mechanicl Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES ····· iii

LIST OF TABLES ····· v

NOMENCLATURE ····· vi

SUMMARY ····· vii

Ⅰ. 서론 ····· **1**

1-1 연구배경 ····· 1

1-2 연구동향 ····· 2

1) 국외동향 ····· 2

2) 국내동향 ····· 3

1-3 연구목적 ····· 3

Ⅱ. 시스템 이론 ····· **4**

2-1 지열원 히트펌프 ····· 4

2-2 토양의 주요 열물성값 ····· 7

1) 열전도율(Thermal conductivity) ····· 7

2) 열확산율(Thermal diffusivity) ····· 8

3) 열저항율(Thermal resistance) ····· 8

2-3 지중 온도 예측식 ····· 8

1) Krarti 지중 온도 예측식 ····· 9

2) Spitler 지중 온도 예측식 ····· 11

Ⅲ. 실험 장치 및 방법 ····· 12

3-1 지중 열교환 유효도 측정 기술 ····· 12

1) 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치 ····· 14

2) 열전도율 측정 ····· 18

3-2 토양 열적 특성 측정기술 및 평가 실험 ····· 19

1) 토양 열적 특성 측정장치 ····· 19

2) 토양 열적 특성 측정이론 ····· 22

3) 토양 열적 특성 측정장치 작동방법 ····· 23

3-3 토양의 수분함량 측정법 ····· 24

Ⅳ. 실험 결과 및 고찰 ····· 26

4-1 100m 보어홀의 실제측정값과 지중 온도 예측값 비교 ····· 26

1) 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치에 의한 지중 온도 변화 선도 ····· 28

2) Krarti & Spitler 지중 온도 예측식에 의한 지중 온도 변화 선도 ····· 34

4-2 토양의 열적 특성 파악 ····· 34

Ⅴ. 지열원 히트펌프 성능예측 기술 ····· 44

5-1 지중 열교환기 설계 프로그램 ····· 44

5-2 RETScreen 지중 열교환기 설계 프로그램 ····· 45

5-3 RETScreen 지중 열교환기 설계 프로그램 구현방법 ····· 48

Ⅵ. 결 론 ····· 55

Ⅶ. 참고문헌 ····· 57

LIST OF FIGURES

Fig. 2-1 The principal of geothermal heat pump operation (left: cooling mode, right: heating mode) ····· 4
Fig. 2-2 Ground Coupled Heat Pump, GCHP ····· 6
Fig. 2-3 Ground Water Heat Pump, GWHP & Surface Water Heat Pump, SWHP ····· 6
Fig. 2-4 Temperature variation of surface and underground ····· 10
Fig. 3-1 High speed wireless ground heat exchange effectiveness tester ····· 13
Fig. 3-2 Blackdiagram of high speed wireless ground heat exchange effectiveness tester ····· 17
Fig. 3-3 Software for high speed wireless ground heat exchange effectiveness tester ····· 17
Fig. 3-4 The appearance of soil thermal property tester controller & sensors (left: soil thermal property tester controller, right-up: 6cm sensor, right-center: 10cm sensor, right-down: 30mm dual sensor) ····· 21
Fig. 3-5 The appearance of soil thermal property tester measurement ····· 23
Fig. 3-6 The appearance of soil vs depth ····· 25
Fig. 4-1 Temperature profile of 100m deep borehole exchanger using PT-87 and PT-35 ····· 27
Fig. 4-2 Temperature profile of 50m deep borehole exchanger ····· 27
Fig. 4-3 Twenty temperature approximations of the soil ····· 32
Fig. 4-4 Soil temperature variation according to Spitler equation ····· 32
Fig. 4-5 Soil temperature variation according to modified Krarti equation ····· 33
Fig. 4-6 Annaul soil temperature variation according to modified Krarti equation (100m deep) ····· 33
Fig. 4-7 Variation of the soil conductivity vs depth ····· 41
Fig. 4-8 Variation of the soil diffusivity vs depth ····· 41
Fig. 4-9 Variation of the soil resistance vs depth ····· 42

Fig. 4-10 Variation of the soil specific heat vs depth ····· 42
Fig. 4-11 Variation of the water content vs depth ····· 43
Fig. 5-1 RETScreen geothermal exchange design software ····· 46
Fig. 5-2 RETScreen geothermal exchange design software flow-chart ····· 47
Fig. 5-3 Energy model worksheet ····· 49
Fig. 5-4 Heating and cooling load worksheet ····· 50
Fig. 5-5 Cost analysis worksheet ····· 51
Fig. 5-6 Green-house gas(GHG) emission reduction analysis worksheet ····· 52
Fig. 5-7 Life cycle cost ····· 53

JEJU NATIONAL UNIVERSITY · SINCE 1952 · 제주대

LIST OF TABLES

Table 3-1 Specifications of high speed wireless ground heat exchange effectiveness tester ····· 16

Table 3-2. Specification of soil thermal property tester ····· 22

Table 4-1 Input value ····· 29

Table 4-2 Final set of parameter according to Spitler Equation(t_o=30) ····· 30

Table 4-3 Final set of parameter according to Spitler Equation(t_o= 79) ····· 30

Table 4-4 Final set of parameter according to Krarti Equation(16m deep) ····· 31

Tabel 4-5 Final set of parameter according to Krarti Equation(100m deep) ····· 31

Table 4-6 Soil thermal properties ····· 35

Table 4-7 The comparison of thermal conductivity ····· 36

Table 4-8 The comparison of thermal diffusivity ····· 37

Table 4-9 The comparison of thermal resistance ····· 38

Table 4-10 The comparison of specific heat ····· 39

Table 4-11 The comparison of water content ····· 40

Table 5-1 Geothermal exchanger design program ····· 44

Table. 5-2 Verification of RETScreen reliability ····· 54

NOMENCLATURE

Roman

A : size of area [m²]

Amp : the above ground temperature fluctuations [℃]

Amp_g : the amplitude of the soil temperature fluctuations at a certain depth [℃]

C : specific heat [mt/㎥k]

k : thermal conductivity [W/mK]

L : thickness [m]

q_{loc} : local terrestrial heat flow value [W/m²]

Q : heat transfer rate [W]

R : thermal resistance [mk/w]

t_y : the day of the year [day]

t_0 : the phase constant [day]

T_g : geothermal temperature [℃]

T_a : annual surface soil temperature [℃]

T_m : mean annual surface soil temperature [℃]

x : depth [m]

Greek Symbol

α : thermal diffusivity [m²/day, m²/s, ㎟/s]

ρ : density [kg/m³]

ω : angular frequency [rad/s]

Summary

In nowadays Ground Source Heat Pump(GSHP) installation has been increased by average 10~30% yearly.[1]

The development of geothermal heat pump system application field like IEA(International Energy Agency) HP(Heat Pump) Annex 28, 29("heat pump performance evaluation technology", "heat pump marketplace problem") has gotten more expense and energy saving than conventional heat pump system.

GSHP system used for heating and cooling of residential and non-residential facilities that relatively used approximately 10~20℃, 50~200m deep. A comparison between a geothermal heat source system with atmospheric heat source system, shows one of advantage that geothermal heat source system temperature range more stable than atmospheric heat source system.

Although geothermal heat source system requires high initial cost, it reduces management and maintenance cost for Life Cycle Cost(LCC), which can be obtained by effective design.

The key point of geothermal technology depends on steadiness of technology, deveelopment of design technology and infrastructure installment, reaction of heat and part manufacturer.

As known the geothermal energy can be used in different fields such as: space facility heating/cooling, hot water and crop dry, argricultural green house, government public building heating/cooling etc.

The latest researches trends are focusing on soil thermal conductivity, geothermal heat pump system life cycle cost performance evaluation, reduction of the initial cost of the hybrid system and development of the geothermal heat pump system design.

This study is to develop a model to predict the soil temperature variation in KIER using its geothermal properties, such as, thermal conductivity and diffusivity.

Soil depth temperature variation is very important in the design of a proper GSHP

system. This is because the size of the borehole depends on the soil temperature distribution, and this can decrease GSHP system cost. For given the thermal diffusivity and conductivity are known, the soil temperature can be predicted by either the Krarti equation or the Spitler equation. Then a comparison and analyzation of the Krarti equation and Spitler equation data with the measured data by high speed wireless ground heat exchange effectiveness tester can be performed.

The thermal conductivity, thermal diffusivity, thermal resistance and specific heat are measured by soil thermal property tester to help the limitation of high speed wireless ground heat exchange effectiveness tester measurement.

Finally, case study has been carried out to study a geothermal heat pump and its economic analysis by using RETScreen which is a renewable energy economic design tool.

Ⅰ. 서 론

1-1 연구배경

최근 화석연료의 고갈, 불안한 중동권 정세에 따른 고유가는 국내 경제에 막대한 타격을 주고 있고 그 영향은 더욱 크게 다가올 것이라 예상된다. 또한 도쿄 기후변화 협약과 관련하여 자발적인 온실 가스 자체 저감 계획을 수립하고 시행함으로써 국제적인 통상 규약인 ISO 1400을 의무적으로 준수해야 한다. 이러한 에너지 및 환경문제를 해결하기 위한 방안으로 신재생에너지 개발에 많은 관심을 보이고 있고, 국내에서 시행되고 있는 에너지 개발 및 대체에너지 연구 개발 사업 등은 그 중요성을 잘 설명해주고 있다.

현재 우리나라의 신재생에너지 분야에 대한 기술개발 투자는 대략적으로 미국의 1/52, 일본의 1/28 수준이다. 각 국의 GDP를 감안하더라도 선진국의 1/2~1/3 수준에 불과한 실정으로 신재생에너지 개발과 보급의 활성화를 위해서는 보급 확대 프로그램과 사업비의 대폭적인 확대가 필수적이라 할 수 있다. 아울러 신재생에너지 기술개발 보급과 관련, 범부처적인 협력체계 구축과 기술 획득의 실용화, 시스템화가 절실하다. 이와 관련하여 정부는 지속가능하고 재생 가능한 환경친화적 청정에너지인 신재생에너지 자원의 개발 및 보급에 따른 안정적인 에너지자원 확보와 환경 친화적인 선진형 에너지 구조로의 전환을 위해 2011년 기준 총 에너지 사용의 5%를 신재생에너지로 공급하는 목표를 설정한 후 기술 개발의 투자 효과 향상 및 성능 검증, 저가로 보급 가능한 수요자 중심의 기술 개발을 추진하고 있다.[2]

이와 관련하여 최근 연중 안정적인 냉/난방에너지를 공급할 수 있는 지열원 히트펌프(GSHP, Ground Source Heat Pump)가 주목받고 있다. 미국의 환경청 EPA(Environmental Protection Conditioning)는 지열원 히트펌프가 현존하는 공간 냉난방시스템 중에서 가장 효율이 높고, 친환경적이며, 비용을 크게 절감시켜주는 시스템이라고 밝히고 있다. EPA에 의하면 일반 전기히트펌프에 비해 40~

50% 가량의 에너지 절감이 가능하다. 또한 전열기를 이용한 난방과 에어컨을 사용하는 경우와 비교하면 70% 이상의 에너지를 절약할 수 있고 이를 통한 온실가스 배출절감 효과도 매우 높아서 미국과 유럽에서는 국가적으로 지원 보급에 노력하고 있다.[3] 이러한 지열원 히트펌프 연구를 위해 무엇보다 지중열 열전도율과 열확산율, 열저항율과 같은 토양의 열적 특성을 파악하고 이를 통해 지중의 온도 분포를 미리 알고 있어야 한다. 이에 본 논문에서는 실증실험을 통하여 지중의 열적 거동을 예측할 수 있는 모델을 개발하고 검증하고자 한다.

1-2 연구동향

1) 국외동향

국외의 경우 유럽을 포함한 북미, 일본 등의 선진국에서는 이미 지열을 이용한 각종 열원 시스템에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 특히 시스템과 관련하여 미국은 U.S. Department of Energy와 NREL의 지원아래 Geothermal Energy Program이 활발히 진행되고 있으며, 미국내 대학(Oklahoma State Univ)과 연구소(Geothermal Bore Technologies)등에서도 미국정부의 지원 아래 보급형 히트펌프 개발 및 열전도율 측정기를 위한 연구가 활발히 이뤄지고 있다.[3]

지중 열전도율과 열확산율은 지열원 히트펌프 설계에 중요한 변수들이다. 이와 같은 2가지 변수는 지중 열교환기를 매설하는 현지에서 특정한 장치를 이용하여 측정하고 분석을 통하여 얻을 수 있으며, 신뢰할 수 있는 수준으로 이용 가능하다. 현재 이러한 기술은 차량을 이용하여 이동이 가능한 차량 형식의 현지 지중 열전도율 측정기로 1995년에 처음으로 미국과 스웨덴에서 각각 독자적으로 개발된 이후 OSU mobile 장치 및 GBT Model등과 같은 모델로 개선되는등 2002년도 10월까지 현지 지중 열전도율 측정장치를 제작하거나 측정 실적이 있는 국가는 스웨덴과 미국을 포함하여 12개 이상 국가로 추정되고 있다. 최근 스위스를 비롯한 유럽 선진국에서는 기존의 지중 열전도율 측정에 대한 보완 및 개선을 위한 고속 Ground thermal conductivity tester 장치의 연구를 통해 보급이 활성화 되고 있다.[4]

2) 국내동향

국내 지열이용 시스템은 2000년도에 최초 도입된 이후 2004년 기준 64개소, 총용량 2,743RT의 시설들이 설치되었고 지속적인 증가를 보이고 있다. 그러나 아직은 국내 지열에너지의 효율적인 이용 방법이 미흡한 수준으로 국내에서의 지열원을 활용한 기술 개발과 보급에 대한 많은 투자와 선진국의 사례를 통한 시스템 구현 및 설계 기술을 확보하여 점차 국내 시장에 보급되어야 할 것이다.

최근 2005년 한국에너지기술연구원(KIER)은 국내에서 개발 및 적용 사례가 없는 지열원 히트펌프 최적 설계용 전자식 지중 열교환 유효도 측정 기술인 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치와 토양 열적 특성 측정장치를 이용하여 열전도율 시험기술과 시스템 관련 기술이 선행연구로 이뤄지고 있다.

1-3 연구 목적

지열원 히트펌프(GSHP, Ground Source Heat Pump)는 주거 및 비주거 시설의 냉난방을 위해 지하 50～200m의 약 10～20℃ 열을 상대적으로 활용하여 건물 냉난방에 사용하는 시스템으로 대기열원 시스템과 비교하였을 때 훨씬 안정적이고 신뢰할 수 있는 온도범위를 가질 수 있는 큰 장점을 가지고 있다. 그러나 비교적 높은 초기 설치비용이 요구되기 때문에 효율적인 설계를 통해 초기 설치비용을 최소화해야 한다.

본 연구는 이러한 지열원 히트펌프의 초기 설치비용을 최대한 줄이기 위해 토양의 열적 측정을 통한 지중열의 온도분포 및 변화를 예측하여 이를 검증하였다. 이와 같은 연구는 보어홀 길이의 정확한 설계, 지열원 히트펌프 성능 향상에 기여할 것으로 기대된다.

Ⅱ. 시스템 이론

2-1 지열원 히트펌프

지열원 히트펌프는 300m이내 10~20℃ 범위의 지중, 지하수 및 지표수를 열원으로 이용하는 히트펌프 시스템을 의미한다. Fig. 2-1에 제시한 것처럼 냉매가 지중 순환회로 내에서 유동하고 있는 지중 순환수나 지하수와 간접적으로 접촉 순환할 때 이들로부터 지열을 추출하거나 방열하면서 필요한 냉난방에너지를 공급하는 작동원리를 갖는다.

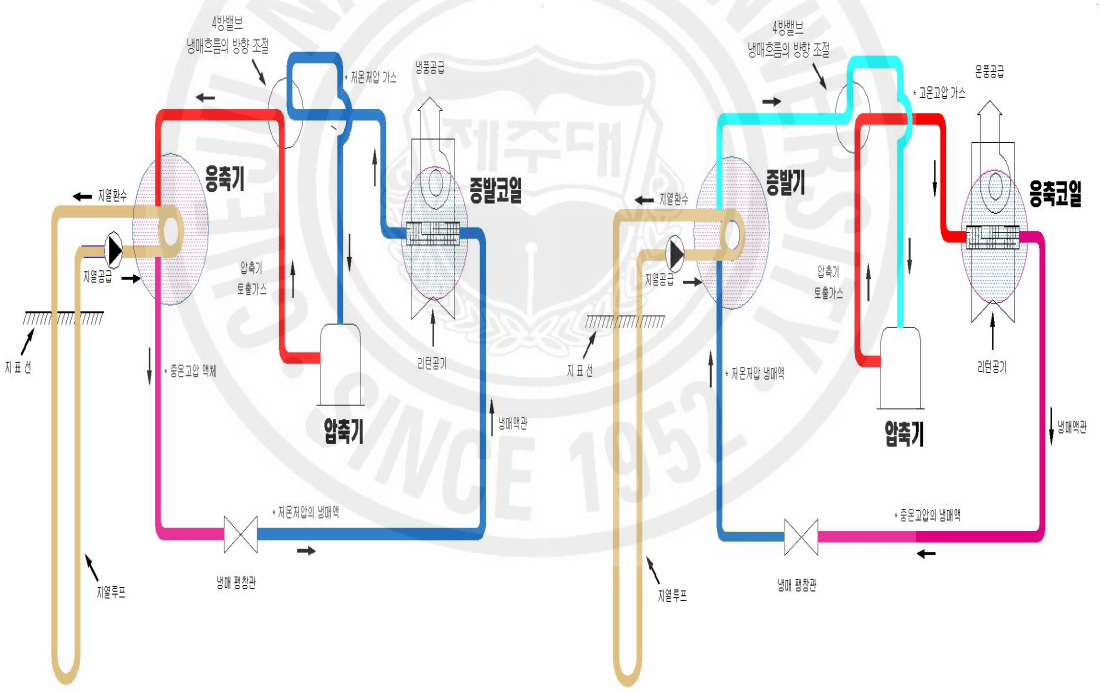


Fig. 2-1 The principal of geothermal heat pump operation
(left: cooling mode, right: heating mode)

이러한 지열원 히트펌프의 종류에는 Fig. 2-2와 같이 토양의 지표면이나 지중의 열을 이용하기 위해 수직 혹은 수평형으로 설치되어 밀폐된 루프내에 냉매를 순

환시키는 토양 이용 히트펌프(Ground Coupled Heat Pump, GCHP)와 Fig. 2-3과 같이 지하수를 대수층으로부터 채수하여 열원으로 이용하는 지하수 이용 히트펌프(Ground Water Heat Pump, GWHP), 지표수나 해수를 열원으로 이용하는 지표수 이용 히트펌프(Surface Water Heat Pump, SWHP)등이 있다. 그리고 기타로 인공연못이나 냉각탑을 갖는 하이브리드 지열원 히트펌프 (Hybrid Ground Source Heat Pumps, HGSHP)이 있다.

이와 같은 지열원 히트펌프는 온실가스를 위시한 유해특성 대기오염물질의 방출량을 55~60% 이상 저감하고, 지역에 따라 에너지 비용을 40~70% 이상 절감시켜 주는 특징을 갖는다. 비록 초기 설치비용이 고가이긴 하나 같은 용량의 다른 냉난방 시스템과 비교하였을 때 상대적으로 매우 빠른 상환기간을 갖는다. 또한 운영관리비가 매우 저렴하고 화재위험이 없으며, 기후 조건에 크게 구애받지 않고 언제, 어디서나 설치가 가능하고, 운영할 수 있는 차세대 프론티어 장치이다.

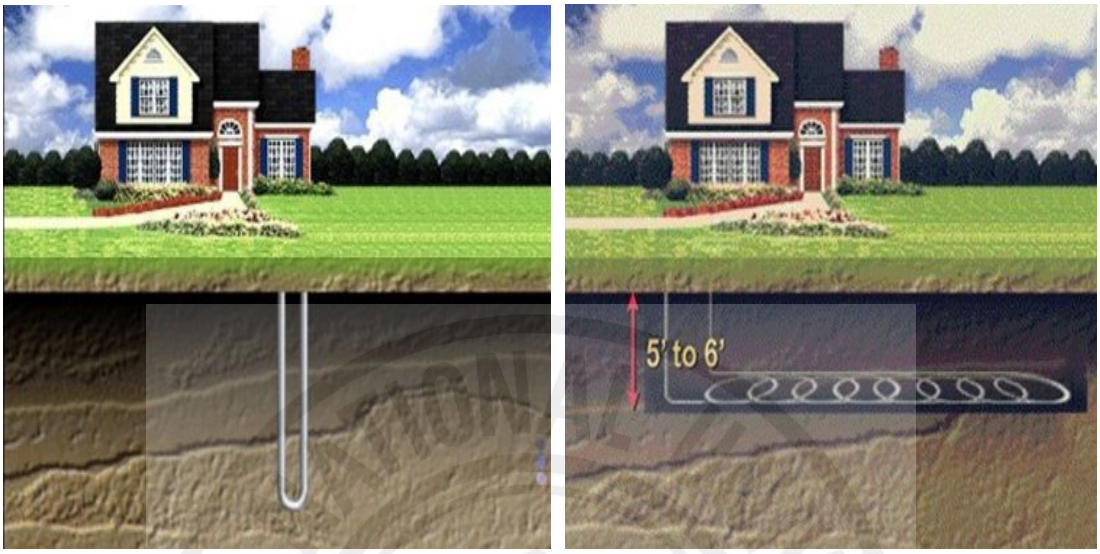


Fig. 2-2 Ground Coupled Heat Pump, GCHP

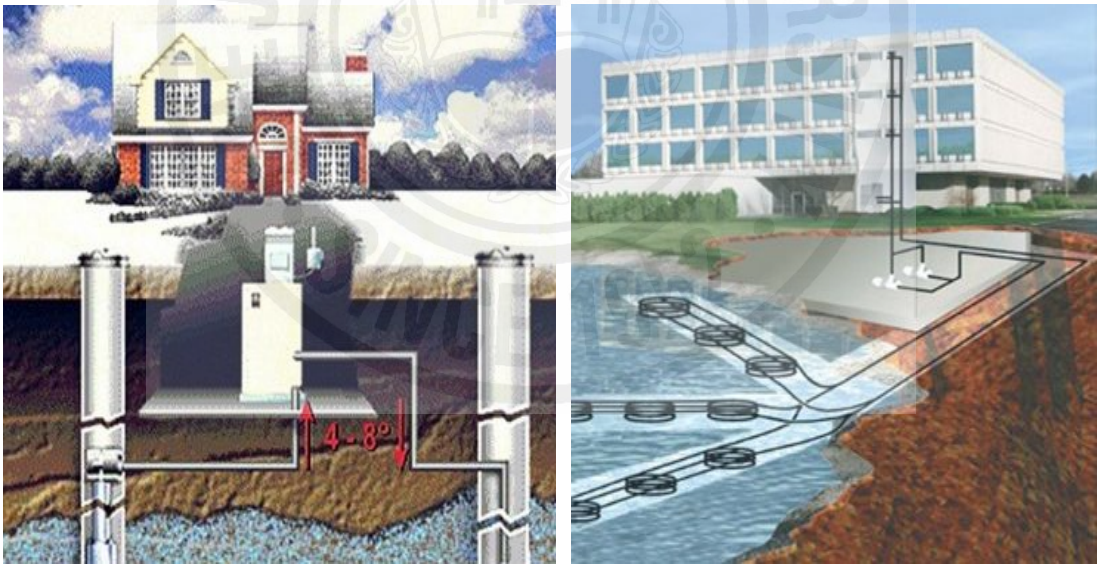


Fig. 2-3 Ground Water Heat Pump, GWHP
& Surface Water Heat Pump, SWHP

2-2 토양의 주요 열물성값

지열원 히트펌프 설치를 위한 설계 및 용량을 결정짓는 중요한 파라미터로 토양의 열전도율, 열확산율, 열저항율등의 열물성값등이 있고 다음과 같이 각 열물성치에 대해 간단히 설명하였다.[5]

1) 열전도율(Thermal conductivity)

열전도율은 어떠한 물질이 얼마나 빨리 열이 흐르는지를 나타내는 척도로서, 흔히 열을 전도할 수 있는 능력을 말한다. 일반적으로 어떠한 물질이 일정한 방향으로 단위시간, 단위거리, 단위온도동안에 흐르는 열에너지의 비율이다.

물질의 열전도율(k)을 구하는데 사용되는 수식으로 식(2-1)과 미분형태로 표시되는 식(2-2)를 사용한다. 이러한 식을 Fourier의 열전도 법칙이라고 하며 dT/dx는 온도 기울기이고, $T-x$선도에서의 온도곡선(x에 따른 T의 변화)에서 위치 x에서의 기울기를 나타낸다.

$$Q_{cond} = kA\frac{dT}{dx} \tag{2-1}$$

$$Q_{cond} = -kA\frac{dT}{dx} \quad (\Delta x \rightarrow 0) \tag{2-2}$$

위의 관계식은 어떤 방향으로의 전도 열전달률은 그 방향의 온도 기울기에 비례한다는 것을 나타내고 있다. 열은 온도가 감소하는 방향으로 전도되고, x가 증가함에 따라 온도가 감소하면 온도 기울기는 음이 된다. 따라서 양의 x방향으로의 열전달을 양으로 하기 위해 식(2-2)에서 음의 부호가 사용되었다.

2) 열확산율(Thermal diffusitivity)

열확산율(α)은 어떤 물질이 가지고 있는 열을 확산시켜 자신의 온도를 얼마나 빨리 변화시킬 수 있는가에 대한 지표로서, 물리적 의미로는 물질내부의 온도가 시간에 따라 변화하는 동안 물질내부에 진행되는 열의 전파와 관련되어 있다.

열확산율이 클수록 물질내의 열의 전파가 더욱 빠르게 진행됨을 의미하며 이와같은 열확산율(α)은 물질의 열전도율(k)과 밀도(ρ), 비열(c)의 관계식으로 나타낼 수 있으며 식(2-3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \tag{2-3}$$

3) 열저항율(Thermal resistance)

열저항율은 열전도를 방해하는 성질로서 균일한 물체 내부에서는 열전도와는 역수 관계에 있는 성질이라고 할 수 있으나 실제로는 경계면이나 접촉면에서의 성질을 말하는 경우가 많다. 여기서 열저항율(R)은 면의 두께(L)와 열전도율(k), 표면적(A)의 관계식인 식(2-4)로 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{L}{kA} \tag{2-4}$$

2-3 지중 온도 예측식

Fig. 2-4와 같이 지중은 일사량, 음영 등과 같은 외기의 영향에 의해 지표면과 가까운 일정깊이까지는 지표 온도의 영향을 받아 온도변화폭이 크고 깊은 지층으로 갈수록 온도변화폭이 작아짐을 예상할 수 있다.

본 연구에서는 지중 온도변화를 예측하기 위한 방법으로 지중의 열확산계수(α) 값을 이용하여 지중의 온도를 예측할 수 있는 Krarti 지중 온도 예측식과 Spitler 지중 온도 예측식을 사용하였고 그에 관한 관계식은 다음의 식(2-5)에 기초하였다.

$$T_g = T_m + Amp_g \tag{2-5}$$

식(2-5)에서 T_g(℃)는 예측 지중 온도이고 T_m(℃)은 지표면의 평균온도, Amp_g(℃)는 깊이에 따른 지중 온도 변동폭이다. 여기서 지중 온도 변동폭인 Amp_g는 다양한 수식으로 표현될 수 있으며 실질적인 지중 온도를 좌우한다. 예를 들어, 지표면에서 온도변동폭이 ±20℃라도 지표면밑의 30m 깊이에선 지중 온도 변동폭인 Amp_g에 의해 변동폭이 거의 없게 된다.

1) Krarti 지중 온도 예측식

Krarti 지중 온도 예측식은 복소수를 사용하여 Amp_g부분을 식(2-6)과 같은 식으로 표현하였다.[6,7]

$$T_g = T_m + Amp \bullet e^{(-\frac{(1+i) \bullet x}{D})} \tag{2-6}$$

이 식에서 Amp_g는 지중 온도변동폭, 열적 특성과 깊이에 대한 함수이며 Amp는 지표면 온도변동진폭(℃)이고, 지중 열 특성을 D($\sqrt{\frac{2\alpha}{w}}$)로 가정하였을 때 x는 요구되는 근사값의 깊이이다. 이는 Fig. 2-4에서 보여주고 있고 식(2-7)과 같이 표현할 수 있다.

$$-\frac{(1+i)}{D} = \sqrt{\frac{i \bullet w}{\alpha}} \tag{2-7}$$

여기서, α는 토양의 열확산계수(m²/s)이고 $i = \sqrt{-1}$, ω는 각진동수($\frac{radians}{s}$)이다.

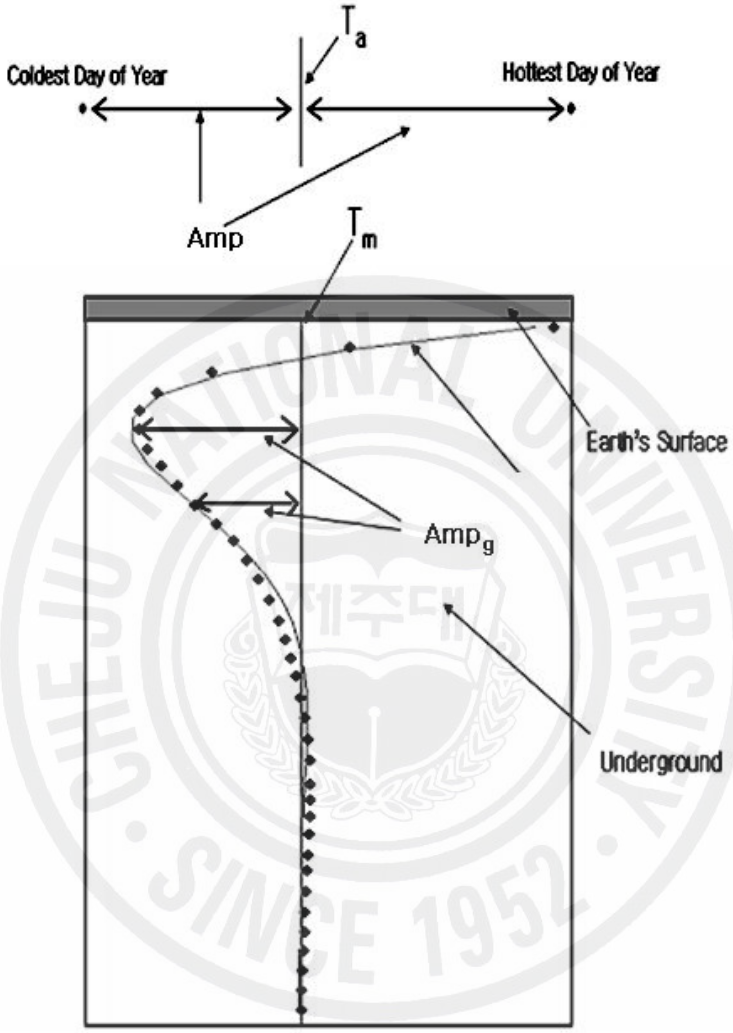


Fig. 2-4 Temperature variation of surface and underground

2) Spitler 지중 온도 예측식

Spitler 지중 온도 예측식은 복소수를 사용하지 않고 시간을 변수로 사용한다는 것을 제외하고는 Krarti 지중 온도 예측식과 비슷하다.

이 식 또한 식(2-5)에 대입하지만 여기서, Amp_g는 식(2-8)과 같다.[8]

$$Amp_g = Amp \cdot e^{(-x \cdot \sqrt{\frac{\pi}{365 \cdot \alpha}})} \cdot \cos(\frac{2\pi}{365}[t_y + t_o - \frac{x}{2}\sqrt{\frac{365}{\alpha \cdot \pi}}]) \qquad (2\text{-}8)$$

여기서, 열확산계수 α의 단위는 $\frac{m^2}{day}$이고, t_o는 시작점(만약 $t_o = 0$라면 1월 1일을 시작일로 사용한다.)을 설명하는 위상상수, t_y(day)는 t_o를 기준으로 일정시간만큼 지나 측정되어지는 연중일(day of the year)이다. 그러므로 만약 $t_o = 0$이고 $t_y = 4$라면, 이 식은 1월 5일의 지중 열을 예측할 것이고, 만약 $t_o = 10$이고 $t_y = 4$라면, 1월 15일의 지중 열을 예측할 것이다.

여기서 주목할 점은 좀 더 편한 수식을 위해 Spitler의 지중 온도 예측식에서 $T_g = ...[t_y - t_o - ...]$을 사용한 것을, 본 논문에선 $T_g = ...[t_y + t_o - ...]$으로 바꾸어 사용하였다. 그 이유는 12월 22일(1월 1일을 기준으로 역방향) 대신에 1월 11일(1월 1일을 기준으로 정방향)인 $t_o = 10$이 더 쉽게 풀이할 수 있기 때문이다.

Ⅲ. 실험 장치 및 방법

3-1 지중 열교환 유효도 측정 기술

계절과 깊이에 따른 지중 온도의 변화는 오늘날 지열 연구에 있어 매우 중요한 부분을 차지한다. 많은 지중 열전도 문제들은 지중 온도 특성이 균일하다는 조건에서 해결하거나 천공작업시 시료를 채취하여 측정하였다. 그러나 실질적인 지중 온도는 지하 깊이와 지표면 온도의 시간에 따른 변화에 영향을 받을 뿐만 아니라 지표면 위에서 발생하는 기후상태의 변화, 음영, 토양의 열확산계수, 지하수 유동 등에도 영향을 받는다. 이에 정확한 지중 온도를 예측할 수 있는 방법을 모색하고 이러한 요소들의 이해를 돕기 위해 지하수의 유무, 화학적인 구성, 공극률과 토양의 깊이에 따른 열물성에 관한 사전지식이 요구된다.

지중 온도 파악을 위해 많은 지중 열응답테스트가 이루어졌고 이들 대부분은 지중 열전도율과 보어홀 열저항으로 정의하여 사용하였다.[9] 공통적인 이론적 접근으로 사용되는 열응답테스트는 일차적으로 토양의 열전도계수와 유체와 토양 열저항에 의한 Line Source Model에 기초한다. 그러나 열응답테스트에는 열원/히트싱크와 지중에 주입되는 열원의 변화에 따른 한계가 있다. 그러므로 최소 48시간의 비교적 긴 테스트 시간을 갖는다.[10] 이에 본 연구에서는 Fig. 3-1과 같은 전자식 지중 열교환 유효도 측정기술인 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치를 이용하여 한국기술에너지연구원내 시추되어진 Borehole Heat Exchanger(BHE)의 온도를 측정하였다. 이 실험장치에 대한 설명은 다음과 같다.

Fig. 3-1 High speed wireless ground heat exchange effectiveness tester

1) 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치

본 실험에서 지중 온도 측정 수행을 위한 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치는 스위스 G사에서 제작되어진 전자식 지중 열교환 유효도 측정장치로 수압 100bar까지 견딜 수 있는 금속재질의 튜브내에 압력센서, 온도센서, 소형-데이터로거, 마이크로 프로세서가 구성되어 있고, Table 3-1에 명시되어진 기본 사양을 갖는다.[11]

위와 같이 설명되어진 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치의 핵심 구성요소로는 측정장치 내부에 설치되어진 아날로그/디지털 변환기, 마이크로 프로세서와 데이터 저장을 위한 메모리(EEPROM)가 있고, 측정이 완료된 후 컴퓨터 통신에 연결하여 측정된 데이터를 회수하고 보정해주는 커넥터가 있다. 측정된 데이터 수집 및 분석은 마이크로 엑셀 매크로로 구성된 전용 프로그램을 이용하여 측정 데이터(시간, 압력, 온도)를 읽을 수 있다. 또한 이 프로그램을 통해 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치의 EEPROM에 저장되어 있는 데이터를 자유롭게 삭제/회수가 가능하며 시간의 정확함을 보장하기 위해 컴퓨터 시간과 동일하게 맞출 수도 있다. Fig. 3-2는 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치의 회로도로 개략적인 작동원리를 보여주고 있다. 압력과 온도를 위한 보정식은 식 (3-1)과 같은 이차방정식으로 나타낼 수 있으며 보정상수 a, b, c는 프로브에 저장되어 구성, 조립, 작동 후 측정을 바로 할 수 있다.

$$y = ax^2 + bx + c \tag{3-1}$$

이러한 전자식 지중 열교환 유효도 측정기술인 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정기를 이용하여 한국에너지기술연구원내 시추된 보어홀을 측정해 보았다. 측정된 데이터는 Krarti & Spitler 지중 온도 예측식으로 산출된 데이터와 비교하여 실제로 지중 온도 측정 및 온도분포 파악이 가능한지에 대하여 분석하였고, 이를 통해 비균질 토양 지층의 열적 예측모델을 개발/검증하였다.

초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치를 이용한 지중의 온도 및 압력 측정에 대해 간략히 설명하면, 보어홀내로 삽입된 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치는 U-tube 보어홀 열교환기의 바닥까지 내려가는 동안 3.5초 간격으로

온도와 압력을 측정한다. 여기서 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치가 보어홀의 바닥면까지 0.1m/s의 속도로 내려간다고 가정하면 U-tube의 깊이가 100m이므로 바닥면까지 도달하는 시간은 약 17분이 걸린다. 측정을 마친 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치의 회수를 위해 측정장치가 삽입된 보어홀 입구의 반대편에 물을 채워주고 소형펌프를 이용하여 U-tube내에 채워진 물을 빼줌으로서 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치를 회수한다. 이렇게 회수되어진 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치는 Fig. 3-3와 같은 통신모듈을 통해 컴퓨터의 RS232 시리얼 커넥터에 연결되어 컴퓨터로 측정데이터를 전송하고 측정데이터 수집 전용 프로그램을 이용하여 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치내 EEPROM에 저장되어진 데이터를 수집한다. 본 실험의 총 측정시간은 프로브가 회수 되어지는 시간을 포함하여 약 30분의 시간이 걸렸다.

Table 3-1 Specifications of high speed wireless ground heat exchange effectiveness tester

Material	Steel
Diameter [mm]	23
Weight [g]	99.8
Length [mm]	235
Sink velocity [m/s]	0.1
Water resistant [bar]	100
Battery usage time [hour]	3
Store measurement data	16,000
Measurement time[sec]	3.5

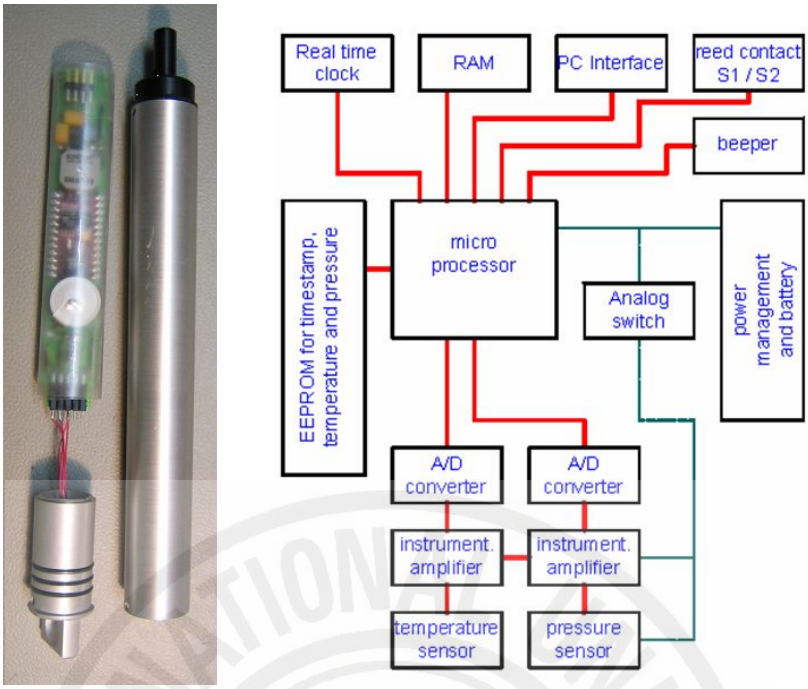


Fig. 3-2 Blackdiagram of high speed wireless ground heat exchange effectiveness tester

Fig. 3-3 Software for high speed wireless ground heat exchange effectiveness tester

2) 열전도율 측정

전자식 지중 열교환 유효도 측정을 위한 열전도율 계산은 다른 영향에 방해받지 않는 순수조건에 기초한다. 그러므로, 지중 온도 변화, 지열류 변화에 대한 영향은 배제되어야 한다. 특정 깊이($x = x_u$)에서 측정된 온도 T_u와 i 만큼의 거리에 있는 깊이($x = x_l$)에서 측정되어진 온도 T_l에서의 온도차이는 식(3-2)와 같다.

$$\Delta T_i = \frac{T_u - T_l}{x_u - x_l} \tag{3-2}$$

국부 지열 열전달량 q_{loc}은 식(3-3)으로 표현되거나,

$$K_i = \frac{q_{loc}}{\Delta T_i} \tag{3-3}$$

식(3-4)로 표현될 수 있다.

$$K_i = q_{loc}\frac{x_u - x_l}{T_u - T_l} \tag{3-4}$$

여기서, 식(3-4)는 측정된 온도-깊이 그래프로부터 열전도율을 계산하는데 사용될 수 있으나, 이 식은 단지 $T_u - T_l > 0$이거나 지온 경사가 양(+)일 경우에만 성립될 수 있다. 따라서 보어홀의 안정적인 온도분포를 갖는 80~100m 구간에서 열전도율을 계산하여 적용하였다.

3-2 토양 열적 특성 측정기술 및 평가 실험

1) 토양 열적 특성 측정장치

본 실험에 사용된 토양 열적 특성 측정장치는 미국 D사에서 개발/제작되어진 열적 성능 소형측정기로 세 가지 바늘모양의 센서와 네 개의 버튼만으로 매질에 상관없이 열전도율(W/m℃), 열저항율(m℃/W) 및 열확산율(mm²/s)을 측정할 수 있다. Fig. 3-4의 우측에서 보여주고 있는 세 종류의 센서를 사용하여 토양을 측정하고 좌측에서 보여주는 측정 조절기의 LCD 모니터로 측정된 데이터를 확인할 수 있다. 여기서 우측 상단의 $6cm$ 단일바늘 센서는 대부분의 매질에 적용 가능하며 가장 정확한 열전도율과 열저항율을 측정하고, 우측중간의 $10cm$ 단일바늘 센서는 측정대상이 단단한 매질일 경우 사용한다. 우측하단의 $30mm$ 듀얼바늘 센서는 단일바늘센서가 열전도율과 열저항율, 온도만을 측정할 수 있는 것에 비해 체적 비열 측정능력과 열확산율도 추가로 측정할 수 있는 기능을 갖는다. 이 측정장치의 또 다른 특징으로는 총 측정시간이 2분으로 매우 신속하고 정확하게 측정이 가능하다는 것이다. 이러한 토양 열적 특성 측정장치의 전체적인 성능은 Table 3-2에 명시되어 있다.

2) 토양 열적 특성 측정이론

무한매질에서 일정한 열방출과 질량이 0인 무한 선형열원(line heat source) 주변 온도를 모델하였다.[12] 열량 Q(Jm^{-1})를 선형열원(line heat source)에 바로 적용했을 때, 열전도율 k($Wm^{-1}K^{-1}$), 열확산율 α(m^2/s), 시간 t(s)인 곳의 열원으로부터 거리 r(m)의 온도 상승은 식(3-5)과 같다.

$$\Delta T = \frac{Q}{4\pi kt} exp(\frac{-r^2}{4\alpha t}) \tag{3-5}$$

만약 여기서 일정한 열량을 시간에 따른 질량이 0인 열발생원에서 순간파동으로 바꿔 적용한다면 이에 대한 온도 응답은 식(3-6)와 같다.

$$\Delta T = \frac{Q}{4\pi kt} Ei\left(\frac{-r^2}{4\alpha t}\right) \qquad 0 < t \le t_1 \tag{3-6}$$

여기서, q는 소모열량율, t_1은 가열시간, E_i는 지수적분이다.[13]

열발생을 멈춘후의 온도상승은 다음의 식(3-7)과 같이 주어진다.

$$\Delta T = -\frac{q}{4\pi kt}\left[-Ei\left(\frac{-r^2}{4\alpha t}\right) + Ei\left(\frac{-r^2}{4\alpha(t-t_1)}\right)\right] \quad t > t_1 \tag{3-7}$$

물질의 열적 특성은 식(3-6)에서 가열되는 동안과 식(3-7)에서 냉각되는 동안의 연속 온도 데이터를 시간에 맞춤으로서 정의된 열전도율은 가열된 바늘센서(단일 바늘센서)의 r만큼의 반경에서 구할 수 있다. 열확산율은 가열된 바늘센서(6mm 듀얼바늘센서)에서 고정된 거리에서 측정된 온도를 맞춤으로서 구할 수 있다. 정적비열은 식(3-8)과 같이 k와 α로 정의된다.

$$C = \frac{k}{\alpha} \tag{3-8}$$

이 경우 k와 α는 비선형 최소면적 공식에 의해 구할 수 있고[14] 추가적인 선형 추세치는 역공식에 포함된다. 그러나 대부분의 실험은 일정한 온도조건하에서 생기지 않을 것이다.

Fig. 3-4 The appearance of soil thermal property tester controller & sensors (left: soil thermal property tester controller, right-up: 6cm sensor, right-center: 10cm sensor, right-down: 30mm dual sensor)

Table 3-2. Specification of soil thermal property tester

Measurement speed	2min		
Data storage	4095 measurements in flash memory (both raw and processed data are stored for download)		
Operating environment	controller		0 to 50℃
	sensors		-50 to 150℃
Sensor	6cm single-needle (KS-1)	size	1.3mm diameter x 60mm long
	10cm single-needle (TR-1)	range	k : 0.02 to 2.00 W/mK R : 0.5 to 50mK/W
	30mm dual-needle (SH-1)	accuracy	± 5% from 0.2-2W/mK ± 0.01W/mK from 0.02-0.2W/mK
		size	2.4mm diameter x 100mm long
		range	k : 0.10 to 2.00 W/mK R : 0.5 to 10mK/W
		accuracy	± 10% from 0.2-2W/mK ± 0.02W/mK from 0.1-0.2W/mK
		size	1.3mm diameter x 30mm long, 6mm spacing
		range	k : 0.02 to 2.00 W/mK R : 0.5 to 50mK/W α : 0.1 to 1mm^2/s C : 0.5 to 4MJ/m^{3}K^{-1}
		accuracy	k : ± 5% from 0.2-2W/mK α : ± 0.01W/mK from 0.02-0.2W/mK C : ± 5% at thermal conductivities above 0.1W/mK ± 7% at thermal conductivities above 0.1W/mK

3) 토양 열적 특성 측정장치 작동방법

토양 열적 특성 측정장치의 작동방법은 네개의 버튼만을 이용하여 열전도율 측정 및 열저항율, 열확산율 측정이 가능하도록 간단히 구현되어 있다. 토양 열적 특성 측정장치 작동방법을 간단히 설명하자면, Fig. 3-5와 같이 먼저 토양에 맞는 측정센서를 선택한 후, 측정하고자 하는 시료에 센서를 설치한다. 센서 설치가 완료되면 토양 열적 특성 측정장치 조절기 우측의 붉은색 enter 버튼을 눌러줌으로서 시료에 대한 측정을 시작하게 된다. 이러한 측정은 30초의 보정시간과 30초의 가열시간, 30초의 냉각시간으로 구성되어 총 2분의 측정시간을 가지고 온도측정은 가열과 냉각을 하는 동안 1초 간격으로 측정된다.

토양 열적 특성 측정장치를 이용한 또 다른 측정방법으로 현장측정에서 직접 측정하는 방법으로 측정순서는 시료채취시 측정하는 방법과 동일하다. 이러한 토양 열적 특성 측정장치의 측정방법은 수평형 지중 열교환기와 같이 깊이가 얕은 지중을 측정할 때는 현장에서 직접 측장하는 방법이 적합하며, 수직형 지중 열교환기 매설과 같이 상대적으로 깊은 지중의 천공시에는 시료를 채취하여 측정하는 방법이 적합하다.

Fig. 3-5 The appearance of soil thermal property tester measurement

3-3. 토양의 수분함량 측정법

토양의 수분함량을 측정하는 방법에는 직접법과 간접법이 있다. 토양시료 건조 전후의 중량차로부터 수분함량을 구하는 중량법이 직접법이며 간접적인 방법으로는 중성자 이용법, TDR법, Psychrometry법 등이 있다.

본 실험은 식(3-9)와 같은 중량법을 이용하여 Fig. 3-6과 같이 수평형 지열 시스템 설치를 위해 굴착된 깊이 2m의 토양을 0.5m마다 채취하여 토양의 수분함량을 구하였고 그 실험방법은 토양을 105℃에서 건조평형에 이를 때까지 건조시키고 그때의 감량을 수분으로 하여 함량을 구한다.[15]

토양의 수분함량 측정을 위해 건조된 시간은, 토양별로 건조되어 평형에 이르는 시간이 다르지만 통상적으로 18시간 이상 건조 후 측정한다.

$$\text{수분함량}(\%, \text{중량}) = \frac{\text{건조시료} - \text{용기의무게}}{\text{습윤시료} - \text{용기의무게}} \times 100 \qquad (3\text{-}9)$$

Fig. 3-6 The appearance of soil vs depth

Ⅳ. 실험 결과 및 고찰

4-1. 100m 보어홀의 실제측정값과 지중 온도 예측값 비교

1) 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치에 의한 지중 온도 변화 선도

PT-87과 PT-35의 명칭을 갖는 두개의 전자식 지중 열교환 유효도 측정장치인 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치를 이용하여 한국에너지기술연구원내에 깊이 50m와 100m로 시추된 보어홀의 깊이별 온도를 측정하고 실험 데이터를 구하여 분석해 보았다. 그 결과 Fig. 4-1과 같이 깊이 16m까지 급격히 변화하다 깊이 16m이후로 점점 안정적인 선도를 보여준다. 비록 60m 이전에선 일사량 및 온도보정에 의해 약간의 차이가 있지만 거의 비슷한 선도를 보여주고 있고, 깊이 60~100m에서는 거의 일치함을 보여주고 있다. 이를 통해 지중의 온도분포가 일사량에 영향을 받는 깊이를 예측할 수 있고 지중내 온도분포를 추정하여 지열원 히트펌프 설계시 중요한 변수로 작용함을 알 수 있다. 여기서 측정초기 PT-87의 측정온도가 높게 나오는 이유는 처음 작동시 외기의 영향을 받기 때문이다. 데이터를 좀 더 분석해보면 겨울철 피크온도는 깊이 약10m 에서 약 11.3℃, 여름철 피크온도는 깊이 약 2m에서 약 16.3℃임을 알 수 있다.

Fig. 4-2는 깊이 50m 보어홀의 온도 경향을 보여주고 있는 것으로 깊이 100m의 보어홀에서 측정된 겨울철 피크온도 11.3℃와 비교하였을 때 10.1℃로 약간 낮게 측정되었다. 이러한 이유는 깊이 50m 보어홀의 위치 주변의 나무에 의한 음영에 의해 100m의 보어홀에 비해 일사량이 상대적으로 적기 때문이다.

여기서 깊이 100m 보어홀에서의 열전도율값을 산출한다면 열전도율은 깊이 80~100m 구간에서 계산된다. 그 이유는 깊이 80m 이후로 지온 경사가 양(+)의 방향을 나타나고 안정적인 온도분포를 갖기 때문이다.

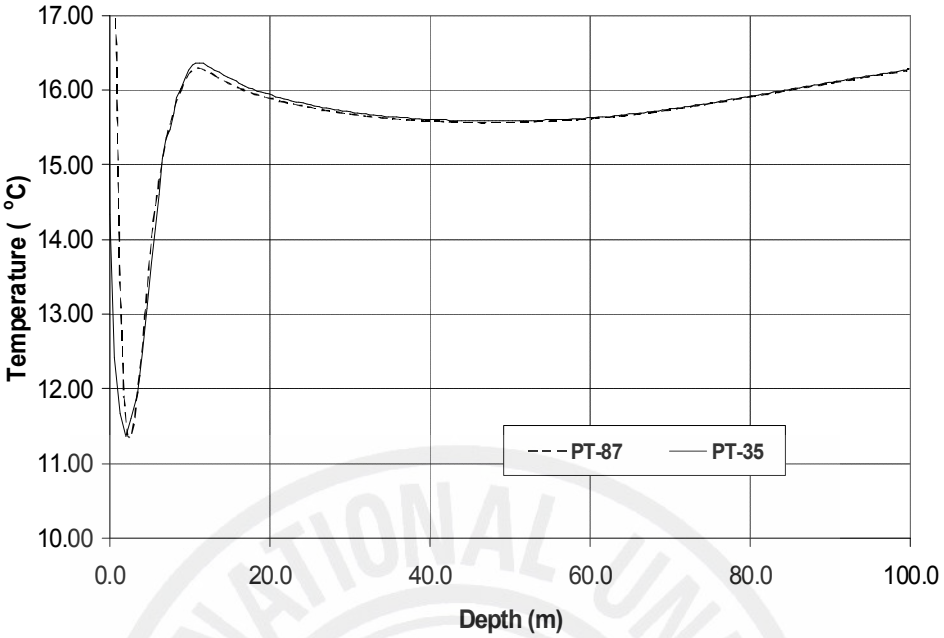


Fig. 4-1 Temperature profile of 100m deep borehole exchanger using PT-87 and PT-35

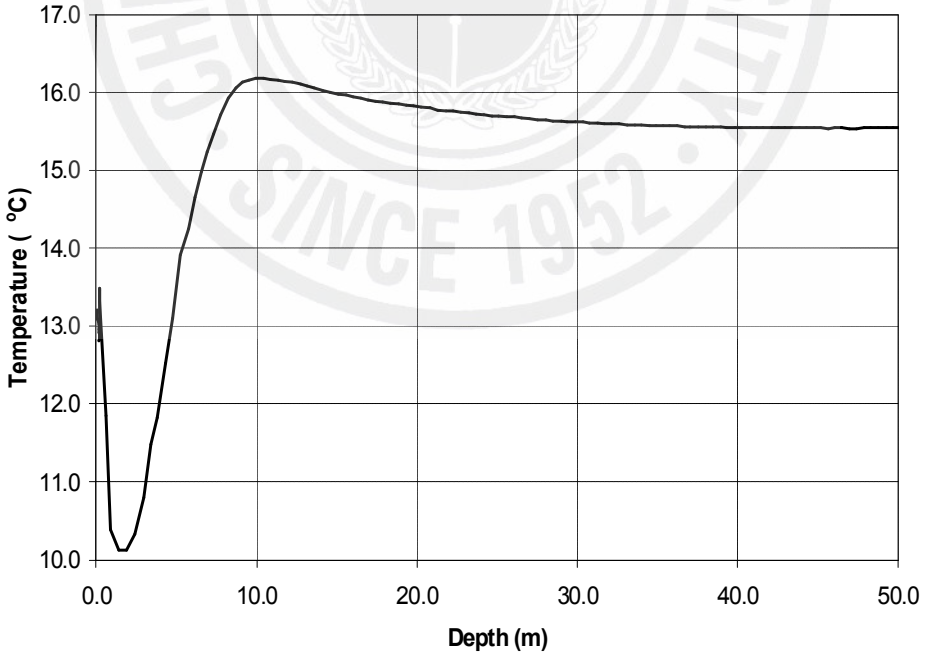


Fig. 4-2 Temperature profile of 50m deep borehole exchanger

2) Krarti & Spitler 지중 온도 예측식에 의한 지중 온도 변화 선도

측정되어진 지중 온도 검증 및 예측을 위해 대전지역 평균연중기후데이터와 대전지역 한국에너지기술연구원에서 두개의 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치를 이용하여 측정되어진 지중 온도 측정자료를 근거로 Krarti와 Spitler 지중 온도 예측식에 의해 도출되는 결과값과 실제 측정한 값이 어떠한 차이를 보이는지에 대해 분석해 보았다.

Fig. 4-3은 Spitler 지중 온도 예측식에 대전지역의 1년(365일)의 온도변화를 20등분한 것으로 Table 4-1의 입력 변수를 대입하여 계산된 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 여기서 일정 깊이까지는 외기온도 및 시간의 변화에 영향을 받아 변화하지만 깊이 16m이상에서는 외기온도 및 시간의 변화에 관계없이 일정한 온도를 보이고 있음을 알 수 있다. Table 4-2에서 보여주고 있는 입력변수에는 측정지역의 연평균 지표면온도 T_a(℃), 열확산계수 α(m²/day), 연간표면온도진폭 T_m(℃), 위상정수 t_o(day), 연중일 t_y(day)가 있다. 여기서 연평균 지표면 온도 T_a와 열확산율 α는 Table 4-3에서 미리 측정되어진 나머지 입력변수를 Spitler 지중 온도 예측식에 입력함으로써 산출되어진 추측값이며, 연간표면온도 진폭을 나타내는 T_m 은 대전지역의 가장 더운날과 추운날의 온도차이를 반으로 나눈 값이다. 그리고 위상정수(t_o)는 계절의 시작인 봄이 시작되는 날을 3월 21일로 했을 때 1월 1일을 기준으로 79일이 되는 날이기 때문에 위상정수(t_o)를 79로 두었다. 그리고 시간 및 계절적 변화에 따른 연간 지중열 온도 분석을 위한 연중일(t_y)은 보다 명확한 지중 온도 데이터 경향을 보기 위하여 365일을 20등분하여 18.25일로 나타내었다.

식(4-1)과 같이 Spitler 지중 온도 예측식과 한국에너지기술연구원내에 시추되어 측정되어진 지중 온도 자료를 이용하여 Fig. 4-3과 같은 그래프와 Table 4-2, Table 4-3과 같은 결과값을 얻을 수 있었다. 여기서, t_o는 봄이 시작되는 날을 각각 30일, 79일(1월 1일 기준)로 가정한 것이다. Fig. 4-4의 점선은 실제로 얻어진 측정값이고 실선은 한국에너지기술연구원에서 얻어낸 측정값을 Spitler 지중 온도 예측식에 대입하여 나타난 예상값이다.

다음으로 Krarti 지중 온도 예측식에 한국에너지기술연구원에서 측정한 지온자

료를 이용하여 Fig. 4-5와 같은 그래프와 Table 4-4, Table 4-5와 같은 결과를 얻게 되었다. 여기서 b는 Matlab 프로그램으로 Krarti 지중 온도 예측식을 구현할 때 그래프에 나타나는 깊이를 보정하기 위한 값이다. 점선은 측정되어진 실제데이터이고 실선은 Krarti 지중 온도 예측식을 이용하여 얻어낸 결과이다.

위의 결과에서 알 수 있듯이 Krarti 지중 온도 예측식과 Spitler 지중 온도 예측식은 실제 측정 결과와 거의 같은 값을 얻어낼 수 있음을 확인할 수 있다. Krarti 지중 온도 예측식과 Spitler 지중 온도 예측식을 실제 측정데이터와 비교, 분석을 하기 위한 프로그램으로 수식계산, 알고리즘 개발, 상황 모델링 및 data분석, 그리고 공학적인 그래픽을 표현할 수 있는 Matlab 프로그램을 사용하였다. Matlab으로 구현하여 나온 결과와 실제데이터는 Fig. 4-6과 같이 점선의 실제데이터와 실선의 Matlab 시뮬레이션 데이터가 거의 일치하는 결과를 보여주었다. 단, 16~60m 구간의 온도분포에서 0.5℃ 온도차이를 보였으나 이는 오차온도 범위내에 있기 때문에 무시할 수 있다.

$$model(x) = T_m - T_a \cdot \exp(-x\sqrt{\frac{\pi}{365a}}) \cdot \cos(\frac{2\pi}{365}[t + t_0 - \frac{x}{2}\sqrt{\frac{365}{\pi a}}]) \quad \text{식(4-1)}$$

Table 4-1 Input value

Parameter	Value
T_a	13.7℃
T_m	12.7℃
α	0.082114 m²/day
t_0	79
t_y	1 : 18.25 : 365

Table 4-2 Final set of parameter according to Spitler equation(t_o=30)

Parameter	Final set of parameter	Asymptotic Standard Error
T_a	16.0681	+/- 0.0128 (0.07963%)
T_m	5.9709	+/- 0.5056 (8.468%)
t_y	86.2004	+/- 0.5715 (0.663%)
α	0.444332	+/- 0.01468 (3.303%)

Table 4-3 Final set of parameter according to Spitler equation(t_o= 79)

Parameter	Final set of parameter	Asymptotic Standard Error
T_a	15.931	+/- 0.06152 (0.3861%)
T_m	3.60847	+/- 0.5355 (14.84%)
t_y	34.9823	+/- 0.9302 (2.659%)
α	0.471687	+/- 0.01854 (3.932%)

Table 4-4 Final set of parameter according to Krarti equation(16m deep)

Parameter	Final set of parameter	Asymptotic Standard Error
T_m	15.9915	+/- 0.0128 (0.3556%)
A_{mp}	3.16519	+/- 0.07604 (2.402%)
D	2.16396	+/- 0.0378 (1.747%)
b	4.34776	+/- 0.06352 (1.461%)

Tabel 4-5 Final set of parameter according to Krarti equation(100 m deep)

Parameter	Final set of parameter	Asymptotic Standard Error
T_m	16.0686	+/- 0.01278 (0.07951%)
A_{mp}	3.2133	+/- 0.05517 (2.202%)
D	2.19028	+/- 0.03657 (1.654%)
b	4.38106	+/- 0.06389 (1.458%)

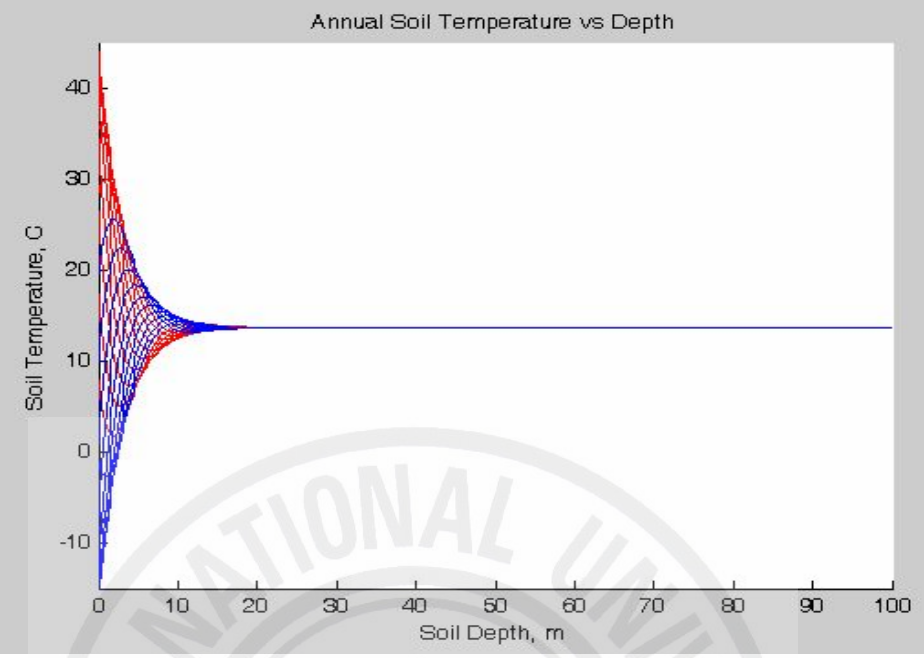


Fig. 4-3 Twenty temperature approximations of the soil

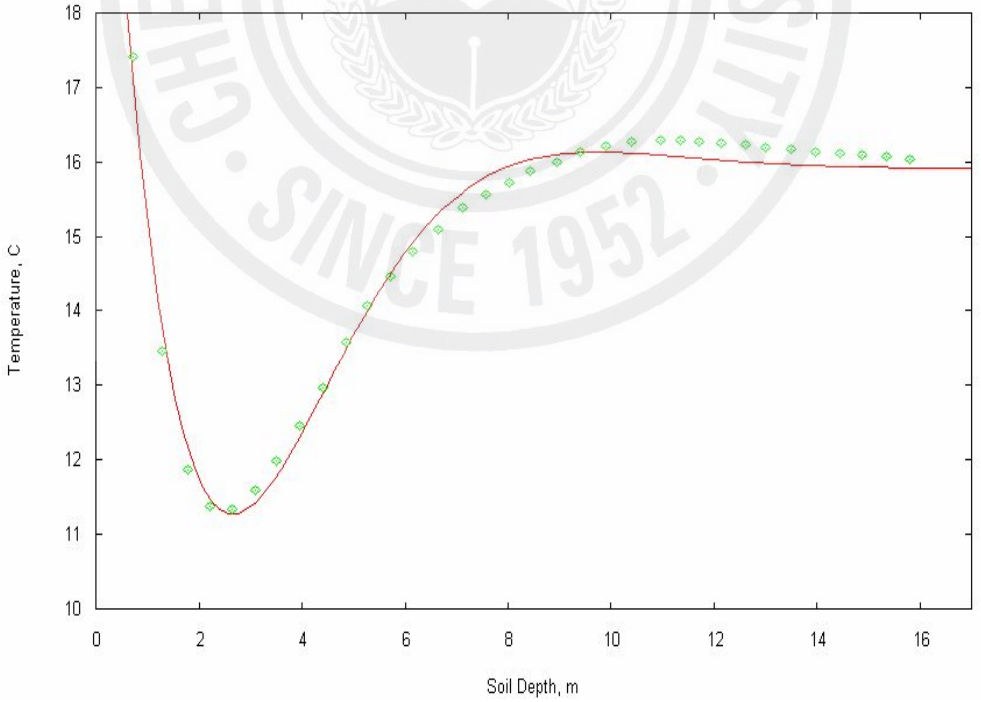


Fig. 4-4 Soil temperature variation according to Spitler equation

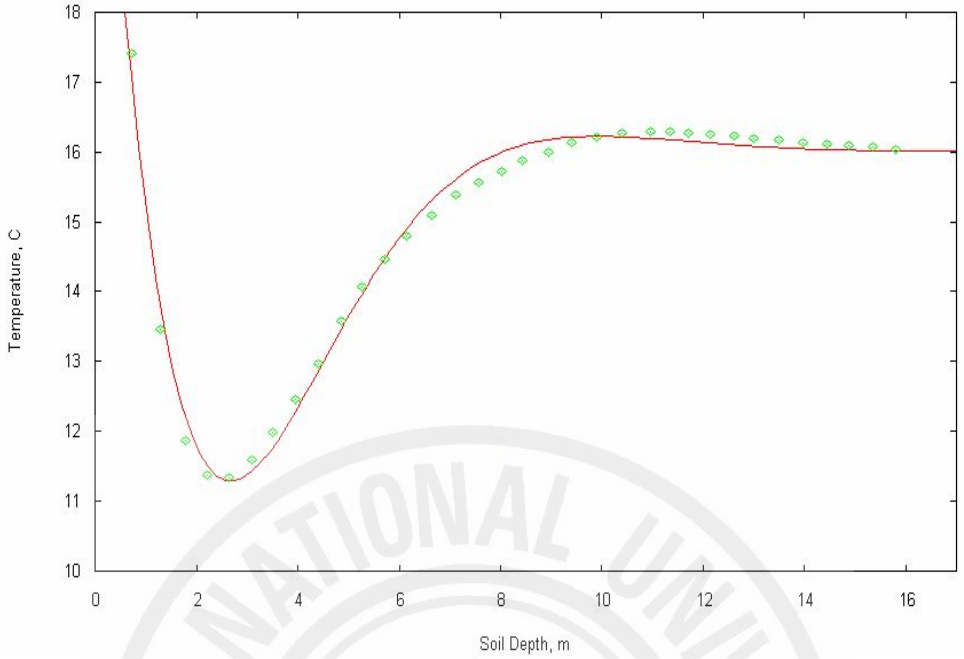


Fig. 4-5 Soil temperature variation according to modified Krarti equation

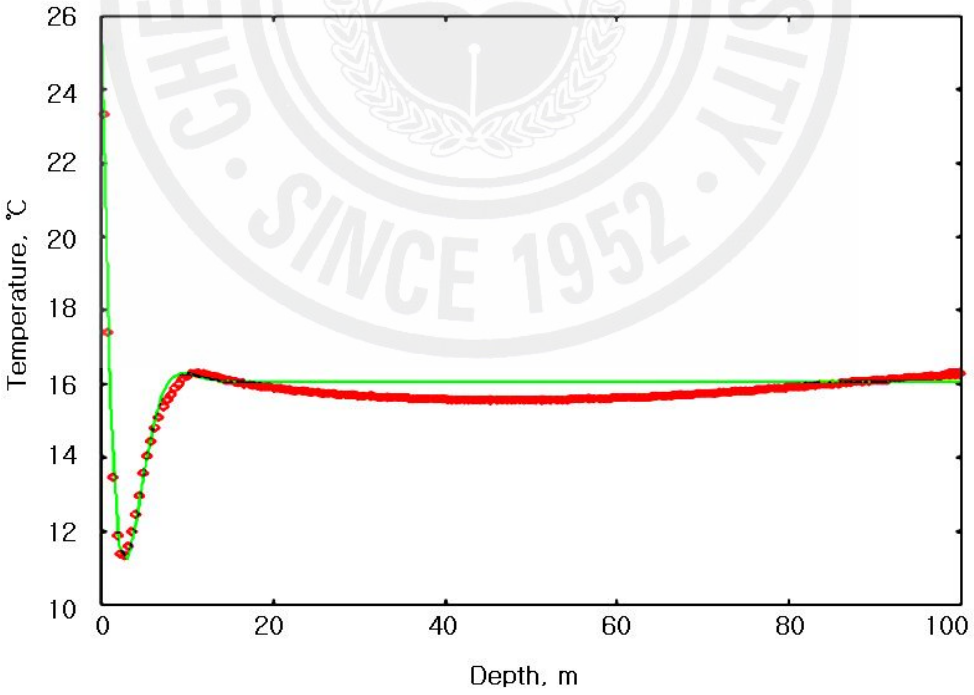


Fig. 4-6 Annaul soil temperature variation according to modified Krarti equation (100m deep)

4-2. 토양의 열적 특성 파악

정확한 지중 열전도율 및 열확산율 측정과 검증을 위하여 경산북도 경산지역에 시설원예용으로 매설되어진 수평형 지중 열교환기를 굴착할 때 0.5m 간격으로 채취한 토양을 측정하였다.

토양 열적 특성을 파악하기 위하여 깊이 2m인 토양에 0.5m 간격으로 채취한 토양시료를 토양 열적 특성 측정장치를 이용하여 측정하였다. 여기서 채취한 토양시료는 경산지역에 수평형 지중 열교환기 매설시 굴착할 때 채취된 것으로 토양의 종류 및 특징을 분석한 결과를 비교하면, 토양채취시 수분이 함유된 상태에서의 열전도율과 열저항율 측정값은 1.0m 깊이를 기준으로 열전도율은 $K \geq 1$, $R \fallingdotseq 3$의 차이를 보였다. 이러한 측정값을 바탕으로 깊이 0～1.0m구간과 깊이 1.0～2.0m구간은 서로 다른 지질층이라 예상하였다. 그러나 깊이 0.5m당 채취한 시료를 중량법에 의거하여 드라이 오븐에 18시간이상 넣어 완전 건조시킨 후 측정한 결과 깊이별 평균 열전도율과 열저항율이 각각 $K \fallingdotseq 0.1$, $R \fallingdotseq 10.8$로 변화가 거의 없음을 확인하였고 같은 종류의 암석임을 예측할 수 있었다. 이를 미루어 볼 때 깊이에 따라 측정된 토양은 수분함량이 토양의 열적 특성에 매우 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 이에 따라 수분함량에 따른 열전도율 및 열저항율 변화에 대한 연구가 추가적으로 요구된다.

다음의 Table 4-6은 토양의 상태에 따른 일반적인 특성을 보여주고 있고 Tables 4-7～Table 4-10은 각각 측정시료의 깊이별 지중 열전도율, 지중 열확산율, 지중 열저항율, 비열에 대한 건조 전후의 측정값 변화를 비교한 것이다. 그리고 Fig. 4-7～Fig. 4-10은 각각 깊이별 지중 열전도율, 지중 열확산율, 지중 열저항율, 비열에 대한 건조 전후의 측정값 변화에 대한 그래프이다. 마직막으로 Table 4-11과 Fig. 4-11은 중량법에 의거하여 측정된 토양의 수분함량을 나타낸 것이다.

Table 4-6 Soil thermal properties

Thermal Texture Class	Thermal Conductivity		Thermal Diffusivity	
	W/mK	$Btu/ft\ hr\ ^{\circ}\mathrm{F}$	cm^2/sec	ft^2/day
Sand (or gravel)	0.77	0.44	0.0045	0.42
Silt	1.67	0.96	-	-
Clay	1.11	0.64	0.0054	0.50
Loam	0.91	0.52	0.0049	0.46
Saturated Sand	2.50	1.44	0.0093	0.86
Saturated Silt or Clay	1.67	0.96	0.0066	0.61

Table 4-7 The comparison of thermal conductivity

depth(m)	K(w/mk) (dry soil)			
	1	2	3	**Average**
0	0.188	0.197	0.195	**0.19**
0.5	0.181	0.181	0.178	**0.18**
1.0	0.185	0.194	0.188	**0.19**
1.5	0.187	0.190	0.190	**0.19**
2.0	0.200	0.204	0.204	**0.20**

depth(m)	K(w/mk) (wet soil)			
	1	2	3	**Average**
0	0.353	0.365	0.369	**0.36**
0.5	0.373	0.385	0.388	**0.38**
1.0	0.866	0.848	0.868	**0.86**
1.5	0.436	0.436	0.438	**0.44**
2.0	0.645	0.641	0.643	**0.64**

Table 4-8 The comparison of thermal diffusivity

depth(m)	α(㎡/s) (dry soil)			
	1	2	3	**Average**
0	0.172	0.175	0.174	**0.17**
0.5	0.157	0.157	0.151	**0.16**
1.0	0.169	0.172	0.173	**0.17**
1.5	0.154	0.155	0.155	**0.15**
2.0	0.167	0.168	0.167	**0.17**

depth(m)	α(㎡/s) (wet soil)			
	1	2	3	**Average**
0	0.287	0.295	0.296	**0.29**
0.5	0.292	0.291	0.288	**0.29**
1.0	0.457	0.451	0.454	**0.45**
1.5	0.366	0.358	0.353	**0.36**
2.0	0.453	0.447	0.447	**0.45**

Table 4-9 The comparison of thermal resistance

depth(m)	R(mk/w)(dry soil)			
	1	2	3	**Average**
0	5.315	5.069	5.139	**5.17**
0.5	5.523	5.512	5.632	**5.56**
1.0	5.411	5.146	5.313	**5.29**
1.5	5.345	5.267	5.263	**5.29**
2.0	5.000	4.890	4.902	**4.93**

depth(m)	R(mk/w)(wet soil)			
	1	2	3	**Average**
0	2.834	2.737	2.713	**2.76**
0.5	2.684	2.597	2.579	**2.62**
1.0	1.154	1.179	1.152	**1.16**
1.5	2.295	2.296	2.283	**2.29**
2.0	1.551	1.560	1.555	**1.56**

Table 4-10 The comparison of specific heat

depth(m)	C(mt/㎥k)(dry soil)			
	1	2	3	**Average**
0	1.094	1.127	1.118	**1.11**
0.5	1.153	1.156	1.173	**1.16**
1.0	1.095	1.127	1.090	**1.10**
1.5	1.214	1.227	1.229	**1.22**
2.0	1.199	1.218	1.221	**1.21**

depth(m)	C(mt/㎥k)(wet soil)			
	1	2	3	**Average**
0	1.229	1.240	1.247	**1.24**
0.5	1.227	1.324	1.346	**1.30**
1.0	1.895	1.878	1.911	**1.89**
1.5	1.189	1.217	1.240	**1.22**
2.0	1.424	1.440	1.440	**1.43**

Table 4-11 The comparison of water content

depth(m)	wet soil(g_w)	dry soil(g_d)	difference of soil weight ($\Delta g = g_w - g_d$)	percentage of water (%)
0	195.85	190.82	5.03	2.64
0.5	333.09	317.79	15.3	4.81
1.0	330.32	290.18	40.14	13.83
1.5	208.37	195.55	12.82	6.56
2.0	246.65	222.41	24.24	10.90

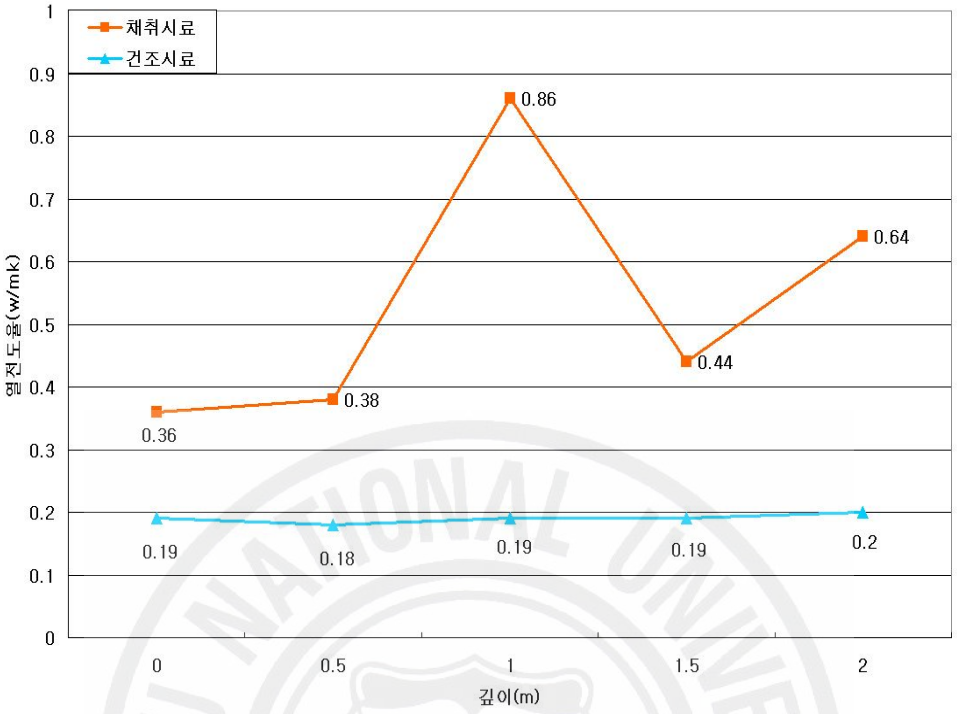


Fig. 4-7 Variation of the soil conductivity vs depth

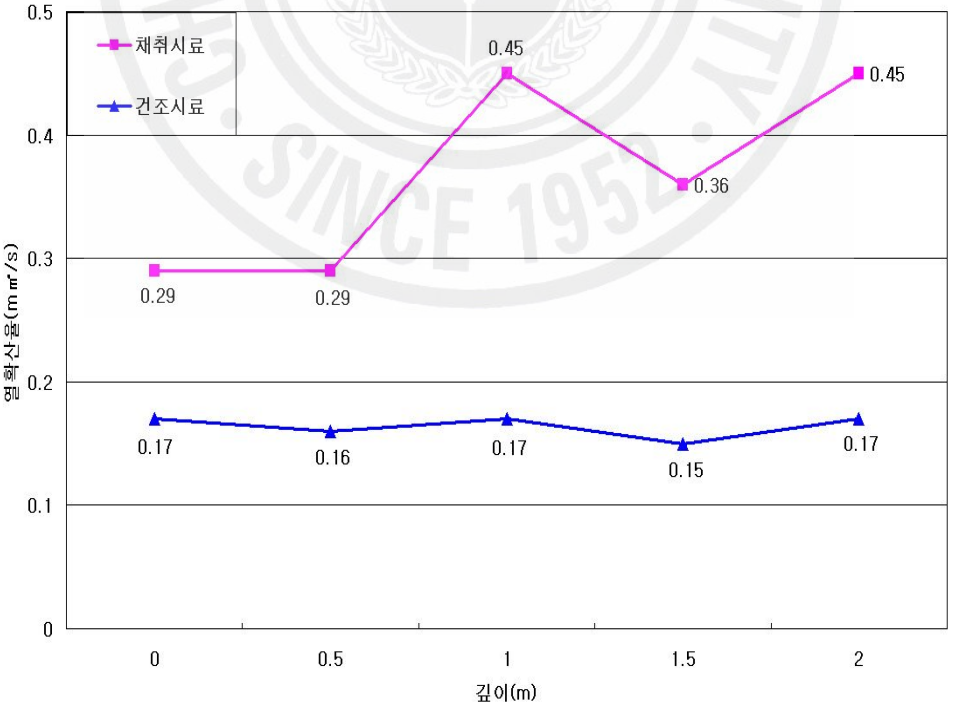


Fig. 4-8 Variation of the soil diffusivity vs depth

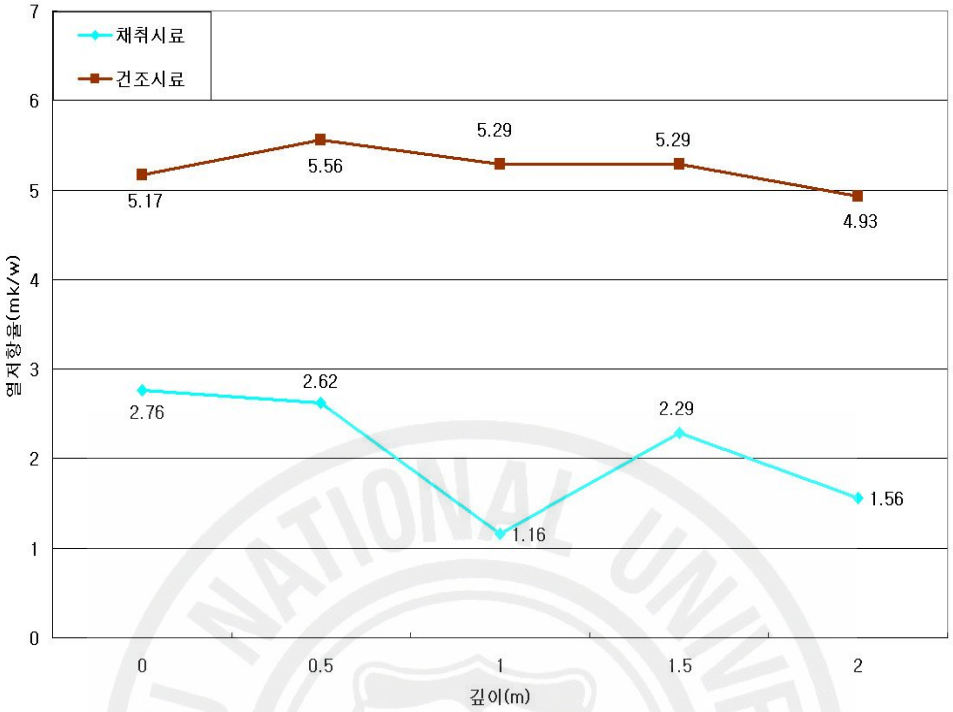


Fig. 4-9 Variation of the soil resistance vs depth

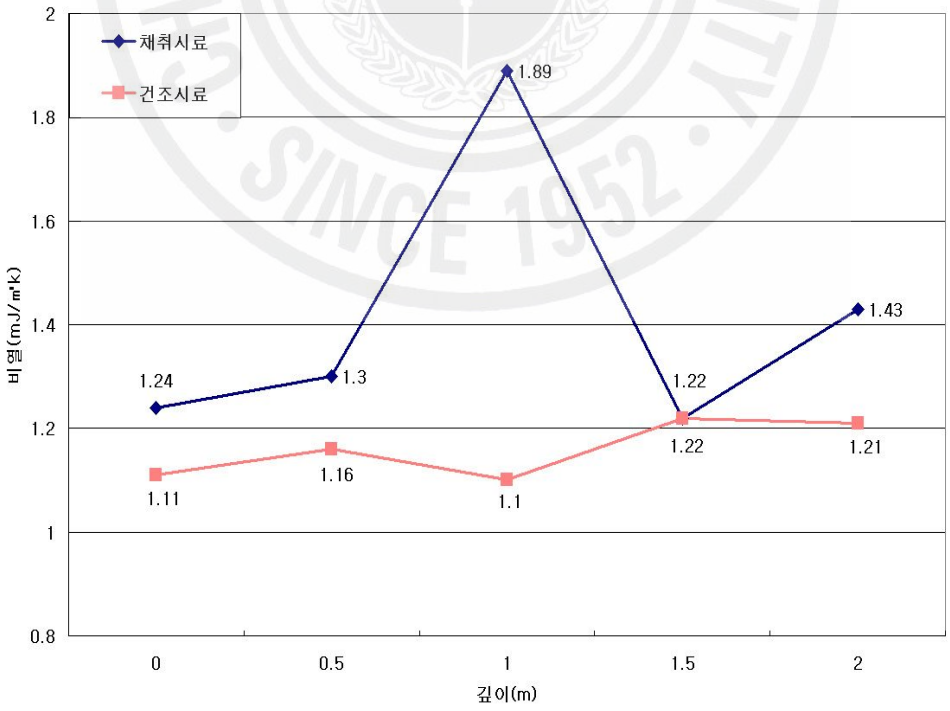


Fig. 4-10 Variation of the soil specific heat vs depth

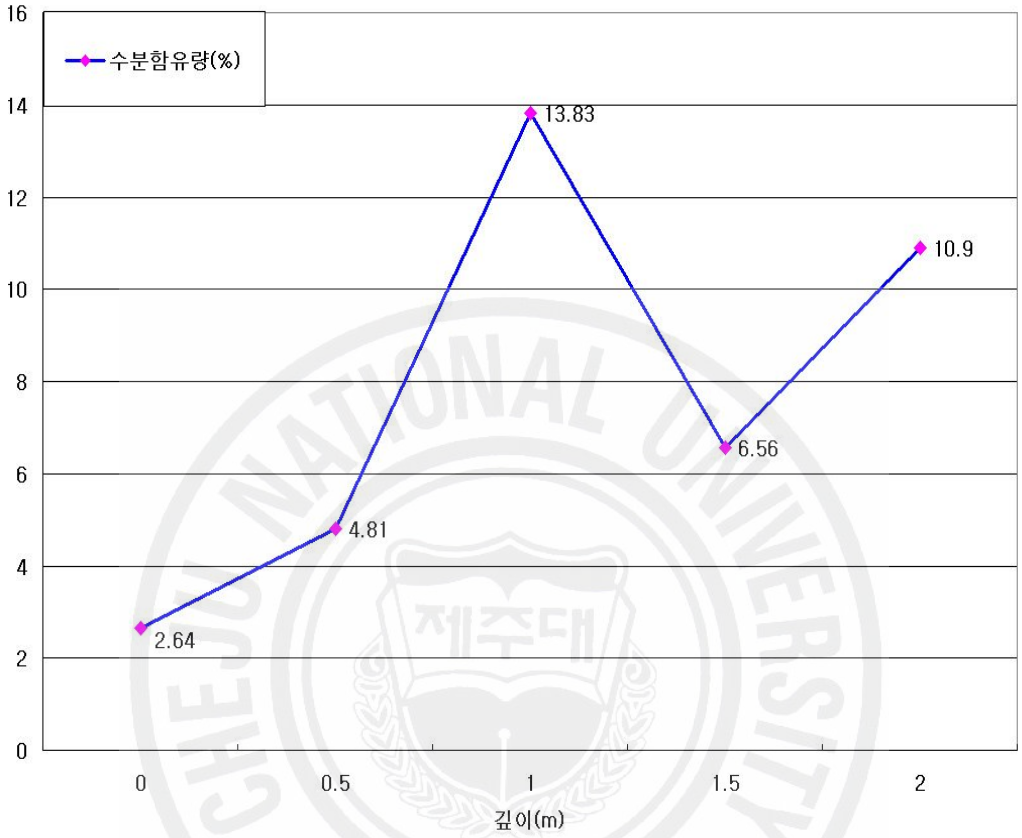


Fig. 4-11 Variation of the water content vs depth

V. 지열원 히트펌프 성능예측 기술

5-1 지중 열교환기 설계 프로그램

지중 열교환기 설계를 위한 많은 소프트웨어들이 개발되어 현재 전세계에서 사용되고 있다. 이러한 소프트웨어들은 주어진 빌딩의 부하, 지열 특성 그리고 시추공 구성 즉 히트펌프로 들어가는 유체온도를 충족시키시 위한 지중 열교환기 크기를 정할 수 있다. 이러한 대표적인 소프트웨어로는 Table 5-1에 나와 있는 EED (Hellström and Sanner 2000), GchpCalc (Kavanaugh n.d.), GLDesign (Peterson 2000), GLHEPRO (Spitler 2000), GS 2000 (Morrison 1997), RETScreen (CETC-Varennes 1996) 등이 있다.

이 중 RETScreen 소프트웨어가 가장 많이 보급되어 있으며, 그 사용자 수는 현재 216개국 95757명, 122개 대학에서 사용되고 있다. 또한 최근에 한국어 버전이 생기면서 국내에도 많은 사용자가 생길 것으로 기대된다.

Table 5-1 Geothermal exchanger design program

Name	Source
GLHPCalc	Energy Information Services, Tuscaloosa AL, USA
EED	Lund Univ., Lund, Sweden
GLHEPRO	IGSHPA, Stillwater OK, USA
RIGHT-LOOP	Wright Associates, Lexington MA, USA
GS2000	Caneta Research, Canada
RETScreen	**CEDRL, Canada**

5-2 RETScreen 지중 열교환기 설계 프로그램

캐나다에서 개발된 RETScreen 지중 열교환기 설계 프로그램(Fig. 5-1)은 지속가능한 에너지기술(RET: Renewable Energy Technology)프로젝트나, 신재생에너지를 에너지원으로 하는 특정 요소기술 설비의 시행 타당성 분석을 위한 시장조사, 정책분석을 통한 사업 예비 가능성 평가를 주목적으로 사업 타당성이 확보된 요소설비 시스템의 정보공유에서부터 판촉 및 서비스와 관련된 프로젝트 연구개발 목적으로 배포되어 사용되는 시스템 평가 도구이다.[16]

RETScreen 지중 열교환기 설계 프로그램은 캐나다의 정부기관과 해당 관련 산업체의 전문가들로 구성된 CEDRL(CANMET Energy Diversification Research Laboratory)에 의해 개발되었으며, 다양한 신재생에너지 이용 요소기술 설비개발 및 보급 프로젝트를 통하여 검증된 프로그램으로써, 신재생에너지관련 프로젝트의 표준 통합 분석용 도구라 할 수 있다.

RETScreen 지중 열교환기 설계 프로그램을 이용한 지중열 히트펌프 성능 평가는 이용자가 평가하고자 하는 지중열 히트펌프의 상세 내용을 적는 것만으로 결과를 도출할 수 있도록 구성되어 있다. 또한 각 단계마다 Excel Worksheet 내에는 하이퍼링크(Hyper-Link)된 부분을 찾아볼 수 있는데, 이는 각 단계마다 부가적으로 요구되는 Sub-Worksheet이라든지 시스템의 상세한 내용, 또는 정확하게 판단할 수 없는 내용에 대해서 필요한 참고자료를 찾아볼 수 있도록 프로그램 자체 내에 Data-Base를 포함하고 있다. Fig. 5-2는 RETScreen 지중 열교환기 설계 프로그램을 통한 시스템 성능평가 과정을 보여주는 계통도(flow-chart)로서 RETScreen 지중 열교환기 설계 프로그램에서는 이용자가 각 단계별로 지원되는 Worksheet에 평가하고자 하는 시스템의 상세 내용을 적는 것만으로 건축시 산출되는 예상 냉/난방 용량과 시스템 설치비용, 투자금 환수기간(Payback period), 유해가스(Green House Gas) 저감량등을 예측할 수 있다.[17]

Fig. 5-1 RETScreen geothermal exchange design software

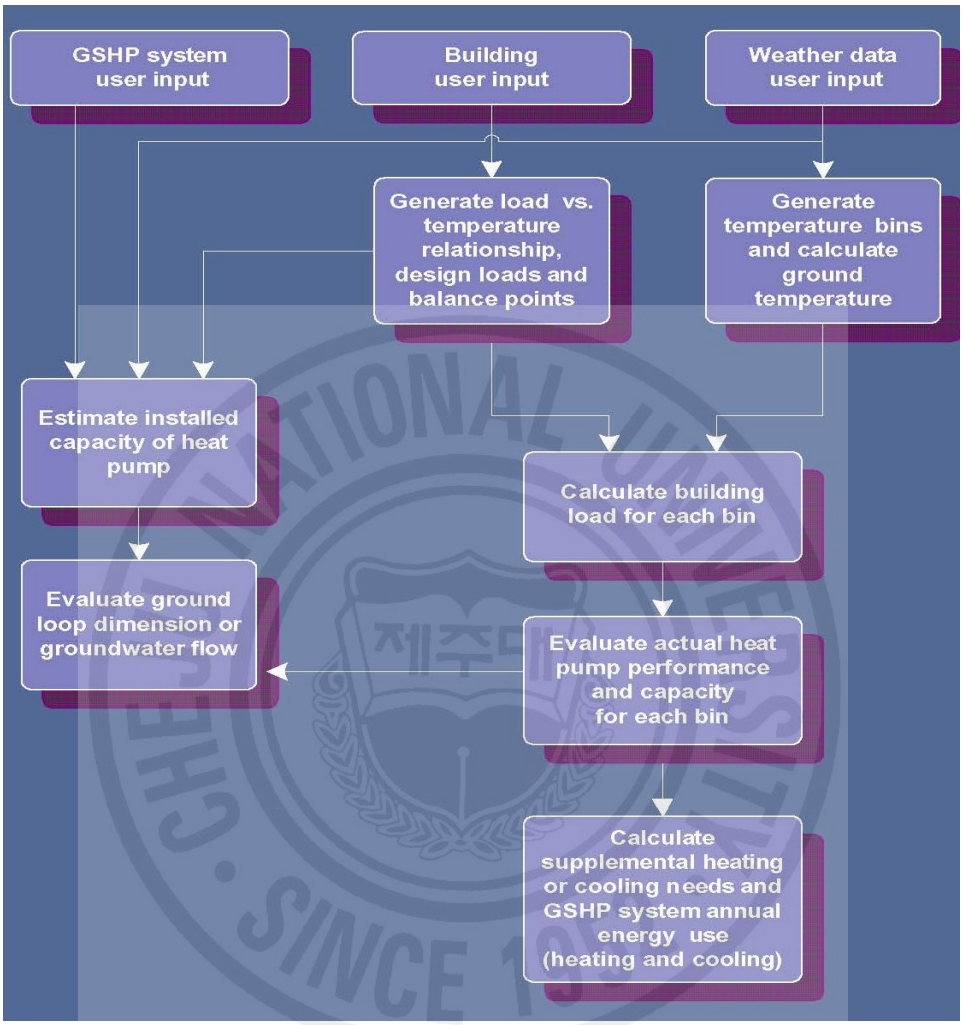


Fig. 5-2 RETScreen geothermal exchange design software flow-chart

5-3 RETScreen 지중 열교환기 설계 프로그램 구현방법

먼저 지열원 이용 시스템의 에너지 성능에 대한 정량적인 결과를 얻어내기 위해서는 Fig. 5-3의 Energy model worksheet에서 지중 열교환기의 설치면적, 그 지역의 토양성분, HVAC 시스템 사용여부 및 계절적 효율, 지중 열교환기 타입 및 배치, 그리고 히트펌프의 냉/난방 효율을 입력하고, Fig. 5-4의 Heating and cooling load worksheet에서 지열원 이용 시스템의 적용지역 정보와 기상요소, 적용건물 정보를 입력하여 건물의 냉/난방 부하요구량을 계산한다. 그 다음으로 Fig. 5-5의 Cost analysis worksheet에서는 적용된 시스템의 초기 설치비용 및 유지, 관리비용 등 시스템의 경제성 부분을 산출하는 것으로 여기서는 초기투자 비용과 연간 운영비용을 모두 포함하여 산출하도록 구성되어 있다. 따라서, 경제성 분석을 위해서는 초기 투자비용에 대한 상세한 분석을 필요로 한다. 이에 해당 Worksheet의 초기투자 비용부분을 판단하는 초기 비용 부분도 상세한 입력 요건을 요구하고 있으며 다양한 유형으로 입력조건을 제시하고 있다. Fig. 5-6의 Green-house gas(GHG) emission reduction analysis worksheet는 해당시스템의 설치 및 유지, 운영상 발생되는 온실가스의 발생량과, 대체에너지 이용 설비가 아닌 시스템의 운영상 발생되는 온실가스 발생량을 비교하여 해당 설비의 적용 및 운영으로 절감되는 온실가스의 저감량을 평가하는 Worksheet이다. 동일한 난방 능력을 가진 시스템으로 가정하고 각각의 시스템에서 운영을 위해 연간 사용되는 전기 및 기름 사용량을 기준으로 각각의 시스템에서 발생하는 온실가스 발생량을 계산할 수 있도록 구성되어 있다. 온실가스 발생에 관한 주요 항목으로 CO_2 , CH_4 , N_2O 등으로 나누어 발생량을 평가하며 종합적으로는 각각의 항목을 CO_2 항목으로 변환하여 총 에너지 사용량에 대한 CO_2 가스의 배출량으로 평가하도록 구성되어 있다.

이러한 지열원 이용 시스템 설치시 가장 중요한 투자금 환수기간(Payback period)과 내부수익률(IRR)은 Fig. 5-7과 같은 LCC(Life Cost Cycle)형태로 보여주고 있고, Table. 5-2의 실제사례와 비교한 결과는 RETScreen이 정확성과 신뢰성이 높다는 것을 알 수 있다.

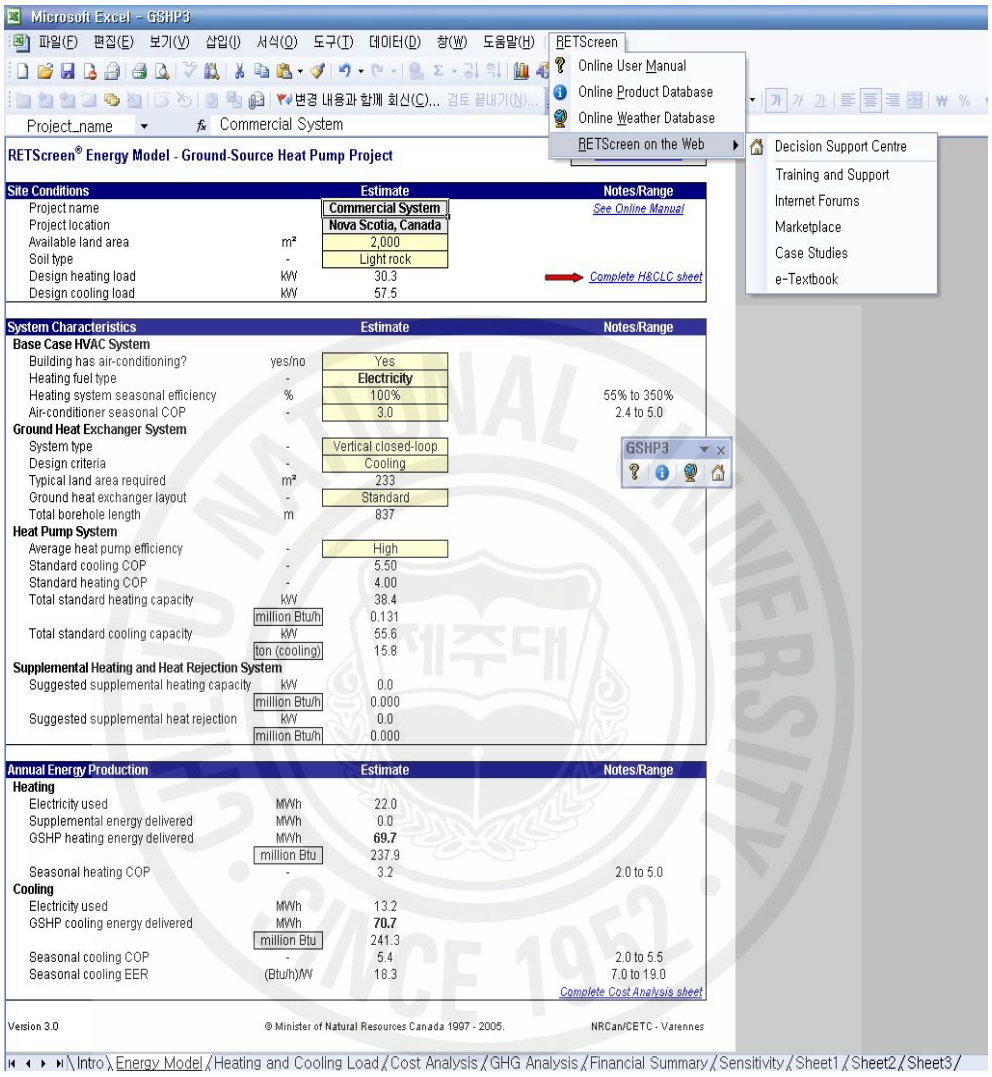


Fig. 5-3 Energy model worksheet

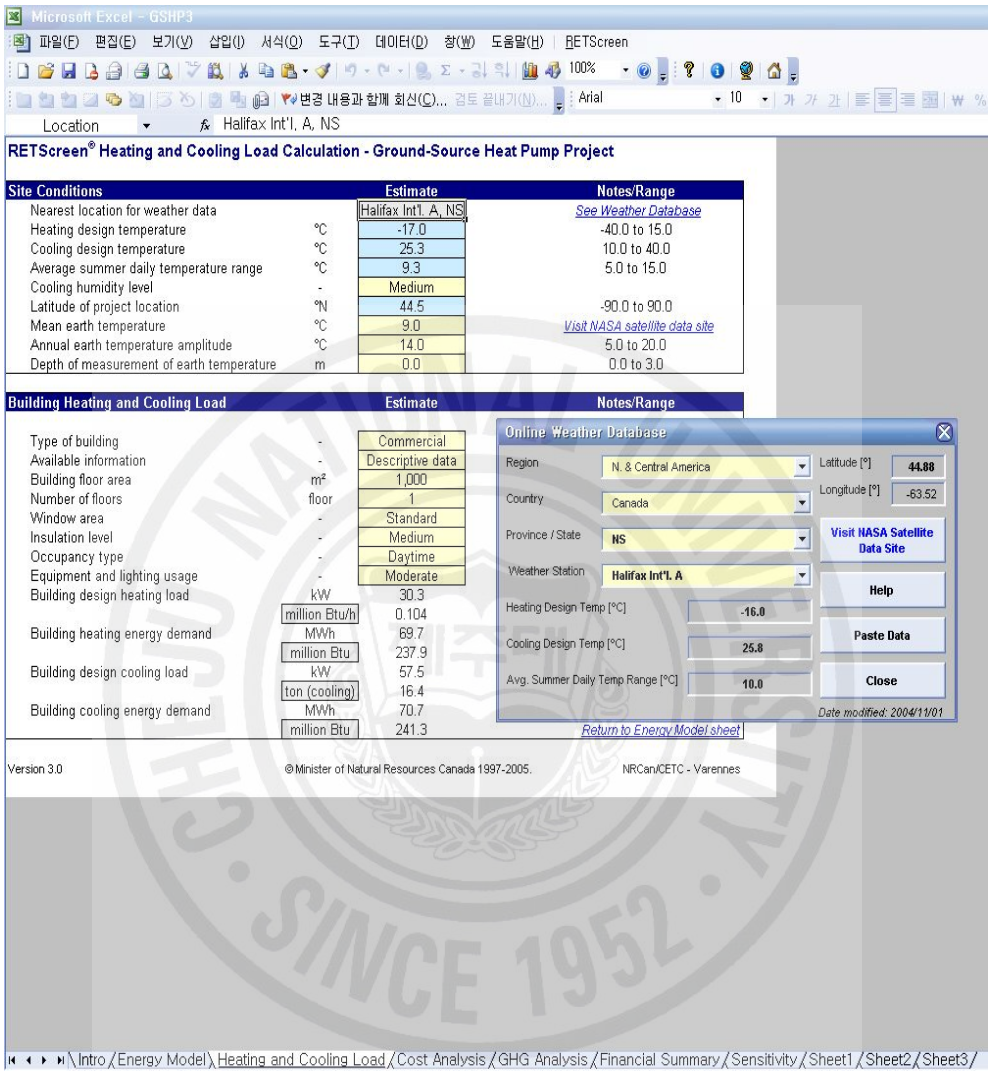


Fig. 5-4 Heating and cooling load worksheet

RETScreen® Cost Analysis - Ground-Source Heat Pump Project

Type of analysis: Pre-feasibility | Currency: $ | Cost references: None

Initial Costs (Credits)	Unit	Quantity	Unit Cost	Amount	Relative Costs	Quantity Range	Unit Cost Range
Feasibility Study							
Other - Feasibility Study	Cost	0	$ -	$ -		-	-
Sub-total:				$ -	0.0%		
Development							
Other - Development	Cost	0	$ -	$ -		-	-
Sub-total:				$ -	0.0%		
Engineering							
Other - Engineering	Cost	0	$ -	$ -		-	-
Sub-total:				$ -	0.0%		
Energy Equipment							
Heat pumps	kW cooling	55.3	$ 330	$ 18,243		-	-
Well pumps	kW	0.0	$ -	$ -		-	-
Circulating pumps	kW	0.9	$ 850	$ 799		-	-
Circulating fluid	m³	0.16	$ 2,600	$ 412		-	-
Plate heat exchangers	kW	0.0	$ -	$ -		-	-
Trenching and backfilling	m	0	$ -	$ -		-	-
Drilling and grouting	m	897	$ 12.00	$ 10,762		-	-
Ground HX loop pipes	m	1,794	$ 2.50	$ 4,484		-	-
Fittings and valves	kW cooling	55.3	$ 12.00	$ 663		-	-
Other - Energy Equipment	Cost	0	$ -	$ -		-	-
Electric central heating system	Credit	1	$ 20,000	$ (20,000)		-	-
Sub-total:				$ **15,364**	71.6%		
Balance of System							
Supplemental heating system	kW	0.0	$ -	$ -		-	-
Supplemental heat rejection	kW	0.0	$ -	$ -		-	-
Internal piping and insulation	kW cooling	55.3	$ 60	$ 3,317		-	-
Other - Balance of System	Cost	0	$ -	$ -		-	-
Credit - Balance of System	Credit	1	$ 1,000	$ (1,000)		-	-
Sub-total:				$ **2,317**	10.8%		
Miscellaneous							
Training	p-h	14	$ 70	$ 980		-	-
Contingencies	%	15%	$ 18,661	$ 2,799		-	-
Sub-total:				$ **3,779**	17.6%		
Initial Costs - Total				$ **21,460**	100.0%		

Annual Costs (Credits)	Unit	Quantity	Unit Cost	Amount	Relative Costs	Quantity Range	Unit Cost Range
O&M							
Property taxes/insurance	project	0	$ -	$ -		-	-
O&M labour	m²	1,000	$ 2.50	$ 2,500		-	-
Travel and accommodation	p-trip	0	$ -	$ -		-	-
Other - O&M	Cost	0	$ -	$ -		-	-
Credit - O&M	Credit	1	$ 3,500	$ (3,500)		-	-
Contingencies	%	5%	$ 17,681	$ 884		-	-
Sub-total:				$ **(116)**	-22.4%		
Fuel/Electricity							
Electricity	kWh	**40,633**	$ **0.060**	$ 2,438		-	-
Incremental electricity load	kW	**-15.0**	$ **120**	$ (1,805)		-	-
Sub-total:				$ **633**	122.4%		
Annual Costs - Total				$ **517**	100.0%		

Periodic Costs (Credits)		Period	Unit Cost	Amount	Interval Range	Unit Cost Range
Heat pump compressor	Cost	10 yr	$ 5,000	$ **5,000**	-	-

Intro | Energy Model | Heating and Cooling Load | Cost Analysis | GHG Analysis | Financial Summary | Sensitivity | Sheet1 | Sheet2 | Sheet3

Fig. 5-5 Cost analysis worksheet

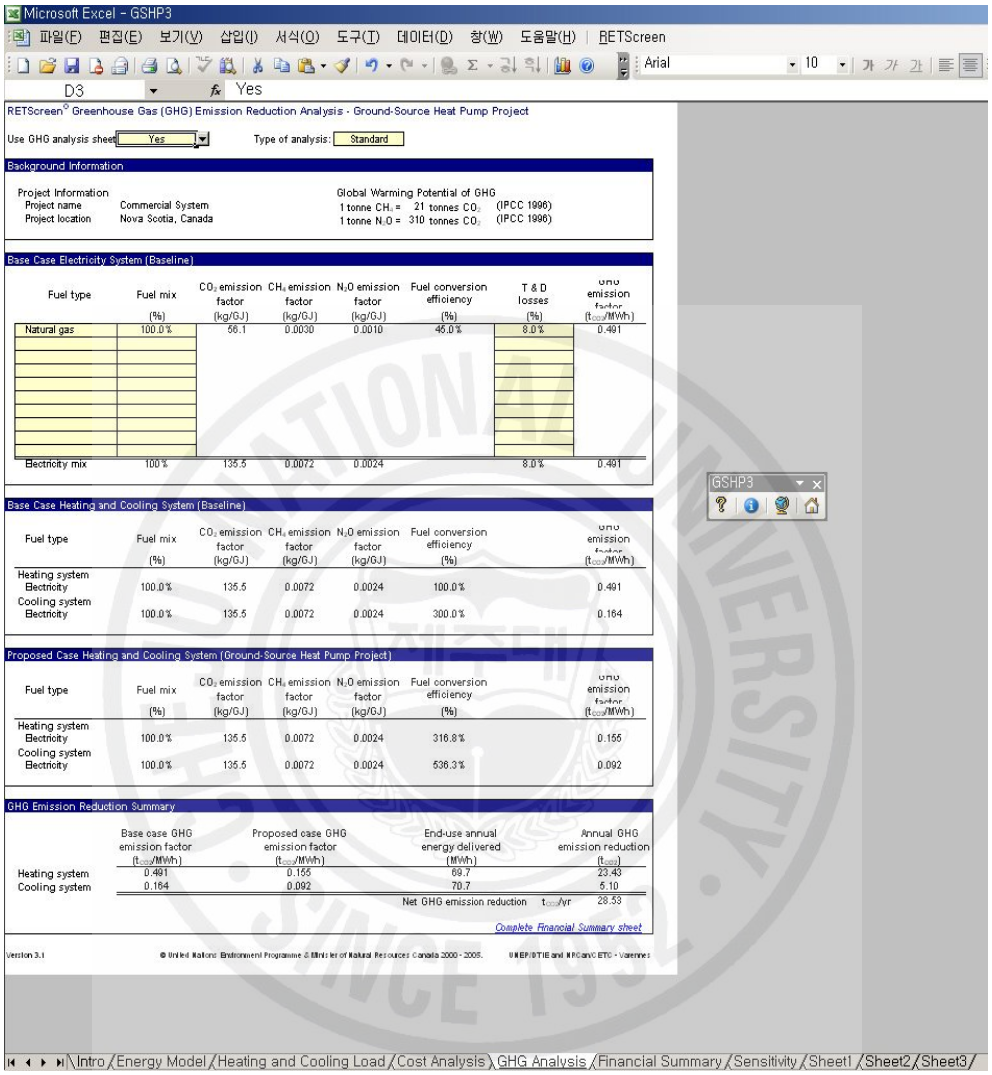
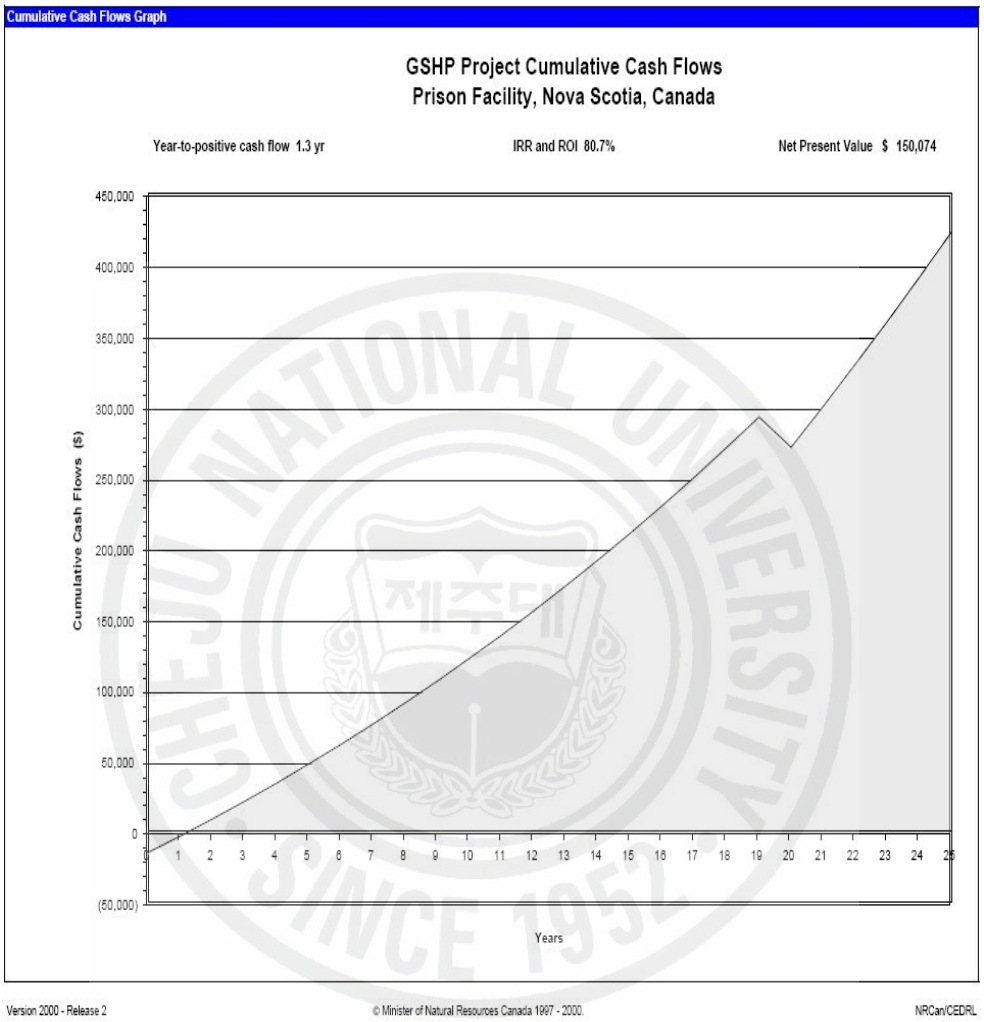


Fig. 5-6 Green-house gas(GHG) emission reduction analysis worksheet

RETScreen® Financial Summary - Ground-Source Heat Pump Project



Version 2000 - Release 2
© Minister of Natural Resources Canada 1997 - 2000.
NRCan/CEDRL

Fig. 5-7 Life cycle cost

Table. 5-2 Verification of RETScreen reliability

		Heating Energy use	**Difference(%)**
		kWh	
Toronto	RETScreen	37,202	**1.4**
	Monitored	36,686	
Montreal	RETScreen	36,138	**1.8**
	Monitored	35,490	
Charlottetown	RETScreen	37,158	**0.6**
	Monitored	36,922	
Winnipeg	RETScreen	33,243	**1.0**
	Monitored	32,926	
Vancouver	RETScreen	37,888	**-3.0**
	Monitored	39,016	

Ⅵ. 결 론

본 연구에서는 지금까지 연구된 지중 온도 예측식 중 간단한 표현인 Krarti 지중 온도 예측식과 Spitler 지중 온도 예측식에 의한 지중 온도 예측값과 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치에 의해 한국에너지기술연구원내 시추된 깊이 50m와 100m의 보어홀을 측정한 실제데이터와의 비교/분석을 통해 지중의 열적 특성을 예측하고 검증하였다. 또한 지중 온도 예측의 핵심변수인 열전도율과 열확산율의 측정 보완을 위해 토양 열적 특성 측정장치를 이용한 실질적인 지중의 열적 특성 측정 및 분석을 수행하였고, 마지막으로 지중 열교환기 설계 프로그램인 RETScreen을 이용하여 지열원 히트펌프 성능예측 기술 살펴보았다. 이와 같은 연구를 수행한 결과는 다음과 같다.

1. 일반적으로 일정깊이 이상에서의 지중 온도는 일정한 지온 경사를 갖으나 그 깊이 이하에서는 지상의 외기조건의 영향을 받는다. 실제로 깊이 16m 이내의 온도가 대기온도 및 일사량등의 영향을 받아 지중 온도 변화가 크게 일어남을 확인할 수 있었다. 지열원 히트펌프 성능 예측 및 검증을 위해 실제 시추된 깊이 50m와 100m 보어홀에 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치를 이용하여 측정한 후 비교한 결과 깊이 100m의 보어홀의 여름철과 겨울철 피크온도의 경우 각각 깊이 2m에서 11.3℃, 깊이 10m 에서 16.2℃이다. 그러나 깊이 50m 보어홀인 경우 겨울철 피크온도는 열교환기에서 10.2℃이다. 이렇게 차이가 나는 이유는 깊이 50m의 보어홀이 시추되어진 곳 주변의 나무들에 의해 깊이 100m의 보어홀이 시추되어진 곳보다 음영이 빨라짐으로 일사량이 상대적으로 적기 때문으로 사료된다.

2. 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치에 의해 지중 온도를 측정하는데 소요된 시간은 약 1시간 이내의 시간으로 기존 열응답테스터와 비교하여 약 50배 이상 시간이 절감되어 매우 빠르고 정확히 측정 가능하였다. Matlab 시뮬레이

션 도구를 이용하여 깊이 100m 보어홀을 Krarti 지중 온도 예측식과 Spitler 지중 온도 예측식에 의해 산출된 지중 온도 예측값을 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치에 의해 측정된 실제데이터와 비교하고 분석한 결과, 깊이 16~60m 구간의 약 0.5℃ 온도 차이를 보이긴 하였으나 이는 측정 결과값에 대한 오차값 범위내로 거의 일치하지 않는 경향을 보였다.

3. 초고속 무선 지중 열교환 유효도 측정장치에 의해 구한 열전도율은 보어홀의 온도를 측정할 때 깊이 80~100m 구간에서 측정된 것으로 보어홀내 열전도율의 변화를 고려할 때 좀 더 정확한 측정이 요구된다. 따라서 이에 대한 보완을 토양 열적 특성 측정장치를 이용하였고 경산지역 시설원예용 지열원 이용 시스템에 수평형 지중 열열교환기 매설시 채취된 깊이 0~2.0m 구간의 토양을 깊이 0.5m 간격으로 채취하여 측정하였다. 그 결과, 열전도율 및 열확산율은 깊이 1m를 기준으로 최대 $\Delta K \fallingdotseq 0.5$, $\Delta \alpha \fallingdotseq 1.6$의 차이를 보여 깊이 0～1.0m구간과 깊이 1.0～2.0m구간은 서로 다른 지질층이라 예상하였다. 그러나 토양의 수분함량 측정방법인 중량법에 의거하여 깊이 0.5m당 채취한 시료를 드라이 오븐에 18시간 이상 넣어 완전 건조시킨후 측정한 결과 깊이 0~2.0m 전구간의 열전도율과 열확산율은 각각 $K \fallingdotseq 0.19$, $\alpha \fallingdotseq 0.16$으로 변화가 거의 없음이 확인하였다. 이를 미루어 볼 때 깊이에 따라 측정된 토양은 수분함량이 토양의 열적 특성 측정에 매우 큰 영향을 미침을 알 수 있었고 수분함량에 따른 토양 열적 특성 변화에 대한 연구가 추가적으로 이뤄져야할 것이다.

4. 지열원 히트펌프 성능예측을 위한 지중 열교환기 설계 프로그램에 대해 살펴보았고 그 중 가장 많이 사용되고 있는 RETScreen 지중 열교환기 설계 프로그램에 관한 내용과 프로그램 구현방법에 대해 알아보았다. 그 결과 RETScreen을 통해 지열원 히트펌프의 성능 예측기술이 적용 가능하고 그에 따른 지열원 히트펌프의 경제성과 신뢰성 또한 분석 가능함을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해 향후 이와 관련한 지열 열적 특성 측정 및 예측 기술을 개선시켜 지열원 히트펌프의 전반적인 성능 및 효율향상을 기대할 수 있게 되었다.

참 고 문 헌

[1] Lund, J.W. and Freeston, D.H. ,2001, "World-wide direct uses of geothermal energy", Geothermics, Vol 30, pp29-68

[2] 산업자원부, 2003, 2차 신·재생에너지 기술 개발 및 이용·보급 기본계획

[3] 이의준, 2005, "지열에너지 자원활용 기술 및 GSHP 국내외 이용 현황“, 2005 신재생에너지 workshop 기술강좌, pp66-87

[4] 산업자원부 보고서, 2005, “현지용 지중 열전도율 예측기술 개발”

[5] Frank P. Incropera & David P,DeWitt, 1999, "열전달", 교보문고, pp72-77

[6] Krarti, M., Claridge, D.E., and Kreider, J. F., 1995, "Analytical Model to Predict Nonhomogeneous Soil Temperature Variation," Journal of Solar Energy Engineering, Vol, 117, pp.100-107.

[7] Krarti, M., Lopez-Alonzo, C., Claridge, D.E.,and Kreider, J. F., 1995, "Analytical Model to Predict Annual Soil Surface Temperature Variation," Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 117, pp91-99

[8] RETScreen ground-source heat pump project analysis chapter, pp27-28

[9] Kavanaugh SP, Rafferty K. Ground-source heat pumps: design of geothermal systems for commercial and institutional buildings. Atlanta: ASHRAE, Inc; 1997 p. 22-31.

[10] Sanner B, Hellstrom G, Spitler J and Gehlin S, Thermal Response Test - Current status and World Wide applications, Proceed. World Geothermal Congress, Antalya, Turkey April 2005. Paper 1436.

[11] Rohner, E., Rybach, R., and Scharli, U., 2005, "A New, Small, Wireless Instrument to Determine Ground Thermal Conductivity In-Situ for Borehole Heat Exchanger Design", World Geothermal Congress.

[12] Carslaw, H.S. and J.C. Jaeger(1959) Conduction of Heat in Solids, 2nd Edition. Oxford, London.

[13] Abramowitz, M. and I. A.Stegun(1972) Handbook of mathematical functions. Dover Publications, Inc., New York

[14] Marquardt, D. W.(1963) "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters" J. Soc. Indust. Appl. Math. 11:431-441

[15] 농업과학기술원.2000. 토양 및 식물체 분석법.

[16] Ahmed T Naveed, 2005, "RETScreen® Ground Source Heat Pump(GSHP) Application for Korea", 한국 신•재생에너지학회 춘계학술대회, Vol 2, 678-683

[17] 이의준, 2005, “신재생에너지시스템 성능평가 도구 RETScreen 연구동향”, 기계저널, pp84-85

CHEJU NATIONAL UNIVERSITY · SINCE 1952 · 제주대

감사의 글

지난 2년간의 땀흘린 노력의 시간들은 새로운 시작을 위해 첫발을 내딛는 저에게는 너무도 소중하고 값진 시간이었습니다. 또한 이 시간들을 추억으로만 간직하기엔 아쉬움이 클만큼 배움의 즐거움과 인생의 큰 가르침을 얻을 수 있었던 매우 의미있는 시간이기도 합니다. 너무도 부족한 저에게 많은 가르침과 뜻깊은 시간을 갖게 해주신 주변의 많은 분들께 제 조그마한 마음을 담아 감사의 뜻을 전하고자 합니다.

오늘의 노력의 결실이 있기까지 언제나 수많은 지도와 격려를 아끼지 않으시고 사랑으로 감싸주시던 이의준 박사님과 강은철 선배님께 글로 표현할 수 없을 만큼 너무도 큰 감사의 마음을 전해드립니다. 그리고 항상 따스히 맞아주시고 자상하고 인자하게 지도해주신 존경하는 현명택 교수님께도 진심으로 감사의 마음을 전합니다.

바쁘신 와중에도 제 논문에 많은 관심을 가져주시고, 심사까지 맡아주신 박윤철 교수님과 허종철 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 학연생인 이유로 자주 찾아뵐 수 없었지만, 학교에 있을 때마다 많은 격려를 아낌없이 해주신 기계공학과 교수님들과 강철웅 교수님, 조경호 교수님, 임종환 교수님을 비롯한 메카트로닉스 전공 교수님들께도 감사의 마음을 전합니다. 그리고 고향을 찾을때마다 타향살이 하느라 고생한다며 늘 뜨거운 가슴으로 맞아주시는 열전달 & 열시스템 실험실의 이동원 선배님, 양원호 선배님, 군철, 권태, 광일을 비롯한 여러 선후배님들과 어려운 문제를 슬기롭게 대처할 수 있도록 조언해주신 건설기술연구원의 강병찬 선배님, 오동훈 선배님, 기계공학전공 과사 선생님들, 그리고 송태복 선배님외 여러 동문님들께도 고마움의 뜻을 전합니다.

한국에너지기술연구원에서 학연생으로 지내온 2년간의 시간은 제 인생의 새로운 지표를 마련하게 해준 매우 뜻깊은 시간이였습니다. 이러한 큰 가르침을 주신 윤형기 박사님, 박준택 박사님, 박성룡 박사님, 우정선 박사님 그리고 태양

열수력센터의 조일식 박사님과 주문창 선생님께 감사드립니다. 또한 언제나 따스한 관심과 격려를 아끼지 않으셨던 장기창 박사님, 라호상 선생님, 활기차시고 매사에 적극적인 자세로 제 연구원 생활의 지표가 되어주신 구인회 박사님, 백영진 박사님, 김지영 선배님과 궂은 일 도맡아 하면서도 늘 미소를 잃지 않는 관종, 건혁, 용대, 명진을 비롯한 미활용지열센터의 여러 형제님들께 감사의 마음을 전하며 앞으로 하시는 모든일에 무궁한 발전이 있으시길 기원합니다.

고향의 향수와 그리움을 한잔의 술과 함께 달래주시며, 어려울때마다 기댈 수 있는 편안한 버팀목이 되어 주신 강명철 선배님, 김양훈 선배님, 김형종 선배님께 감사드리고 축구를 통해 많은 기쁨과 즐거움을 함께 할 수 있게 해주신 강기환 박사님, 안세진 박사님, 김순환 선생님을 비롯한 여러 한국에너지기술연구원 축구클럽 회원님들과, 친형처럼 질책과 격려를 아끼지 않으셨던 충현형, 경수형 그리고 언제나 따스한 사랑으로 감싸주시던 류재홍님, 옥행지님, 조영래님, 신정희님, 김진영 사장님, 조아라님께 감사의 마음을 전해드립니다.

힘들고 지칠때 용기를 북돋아주는 사랑하는 친구 태윤, 아름(도현), 영필, 봉만, 호석, 성기, 진선이와 친동생 같이 잘 따라주었던 김진환, 서덕현 전우님, 그리고 언제나 편안한 안식처가 되어주는 사랑하는 문혜성님께 제 진심어린 감사의 마음을 담아 전해드립니다.

끝으로 제가 없는 동안 저의 빈자리를 채워주신 사랑하는 두 형님께 고마움을 전하고, 한없이 부족한 저를 오늘에 있기까지 항상 바른길로 이끌어주시고 늘 지켜봐주신 존경하는 아버지와 하늘에 계신 사랑하는 어머니께 제 작은 결실과 함께 머리 숙여 감사의 마음을 전합니다.

2007년 1월 김 용 환