

碩士學位論文

수직형 지중열교환기의 열교환  
유효도 측정 기술에 대한 연구

The image features a large, faint watermark of the Jeju National University logo in the background. The logo is circular, containing a stylized flame or leaf design in blue, green, and purple. Below the design, it says 'JEJU 1952'. The text 'JEJU NATIONAL UNIVERSITY 1952' is written around the top half of the circle, and '제주대학교' is written around the bottom half.

濟州大學校 大學院

機械工學科

高 健 赫

2009年 2月

# 수직형 지중열교환기의 열교환 유효도 측정 기술에 대한 연구

指導教授 玄明擇

共同指導教授 李義駿

高健赫

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함

2008年 12月

高健赫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

2008年 12月

# A study on the Heat Transfer Effectiveness Measurement of a Vertical Geothermal Heat Exchanger

Gun-Hyuk Ko

(Supervised by Professor Myun-Taek Hyun)

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

2008 . 12

JEJU  
1952

Department of Mechanical Engineering  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

<b>LIST OF FIGURES</b> .....	i
<b>LIST OF TABLES</b> .....	ii
<b>NOMENCLATURE</b> .....	iii
<b>SUMMARY</b> .....	iv
<b>I. 서론</b> .....	<b>1</b>
1-1 연구배경 .....	1
1-2 국내외 연구동향 .....	4
1) 국외동향 .....	4
2) 국내동향 .....	5
1-3 연구목적 .....	6
<b>II. 지중열교환 유효도 측정에 관한 이론</b> .....	<b>7</b>
2-1 지중열교환 유효도 측정방법의 종류 .....	7
1) 정상상태법 .....	7
2) 과도상태법 .....	7
3) 현지측정법 .....	8
2-2 현지 지중열교환 유효도 산출 방법 .....	11
1) 선형열원 모델(cTRT) .....	11
2) Fourier의 법칙을 이용한 모델(eTRT) .....	16
<b>III. 실험 장치 및 방법</b> .....	<b>18</b>
3-1 열유체식 지중열교환 유효도 측정장치(cTRT) .....	18
1) 실험 장치 .....	18

2) cTRT 현지 지중열교환 유효도 산출 방법 .....	24
3-2 전자식 지중열교환 유효도 측정장치(eTRT) .....	27
1) 실험 장치 .....	27
2) eTRT 현지 지중열교환 유효도 산출 방법 .....	30
<b>IV. 실험 결과 및 고찰 .....</b>	<b>33</b>
4-1 cTRT를 통한 지중열교환 유효도 측정 결과 .....	33
4-2 eTRT를 통한 지중열교환 유효도 측정 결과 .....	38
<b>V. 결 론 .....</b>	<b>46</b>
참고문헌 .....	48



## LIST OF FIGURES

Fig. 1 Shallow geothermal temperature profile .....	3
Fig. 2 TP02 sensor and CR10X data Logger system .....	10
Fig. 3 Borehole temperature profile on thermal response test .....	15
Fig. 4 Conventional thermal hydraulic thermal response test (cTRT) .....	20
Fig. 5 Schematic diagram of cTRT circuit .....	21
Fig. 6 Photograph of sensor and data logger, software .....	22
Fig. 7 Photograph of controller box of cTRT .....	23
Fig. 8 The filed test of thermal conductivity .....	26
Fig. 9 Wireless P/T probe and block diagram(eTRT) .....	29
Fig. 10 eTRT insert to U-tube .....	31
Fig. 11 eTRT measurement and recovery method .....	32
Fig. 12 The picture cTRT and geothermal heat exchange loop at KIER .....	35
Fig. 13 Inlet and outlet temperature variations with time .....	36
Fig. 14 Temperature plot respect with logarithmic time .....	37
Fig. 15 Temperature variations with depth .....	40
Fig. 16 Temperature gradient variations with depth .....	41
Fig. 17 Seasonal temperature variations with depth .....	42
Fig. 18 Seasonal temperature variations with depth .....	43
Fig. 19 Temperature zone variations with depth .....	44
Fig. 20 Local conductivity variations with depth .....	45

## LIST OF TABLES

Table 1 Specifications of conventional thermal hydraulic thermal response test (cTRT) .....	19
Table 2 Specifications of electronic thermal response test (eTRT) .....	28
Table 3 Specifications of the ground heat exchanger and the results .....	34
Table 4 The result of thermal response test .....	34



## NOMENCLATURE

### Roman

- $T_o$  : Temperature of ground [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $Q$  : Heat transfer rate [W]  
 $L$  : Borehole length [m]  
 $k$  : Thermal conductivity [W/mK]  
 $C$  : Specific heat [J/m $^3$ K]  
 $T_m$  : Mean temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $T_{in}$  : Inlet temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $T_{out}$  : Outlet temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $T_b$  : Temperature of borehole wall [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $t$  : Time after start of heat injection [hr]  
 $r$  : Radius from line source [m]  
 $q_{loc}$  : Local terrestrial heat flow value [W/m $^2$ ]  
 $R_b$  : Thermal resistance [K/w]  
 $x$  : Depth [m]

### Greek Symbol

- $\alpha$  : Thermal diffusivity [m $^2$ /day, m $^2$ /s, mm $^2$ /s]



## Summary

One of key design factors is the geothermal heat transfer effectiveness of the actual site to be installed. The effectiveness is the function of geological characteristics such as soil and rock and ground water contact etc. Therefore, the actual site measurement is so important for the successful design and operation of ground source heat pump(GSHP) system. The purpose of this study is to investigate the convectonal thermal response test(cTRT) based on kelvin's line source theorem and to compare and propose and validate a better enhanced thermal response test(eTRT) based on Fourier's law. The main results are:

(1) The average effectiveness from cTRT at the KIER(Korea Institute of Energy Research) site was measured as 2.58 W/m.K at KIER experiment site.

(2) The average effectiveness from eTRT at the KIER site was measured as 2.63 W/m.K at KIER experiment site.

(3) The study indicated that eTRT could be used with eTRT to predict a more detail temperature variation depending upon the depth.

Therefore, this study could conclude that eTRT could be utilized with cTRT to understand the actual site thermal characteristics along the depth.

# 1. 서론

## 1-1 연구배경

지열에너지는 지중 얇은 곳의 토양온도차를 이용하는 천부지열과 지중 깊은 곳의 뜨거운 열을 이용하는 심부지열로 구분된다. 천부지열에 속하는 지층의 온도 변화를 Fig. 1과 같이 구간별로 구분하면, 일사량 및 기후에 영향을 받는 태양열 영역(Solar zone), 일사량 및 기후의 영향과 지중 온도의 영향을 받는 중간 경계 영역(Neutral zone)과 지중 온도의 영향을 받는 지열 영역(Geothermal zone)으로 나눌 수 있다. 각 구간에 온도 분포에 대해서 분석하여 보면 태양열 영역인 경우에는 일사량 및 기후의 영향을 받아 계절별 온도 변화가 극심하게 일어나는 구간이고 중간 경계 영역은 일사량 및 기후의 영향과 지중 온도의 영향을 동시에 받아 일정한 온도 분포를 보이는 구간이며 지열 영역은 지중 온도에서만 영향을 받아 깊이가 깊어질수록 온도가 점점 증가하는 구간이다.

현재 우리나라에서는 지중 깊이 200m 이내의 천부지열을 이용하는 지열히트펌프 시스템(Ground source heat pump, GSHP)이 빠르게 보급되고 있으며 지열히트펌프 시스템은 다른 열원 기기에 비해 많은 에너지를 절약할 수 있는 시스템으로써 건물에 냉·난방, 농업용 원예시설 등에 다양하게 이용하고 있다. 지열히트펌프 시스템은 크게 지중열교환기(Ground source heat exchanger), 히트펌프(Heat pump), 부하기기 등으로 구분되어지며 실제 적용 시 설치 환경 및 운전 조건에 대해서 많은 영향을 받는다. 시스템 구성 요소 중 지중열교환기는 지열원과 히트펌프의 작동유체를 열교환시켜 지열을 사용할 수 있도록 하는 부분으로써 지열히트펌프 시스템에서 경제적인 면 부분이나 시스템의 성능 면에서 중요한 요소로 자리 잡는다. 경제적인 면을 살펴보면 실제 지열히트펌프 시스템 설치 시 설치비용의 약 60%는 지중열교환기 설치비용에 사용되어지며 과도한 지중열교환기 설계는 지열히트펌프의 설치비의 증가를 가져올 수 있다. 반면 시스템 성능면에서의 지중열교환기는 토양을 열원으로 사용하기 위한 중요한 요소로써 적정치 이하로 설치될 시 시스템의 성능을 저하시키는 요인이 될 수 있다.

이처럼 지중열교환기 설계에 있어 지중특성에 맞는 지중열교환기 용량을 선정하는 것은 매우 중요하며 이것을 결정하는 요인이 지중열교환 유효도이다. 지중열교환 유효도는 단위 온도경사하에서 단위시간당 단위면적을 통과하는 열량을 나타내며 이러한 지중열교환 유효도를 측정하고 분석하는 것은 지열히트펌프 시스템 설계 및 지중열교환기 용량을 결정짓는 아주 중요한 요소이다. 따라서 지열히트펌프 시스템을 적용하는데 있어 지중열교환 유효도는 열유체 방식인 cTRT에 의한 측정이 의무화 되어져 있으며, 이 외에도 지중 특성을 파악하기 위한 많은 연구가 진행되어지고 있다.

현재 우리나라인 경우 여러 가지 지중열교환 유효도 측정 기술 중 열유체 방식(conventional thermal response test, cTRT)이 많이 보급되어 있으며 열유체 방식은 지중열교환기 내에 일정한 열을 가지고 있는 유체를 순환시켜 지반과 고온의 유체 사이에 열교환 후 이때의 지중열교환기 입·출구 유체 온도차를 이용하는 방법이다. 이러한 방법은 지중 전체를 하나의 시스템으로 보는 거시적 관점에서 이루어지는 기술로써 기존의 열유체 방식은 현지에 설치되어 있는 지중열교환기에 대해서 전체적이면서 평균적인 지중열교환 유효도를 구하는데 용이하다. 그러나 열유체 방식의 지중열교환 유효도 측정 장치는 오랜 측정 시간과 더불어 측정을 위한 많은 소비동력이 요구된다. 또한 실질적으로 토양은 깊이에 따라 열적 특성이 구분되어지고 같은 기후에서도 수분량, 공극율, 일사량에 따른 열적 거동 변화가 있다. 기존의 열유체 지중열교환 유효도 측정 장치는 이와 같은 사항에 대한 측정 및 분석이 불가능하여 토양에 대한 자세한 정보 수집에 한계가 있다. 이에 본 논문에서는 깊이별 토양에 대해서 지중 열적 거동 분석이 가능한 전자식 지중열교환 유효도 측정 장치(electronic thermal response test, eTRT)를 이용하여 각 지층의 열적 거동에 대해서 측정 및 분석 방법을 개발하고 기존의 지중열교환 유효도 측정 방식과 비교를 통해 지중열교환 유효도 측정 방법에 대해서 검증하고 새로운 방법을 제시 하고자 한다.

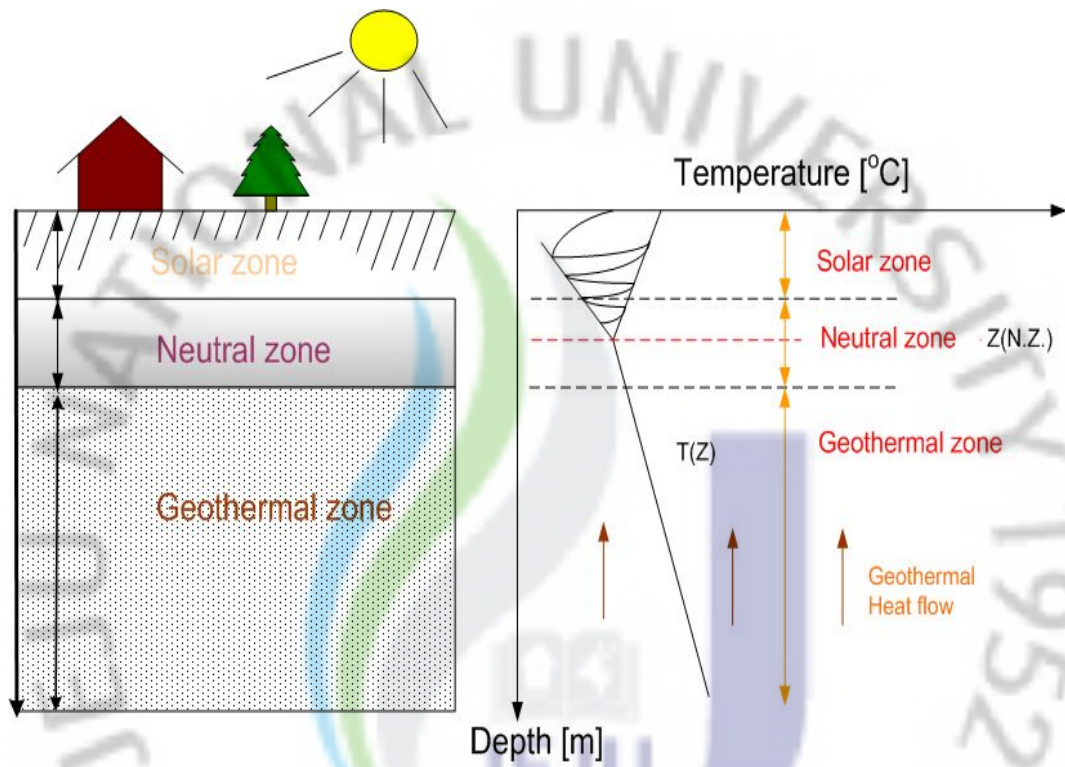


Fig. 1 Shallow geothermal temperature profile

## 1-2 국내외 연구동향

### 1) 국외동향

국외의 경우 미국을 비롯한 유럽, 일본 등의 선진국에서는 이미 지중열교환 유효도 측정 시스템에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 미국과 스웨덴에서는 차량을 이용하여 이동이 가능한 모바일 형식의 현지 지중열교환 유효도 측정하는 장치를 1995년 독자적으로 개발하였으며, 스웨덴은 Lulea 공과대학에서, 미국은 Oklahoma 주립대학교에서 개발되었다. 이러한 측정장치는 모두 Mogensen의 개념에 기초하였으며, 지중으로의 열 주입 방식은 가열장치를 이용하는 방식을 채택하고 있다. 그 후 유사한 장치들이 다른 국가들에서도 개발되었으며 Signhild Gehlind의 보고(2002. 10) 내용에 따르면, 2001년 12월까지 지중열교환 유효도 시험 장치를 개발하여 적용하고 있는 국가는 미국과 스웨덴을 필두로 캐나다, 독일, 네덜란드, 노르웨이, 터키, 영국 등 8개국으로 보고되고 있으며 2002년에는 프랑스, 스위스에서도 지열분야에 관련 기술을 적용하고 있고, 일본에서는 스위스에서 개발한 장치와 유사한 장치를 만들었다. 결과적으로 2002년도 10월까지 현지 지중열교환 유효도 시험 장치를 제작하거나 측정 실적이 있는 국가는 12개 국가로 추정된다.<sup>(1)</sup>

또한 스위스에서는 전자식 지중열교환 유효도 측정장치를 발명하여 보어홀에 깊이별 온도 변화 측정 및 지중열교환 유효도 측정에 사용되어지고 있다.<sup>(2)</sup>



## 2) 국내동향

우리나라에서 지열히트펌프시스템을 도입하여 기업에서 활동을 시작한 시기는 2000년에 들어서이다. 이때 지중열교환 유효도 측정장치는 미국에서 수입한 열유체식 측정장치로써 Ewbank사에서 제작한 장치이며, 전열기 총용량은 2.5kW 정도이며 1.25kW 전열기 2개가 직렬로 연결되어있다. 우리나라에서 처음 제작한 지중열교환 유효도 측정장치 역시 열유체식 지중열교환 유효도 측정장치이며 문헌을 통한 현지 지중열교환 유효도 측정 장치의 개념도를 이용하여 국내에서 자체 제작한 장치로써 전열기 총용량은 5.2kW 정도이며 2.6kW 전열기 2개가 직렬로 연결되어있는 형태이다. 이처럼 초반에 수입되어지거나 제작되어진 지중열교환 유효도 측정의 중요성을 크게 인식 못하였고 이 후 지중열교환 유효도 측정에 대한 중요성을 인식하여 측정장치 개발에 심려를 기울이고 있다. 우리나라 지열시공업체들과 시험인증기관인 한국에너지기술연구원, 한국냉동공조협회 및 호서대학교 등이 있다.

특히 한국에너지기술연구원(KIER)에서는 최근 2005년 국내에서 개발 및 적용 사례가 없는 전자식 지중열교환 유효도 측정 기술인 초고속 무선 지중 열교환기 측정장치와 토양 열적 특성 측정장치를 이용하여 열전도율 시험기술과 시스템 관련 기술이 선행연구로 이루어 졌다.

### 1-3 연구 목적

현지의 냉·난방 지열히트펌프 시스템의 효율적 설계를 위해 지중열교환 유효도 측정은 아주 중요한 과제이다. 냉·난방 지열히트펌프 시스템은 천부지열(Shallow geothermal)에 속하는 0 ~ 200m 토양의 열을 열원으로 사용한다. 우리나라의 경우 천부지열에 속하는 지중토양의 온도가 비교적 높아 연중 약 13~15℃로 대략 일정하며 열원의 관점에서 볼 때 이 정도의 온도는 매우 우수한 온도범위에 속한다. 또한 지중 구조가 단단하고 열전도율이 높은 화강암 계통의 암반이 많으며 이러한 구조는 지중열 활용에 매우 유리한 조건이다. 지중 토양의 열전도율은 일반적으로 0.9 ~ 3.5 kcal/mhr℃의 범위에 있으며 화강암 계통의 열전도율은 이 중 높은 범위에 속하는 2.5 kcal/mhr℃ 이상이므로 지중 열전달에 매우 유리하다. 끝으로 4계절이 뚜렷하여 지중 열원이 냉방을 필요로 하는 하절기에는 우수한 히트싱크로 이용될 수 있다.<sup>(1)</sup>

이와 같이 에너지 자원이 빈약한 우리나라의 경우 이와 같은 지열원은 매우 이로운 신재생에너지원으로 사용 가능하다. 이러한 유리한 조건을 가지고 있음에도 불구하고 국내에서 지열히트펌프 시스템이 크게 확산되지 못하는 주요 원인은 초기투자비가 상용화된 열원 시스템에 비해 높다는데 있다. 지중열교환기 설치비용을 설치 길이에 비례하는 것으로 추정하여 볼 때, 설치길이를 얼마나 적절하게 설계하느냐는 지열을 이용한 분야에서 중요한 요인으로 자리 잡고 있다. 지중열교환기 설치 길이에 영향을 주는 주요 요인은 일반적으로 지중열교환 유효도와 지중열교환기의 전열저항이다. 지중열교환기의 소요길이  $L$ 은 지중열교환 유효도( $k$ )가 증가함에 따라 짧아진다. 여기서 지중열교환기 설치비는 대략 지중열교환기의 설치 길이에 비례한다고 볼 때 지중열교환 유효도의 중요성을 알 수 있다. 그러나 기존의 지중열교환 유효도 측정은 앞서 설명한 바와 같이 지중열교환기의 전체적인 면에서만 측정이 가능하지만, 현지에 지중열교환기가 설치되어 있는 토양의 지중 열적 거동에 대한 해석이 불가하며, 현지 환경에 따른 많은 제약이 따른다. 따라서 천부지열에 속하는 토양의 지중 열적 거동 분석 및 기존의 지중열교환 유효도 측정방법의 개선 방안에 대한 연구가 필요하다.

## II. 지중열교환 유효도 측정에 관한 이론

### 2-1 지중열교환 유효도 측정방법의 종류

#### 1) 정상상태법

정상상태법은 채취된 시료를 실험실에서 열을 가하여 정상상태 온도차를 이루게 하고 가한 열량을 측정하여 Fourier의 열전도 방식에 의하여 열전도도를 구하는 방식이다. 유효 열전도성을 구하기 위해 가장 일반적으로 사용되는 정상상태법은 열관시험법(Guarded hot plat test)이다. 이와 같은 측정 방식은 먼저 시료 2개를 외부 보호 히터로 감싼 평평한 열관의 아래와 위에 각각 위치시킴으로써 보호 히터의 열손실을 막으며, 열이 시료를 통해 아래위로 이동할 수 있도록 한다. 시료의 외부 표면에는 차가운 물이 담긴 히트싱크를 둔다. 두께를 알고 있는 시료를 통해 일정한 온도로 떨어뜨린다. 단위 시간당 전달되는 열의 양과 시료의 단면적을 알 수 있기 때문에, Fourier 법칙으로 열전도성을 구할 수 있다. 이 방법은 시간이 많이 걸리며, 실내 실험만 가능하다.<sup>(1)</sup>

#### 2) 과도상태법

과도상태법 중 가장 일반적인 방법은 열침법(Thermal needle method)이다(De Vries and Peck, 1958). 열침법은 실험실에서 이루어지는 방식으로 열침을 시료에 넣고 가열하면 시료의 열전도도에 따라 열침의 온도 증가가 달라지는 성질을 이용하여 선형열원(line source)에 의하여 시료의 열전도도를 구한다. 이 방식은 빠른 시간내에 열전도도의 측정이 가능하여 많은 시간을 소요하지 않는다. 이는 실내나 현장에서 토양의 유효열전도성을 손쉽게 빠르게 구할 수 있는 방법으로, ASTM D5334에 자세히 설명하고 있다. 열침을 토양 시료에 관입하여 토양의 열전도성에 따른 열침의 온도 상승률을 구한다. 열침법의 이론은 균질, 균등한 매질에 있는 선형열원의 이론을 도입한다. Carslaw and jaeger(1947), Ingersoll et al.(1954), Heat and Couvillion(1986)은 원통형 좌표계에서 1차원 열전달에 관한 일반 Fourier 방정식을 이용해 유도하였다. 이 방법은 실험결



과 현장에서 모두 사용할 수 있으며, 열침 장비의 휴대가 쉽고 측정 시간이 짧으므로 여러 곳을 측정할 수 있다.

열침을 이용한 열전도 실험 장치를 이용하는 측정 원리를 Fig. 2의 ASTM D5334-92, D 5930-97과 IEEE 442-1981 표준을 따른 장비인 TP02 센서를 사용하여 CR10X 계측기로 자료를 수집하는 예로 설명하면, Fig. 2의 열선부분을 가열하기 시작하면 열선부의 열전대와 열침 선단부의 열전대가 온도를 동시에 측정하기 시작한다. 열은 열침을 따라 상대적으로 저온인 선단부로 향하게 되며, 이때 접촉하고 있는 토양 입자에 열 손실을 발생시키며 선단부에 도달하게 한다. 최종적으로 시간에 따른 열손실은 토양의 종류 및 특성에 따라 달라지며 이를 근거로 열전도율을 계산한다. 센서에서 측정된 정보는 CR10X 계측기를 통해 사용자의 컴퓨터로 시간과 이에 따른 온도 값이 전송되어 저장된다. 결과의 자료는 시간, 온도 각 구간별 열전도율, 평균 열전도율, 열전도율의 표준편차 등이다. 기본적인 이론은 선형열원 이론이며 최초 과도상태 이후의 온도 상승 소비 전력과 매체의 열전도율에만 좌우된다고 가정한다(Kosky and McVey, 1986).

기준에 시료의 크기는 명확히 정해진 바가 없으나, 열침 반경의 대략 50배 이상이다. 그 이하일 때는 경계조건의 영향을 고려해야만 한다. 실험 시 가장 중요한 것은 시료와 열침의 열적 접촉은 합리적이어야 하고, 시료는 열적으로 정상상태이어야 한다. 열침과 측정하고자 하는 토양 입자가 전체적으로 골고루 접촉하여야 하며, 실제 측정을 시작하기 전에 열침 주변 토양 입자의 안정적인 열전도가 시작되는 5분 내지 10분후에 측정하여야 정확한 열전도율을 구할 수 있다. 계측한 자료의 신뢰도는 열전도율의 표준편차로서 가능하다. 표준편차가 열전도율 값의 10 % 이내면 신뢰성을 가진다고 판단한다.<sup>(1)</sup>

### 3) 현지측정법

현지 토양의 열전도도는 위의 두 가지 측정방법과 같이 일반적으로 시료를 채취하여 실험실에서 구할 수 있는 성질이라고 볼 수 없으며 현장 보존되어 있는 상태인 그대로의 조건하에서 유효열전도도를 구해야 한다. 현장 보존되어 있는 상태란 지중의 깊이에 따라 달라지는 압력, 온도, 지중 구조의 성분, 수분함유량 및 부분적인 지하수의 흐름, 또한 방향에 따라 달라지는 비등방성이 모두 고

려된 조건하에서의 값을 찾아야 하며 단순히 지중시료를 채취하고 실험실로 옮겨서 측정된 값은 실제로 큰 의미가 없다고 볼 수 있다. 따라서 지중구조의 열전도도는 현지시험방식으로 측정해야 가장 바람직하다. 이러한 현지 지중열교환 유효도 측정 방법은 두 가지 방식이 있는데 첫 번째 방식을 보면 다음과 같다.

첫 번째 방식은 설치하고자 하는 지중열교환기와 같은 형태와 크기의 시험정을 설치하고자 하는 장소에 먼저 설치하고 U-관을 매설한 후 히터에서 가열된 온수를 U-관을 통하여 순환시키면서 순환수의 입, 출구 온도를 측정하는 방식이다. 이 방식은 기본적으로 열침법과 같은 직선열원의 원리이나 지중열교환기가 완전한 직선열원이 되지 못하므로 근사적인 직선열원이라고 볼 수 있으므로 선형열원이라는 표현이 합리적일 것이다. 또한 측정된 입, 출구 온도의 해석에 의하여 지중토양의 열전도도가 구하여지며 해석방법에 따라 선형열원 근사법(Line source method), 실린더 열원법(Cylinder sour method), 1차원, 또는 2차원의 수치해석 방법(Numerical method)등이 있다. 본 연구에서는 선형열원 근사법을 이용하여 열유체식 지중열교환 유효도 시험 장치로 측정한 데이터를 해석하여 지중열교환 유효도를 산출하였다.

다음으로 두 번째 방식은 무선 전자식 측정 장치를 지중열교환기에 직접 투하하여 일정시간 간격으로 온도와 압력을 측정하여 깊이별 지중 온도를 얻어 낸 후 Fourier의 열전도 방식에 의하여 지중열교환 유효도를 구하는 방법이 있다.

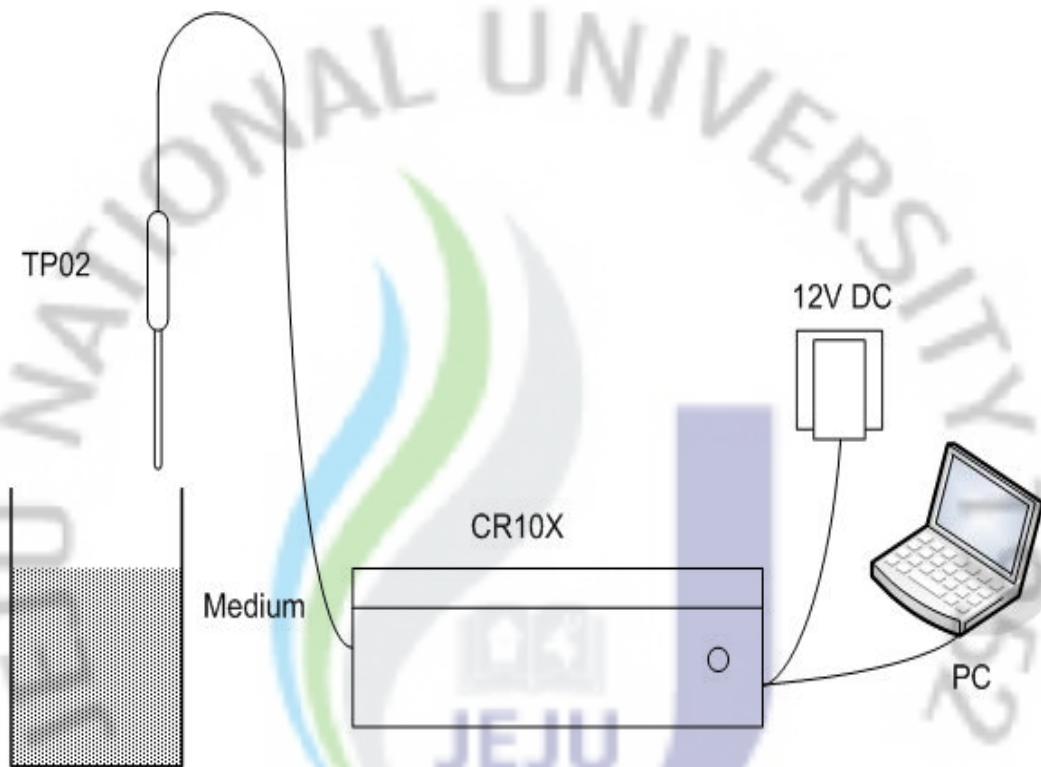


Fig. 2 TP02 sensor and CR10X data Logger system

## 2-2 현지지중열교환 유효도 측정 분석 방법

### 1) 선형열원 모델(Line source method)(cTRT)

지중에 매설된 파이프와 토양사이의 열전달에 관한 이론해는 Kelvin의 열이론으로부터 구할 수 있다. 즉, 무한히 길고 열유속이 일정한 선형열원(Line source)이 초기온도  $T_o$ 로 균일한 무한 매질(여기서는 지중 토양)속에 매설되어 있는 경우 토양온도에 관하여 다음의 식 (1)이 성립한다.

$$T(r,t) - T_o = \frac{Q/L}{4\pi k} \int_x^\infty \frac{e^{-u} du}{u} \quad (1)$$

여기서

$$x = \frac{r}{4\alpha t} \quad (2)$$

식 (2)에서  $a$ 는  $k/\rho c$ 로 정의 되는 토양의 열확산율이다. 여기서 열원은 무한히 긴 것으로 가정하였으므로 모든 열의 흐름은 열원에 직각인 반경방향으로 이루어진다. 식(1)은 무한히 긴 선형열원에서 적용되는 완전해이며 Fig. 3과 같은 보어홀에서도 큰 오차 없이 적용이 가능하다. 단, 이러한 보어홀은 단지 근사적인 선형열원이며 시스템 가동 후 충분한 시간이 경과되어야 주위의 온도분포가 선형열원 모델의 경우와 유사하게 나타난다. 실제로 사용되는 보어홀의 길이  $L$ 은 50 ~ 200m 수준이고  $r_b = 0.075m$  정도임으로 열원이 충분히 길고 열유속은 반경방향으로 이루어진다는 선형열원의 가정 역시 오차 없이 여기에 적용될 수 있다. 식(1)의 우변 적분항은 지수적분이며  $E_i(x)$ 로 표시하고 다음과 같이 무한급수로 나타낼 수 있다.

$$E_i(x) = \int_x^\infty \frac{e^{-u} du}{u} = -\gamma - \ln x + \left( \frac{x}{1 \cdot 1!} - \frac{x^2}{2 \cdot 2!} + \frac{x^3}{3 \cdot 3!} \cdot \dots \right) \quad (3)$$

여기서  $\gamma$ 는 Euler상수로 0.5772의 값을 갖는다. 식(3)에서  $x$ 값이 작을 경우에  $Ei(x)$ 는 처음 4항만으로도 큰 오차 없이 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Ei(x) = -\gamma - \ln x + x - \frac{1}{4}x^2 \cdot \cdot \cdot \quad (4)$$

따라서 식 (1)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} T(r,t) - T_o &= \frac{Q/L}{4\pi k} \left\{ -\gamma - \ln \frac{r^2}{4\alpha t} + \frac{r^2}{4\alpha t} - \frac{1}{4} \left( \frac{r^2}{4\alpha t} \right)^2 \right\} \\ &= \frac{Q/L}{4\pi k} \left\{ \ln \frac{4\alpha t}{r^2} - \gamma + \frac{r^2}{4\alpha t} \left( 1 - \frac{r^2}{16\alpha t} \right) \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

선형열원의 해를 보어홀에 적용할 때에는  $r \geq r_b$ 에서만 적용하고 보어홀 내부에서는 Eskilson에 의하여 정의된 보어홀 전열저항  $R_b$ 에 의한 다음식을 적용한다.

$$\frac{Q}{L} = \frac{T_m - T_b}{R_b} \quad (6)$$

여기서  $T_b$ 는 보어홀의 벽면 온도이며  $T_m$ 는 보어홀 내부를 흐르는 유체의 평균 온도로 보어홀의 입, 출구 온도를 각각  $T_{in}$ ,  $T_{out}$ 라 하면 다음과 같이 정의된다.

$$T_m = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (7)$$

이렇게 정의된  $T_m$ 는 보어홀 길이에 따라 다소의 변화가 있을 수 있으나 여기서는 그 변화를 무시하고 균일한 것으로 가정한다.

보어홀 벽면온도  $T_b$ 는 식(5)에  $r=r_b$ 를 대입함으로써  $T_b = T(r_b, t)$ 가 되며 따라서

$$T_b - T_o = \frac{Q/L}{4\pi k} \left\{ \ln \frac{4\alpha t}{r_b^2} - \gamma + \frac{r_b^2}{4\alpha t} \left(1 - \frac{r_b^2}{16\alpha t}\right) \right\} \quad (8)$$

식(8)과 식(6)을 결합한 후  $T_m$ 에 관하여 풀면

$$\begin{aligned} T_m &= \frac{Q/L}{4\pi k} \left\{ \ln \frac{4\alpha t}{r_b^2} - \gamma + \frac{r_b^2}{4\alpha t} \left(1 - \frac{r_b^2}{16\alpha t}\right) \right\} + \frac{Q}{L} R_b + T_o \\ &= \frac{Q/L}{4\pi k} \ln t + \frac{Q/L}{4\pi k} \left( \ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - \gamma \right) + \frac{Q}{L} R_b + T_o + \frac{Q/L}{4\pi k} \left( \frac{r_b^2}{4\alpha t} \right) \left(1 - \frac{r_b^2}{16\alpha t}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

와 같이 표현된다.

여기서  $r_b^2/\alpha t$ 은  $t$ 가 증가할수록 값이 매우 적어지며 장시간 측정 시 우측 마지막 항이 무시될 수 있다. 따라서 지중열교환 유효도  $k$ 값은 식(10)에 의해서 구할 수 있다. 여기서  $T_f$ 는 보어홀 내부를 흐르는 유체의 평균온도,  $T_o$ 는 초기온도,  $Q$ 는 토양으로 전달되는 열전달율,  $L$ 은 보어홀의 길이이며 따라서  $Q/L$ 은 보어홀 단위길이당 열전달율,  $\alpha$ 는 토양의 열확산율,  $k$ 는 토양의 열전도도,  $t$ 는 시간,  $\gamma$ 은 거리,  $R_b$  보어홀 전열저항,  $\gamma$ 는 Euler상수로 0.5772의 값을 갖는다.

$$T_m = \frac{Q/L}{4\pi k} \ln t + \frac{Q/L}{4\pi k} \left( \ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - \gamma \right) + \frac{Q}{L} R_b + T_o \quad (10)$$

식 (10)에서  $T_m$ 와  $\ln t$ 에 관하여 1차식이며 따라서  $T_m$ 를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_m = ax + b \quad (11)$$

여기서

$$a = \frac{Q/L}{4\pi k} \quad (12)$$

$$x = \ln t \quad (13)$$

또한  $\Upsilon = 0.5772$ 이므로

$$b = a \left( \ln \frac{4\alpha}{\gamma_b^2} - 0.5772 \right) + \frac{Q}{L} R_b + T_o \quad (14)$$

식 (12)에서 기울기  $a$ 를 알면 식(15)로부터  $k$ 를 구할 수 있다. 즉,

$$k = \frac{Q/L}{4\pi a} \quad (15)$$

가 된다. 따라서 열응답시험을 통하여 시간에 따른 보어홀 유체온도를 측정하고 이 결과를  $T_m - \ln t$ 의 좌표위에 나타내어 직선식을 얻고 그 직선의 기울기  $a$ 를 구한 후 식(15)으로부터  $k$ 를 결정하게 된다. 이렇게 직선식의 기울기로부터  $k$ 를 구하기 때문에 이 방법을 Slope법이라고도 한다.<sup>(1)</sup>



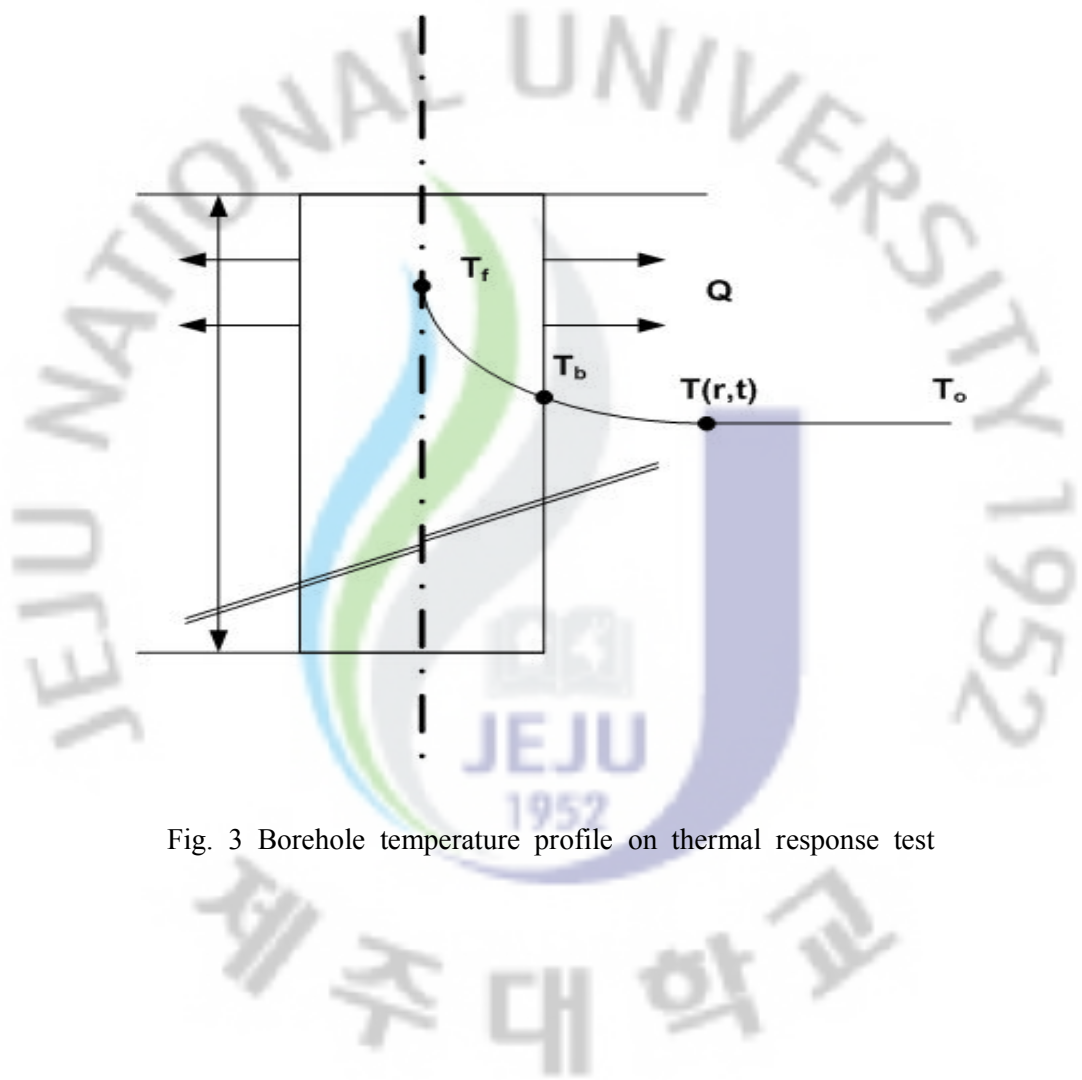


Fig. 3 Borehole temperature profile on thermal response test



2) Fourier의 법칙을 이용한 모델(eTRT)

Fourier의 법칙은 지중열이 높은곳에서 낮은 곳으로 전도에 의해 이동하는 현상을 서술한 법칙이라 할 수 있다. 이와 같은 현상을 간단히 전도 또는 열전도라 하며 고체와 액체의 열전도는 다음 식으로 표현이 가능하다.<sup>(3)</sup>

$$H = -k \nabla T \quad (16)$$

여기서, H : 열유량(Heat flux, Kcal)

k : 비례상수로서 열전도도(kcal/h·m·℃)

$\nabla T$  : 온도구배

위 식(16)은 무선 전자식 지중열교환 유효도 측정 장치에서 측정된 데이터를 이용함으로써 현지 지중 깊이별로 열교환 유효도를 산출할 수 있다. 보어홀 특정 깊이( $x = x_u$ )에서 측정된 온도  $T_u$ 와 i 만큼의 거리에 있는 깊이( $x = x_i$ )에서 측정되어진 온도  $T_i$ 에서의 지중 온도구배는 식(17)과 같다.

$$\nabla T_i = \frac{T_u - T_i}{x_u - x_i} \quad (17)$$

또한 H는 국부 지열유량(Local terrestrial heat flow value)  $q_{loc}$ 으로 해석할 수 있으므로 결과적으로 지중 온도구배와 국부 지열유량(Local terrestrial heat flow value)  $q_{loc}$ 에 의해 각 구간별 지중 열교환 유효도를 계산할 수 있다. 국부 지열유량은 현지에서 채취한 깊이별 지반 샘플을 이용하여 구할 수 있으며, 우선 현장에서 채취되는 깊이별 지반샘플의 열전도도 값을 구한 뒤 그 값을 식(18)에 대입하여 현지 국부 지열유량을 산출한다. 그리고 현지에서 계산된 지열유량을 이용하여 식(19)에 적용함으로써 현장에서의 국부적인 지중 열교환 유효도를 산출한다.

$$q_{loc} = k_i \times \nabla T_i = k_i \times \frac{T_u - T_i}{x_u - x_i} \quad (18)$$

$$k_i = \frac{q_{loc}}{\nabla T_i} \quad (19)$$

여기서 국부 지열류량은 실험적인 값에 의해서 구할 수 있다. 국내에서의 국부 지열류량은 지역별 지열류량 조사 자료로부터 얻을 수 있으며, 국토해양부에서 실시한 국내 247개소에서 측정된 열류 데이터 분석 결과로써 국내 평균 지열류량 값은  $64 \pm 14 \text{mW/m}^2$ 로 조사되었다.<sup>(4)</sup>



### Ⅲ. 실험장치 및 방법

#### 3-1 열유체식 지중열교환 유효도 측정장치(cTRT)

##### 1) 실험 장치

본 연구에서 사용되어진 현지용 열유체식 지중열교환 유효도 시험장치는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 한국에너지기술연구원(KIER)내에서 자체 제작되어진 Portable형이다. 본 시스템은 열원장치, 순환장치, 계측장치로 구성되어 있으며, 열원장치는 지중열교환기에 일정한 열량을 주입하도록 전기히터 3kW로 3개가 Fig. 5와 같이 동관 속에 삽입되어 있다. 본 실험에 사용되는 열원은 지중으로의 열투입량 50 ~ 80W/m을 감안하였을 때 최대 지중열교환기 깊이가 180m까지 해당하는 지중열교환기에 대한 측정이 가능하도록 3kW의 발열량을 갖는 전기히터 3개를 사용하였으며, 또한 전력공급에 있어서 안정적인 전원공급을 위하여 현지 공급되는 전력을 A.V.R.을 통해 cTRT에 공급하였다. 순환장치는 열매체가 지중열교환기와 열원장치를 순환하면서 열을 전달할 수 있도록 순환펌프를 설치하였으며 계측 장비는 열매체의 유량 측정을 위해 전자식 유량계를 설치하였다. 전기히터의 열량을 취득하기 위해 전류와 전압 측정이 가능한 전류 Transformer (T-MAG-SCT-050)와 전압 Transformer(T-MAG-SPT-300)를 설치하였고, 열매체의 순환 온도를 측정하기 위해 두 개의 온도센서(12-Bit temperature smart sensor)를 설치하였다. 온도센서의 위치는 지중열교환기에서 시스템으로 들어오는 입구 쪽과 순환펌프 전단 사이에 1번 온도센서를 설치하고 열매체가 전기히터를 지나 지중열교환기 입구로 흘러가기 전 위치에 해당하는 동관에 2번 온도센서를 설치하였다. 이렇게 설치된 센서들의 데이터 취득을 하기 위해서 데이터 로거의 내부메모리를 통해 저장 및 PC와 연결하여 전기히터 열량, 온도, 유량이 실시간으로 컴퓨터에 나타내도록 하였다. 계측장치 전체 구성은 Fig. 6과 같이 통신모듈을 통해 각 센서들과 연결된 데이터 로거에서 컴퓨터로 측정데이터를 전송하고 측정 데이터 수집 전용 프로그램을 이용하여 데이터를 컴퓨터로 전송한다.

열유체식 지중열교환 유효도 시험장치(cTRT)의 실제 내부 구성은 하단은 순환 펌프, 전기히터, 팽창탱크, 유량계 및 동관으로 되어있고 내부 상단에는 Fig. 7 과 같이 전기 배선함이 위치하고 있으며 그 내부에는 전압·전류 측정 장치, 전기히터 및 순환펌프 전원장치가 위치하고 있다. Table 1은 열유체식 지중열교환 유효도 시험장치 구성품의 제원을 나타낸다.

Table 1 Specifications of conventional thermal hydraulic thermal response test (cTRT)

Electrical heater	3kW × 3	
Voltmeter	0 ~ 230 Volts AC	±0.25%
Amperemeter	0~50 Amps AC, 0~100 Amps AC	±0.25%
Temperature sensor	-40 ~ 75 °C	±0.2°C
Flowmeter	Flow rate 10 ~ 60 L/min,	±0.1%
Circulation pump	1hp, 60hz	



Fig. 4 Conventional thermal hydraulic thermal response test (cTRT)

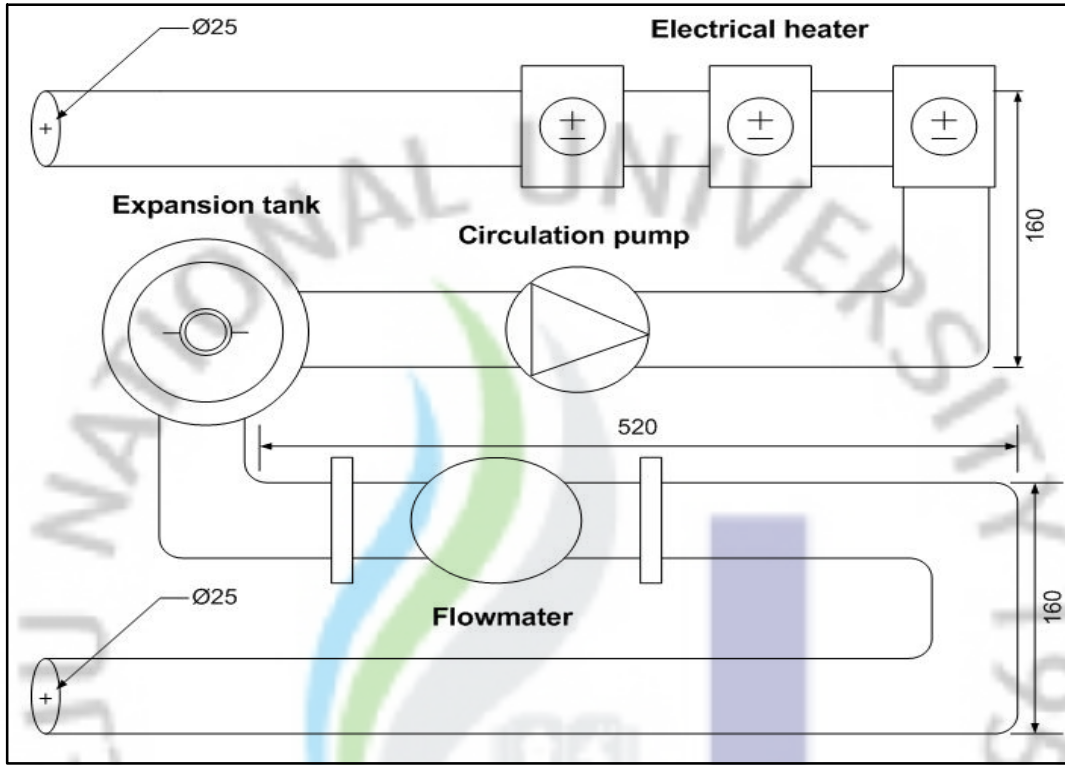


Fig. 5 Schematic diagram of cTRT circuit





Fig. 6 Photograph of sensor and data logger, software

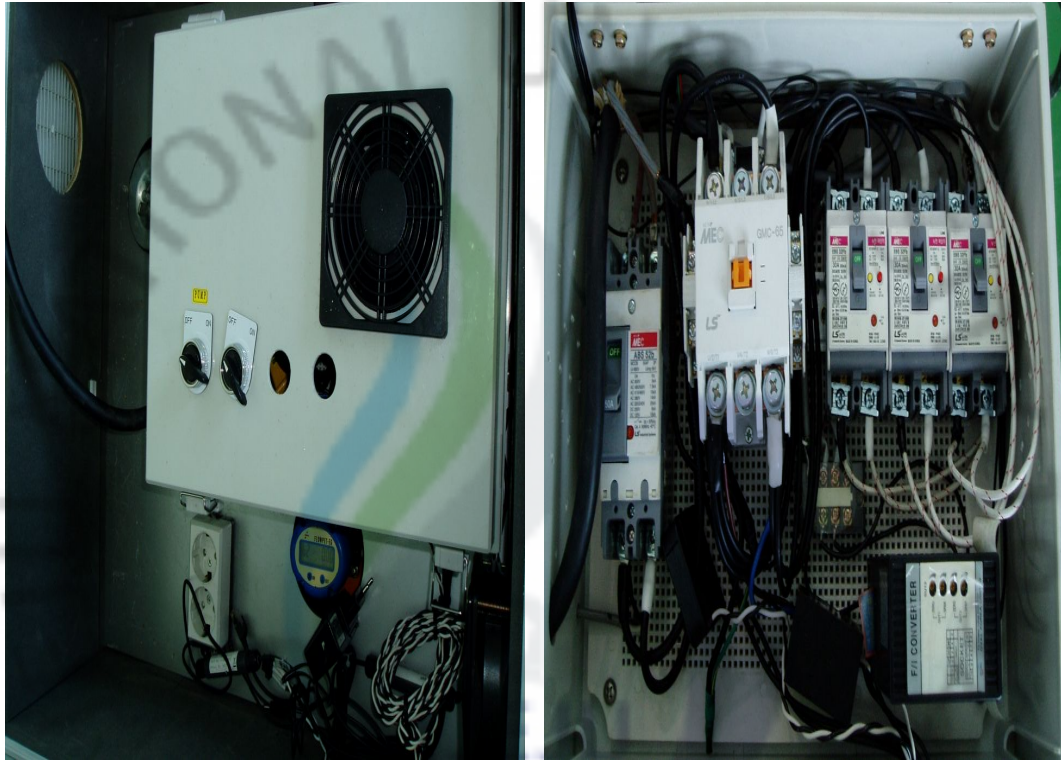


Fig. 7 Photograph of controller box of cTRT



## 2) cTRT 현지 지중열교환 유효도 산출 방법

현지 지중 열교환 유효도 측정은 지중열교환기를 설치하고자 하는 위치에 시험용 지중열교환기를 먼저 설치하고 여기에 순환수를 순환시키며 순환수의 입/출구 온도를 일정한 시간 간격(10분 또는 그 이하)으로 측정한다. 측정시간은 48시간 이상 계속되어야 하며, 온수 순환을 통하여 지중으로 전달되는 열량은 대략 지중열교환기에 50~80 W/m 수준으로 전달되어야 한다. 이 정도의 전열량은 실제 지열원 열펌프 가동시의 최대부하 범위에 속하는 것이며 보통 지중열교환기 50~70m당 1RT 정도가 된다. 시험 초기에는 먼저 열원장치를 작동하지 않고 물만 순환시켜 지중 토양의 초기온도를 측정된 후에 열원장치를 작동시켰으며 전기히터를 제어하여 지중으로 전달되는 열량을 일정하게 유지하였다. 순환수 유량은 지중열교환기의 입/출구 온도차가 3.5~7℃ 정도가 되도록 하였으며, 이 온도차는 실제 현장에서 가동될 때의 온도차를 기준으로 정한 범위이다. 시험장치의 설치 방법은 현지 전기 배전함과 A.V.R과 연결 후 지중열교환 유효도 시험장치를 연결하고 그 후 연결 호수 및 부속품을 사용하여 지중루프와 지중열교환 유효도 시험장치를 연결한다. 시험에 필요한 모든 장치가 연결되면 팽창탱크에 물을 보충하여 순환펌프를 가동 시킨 후 유량계를 통하여 시험기준에 필요 유량이 흐르는 것을 확인한 후 전기히터에 전원을 공급 시킨다. 그 후 데이터 로거를 실행시킨 후 연결 호수 및 외부로 노출된 지중루프를 단열처리 한다.

데이터 로거를 통하여 읽어드린 데이터는 유량, 전압, 전류, 측정시간, 지중루프 입구 및 출구 온도이며 이들은 지중열교환 유효도 측정식 앞에서 언급했듯이 식(15)에 나타난 파라메타 즉, 히터의 표면온도와 측정시간의 자연대수(Ln t)에 관한 함수의 직선형상에 관한 직선의 기울기(a)와 열주입량(Q)을 구할 수 있다. 여기서 지중열교환기 평균온도 관계식은 식(20), 직선의 기울기 관계식은 식(21), 열주입량을 구하는 관계식은 식(22)에 나타내었다.

$$T_m = (T_{in} - T_{out})/2 \quad (20)$$

$$a = (T_{m2} - T_{m1}) / \{LN(t_2) - LN(t_1)\} \quad (21)$$

$$Q = \dot{m}c_p(T_{in} - T_{out}) \quad (22)$$

여기서  $\dot{m}$ 은 순환수 유체의 유량,  $c_p$ 는 순환수 유체의 비열을 나타낸다. 본 실험에서 측정된 사이트는 KIER 내부에 시공 되어진 지중열교환기를 대상으로 49시간동안 실험하였다. Fig. 8은 현지 지중열교환 유효도 측정하는 모습을 나타낸다.





Fig. 8 The filed test of thermal conductivity

### 3-2 전자식 지중열교환 유효도 측정장치

#### 1) 실험장치

본 연구에서 사용되어진 전자식 지중열교환 유효도 측정장치(electronic thermal response test, eTRT)는 스위스 G사에서 제작되어진 N 모델로 내부에 압력센서, 온도센서, 데이터 로거, 마이크로프로세서로 구성되어 있고 Table 2에 명시되어진 기본 사양을 갖는다.

Fig. 9는 장치의 실제 사진 및 회로도를 나타낸 것으로 케이스를 포함하여 길이는 약 25cm, 수압 110bar까지 견딜 수 있는 금속으로 제작되어 있다. eTRT의 핵심 구성은 측정장치 내부에 설치되어진 아날로그/디지털 변환기, 마이크로프로세서와 데이터를 저장할 위한 메모리(EEPROM)가 있고, 측정이 완료된 후 컴퓨터 통신에 연결하여 데이터를 회수하고 보정해 주는 커넥터가 있다. eTRT의 on/off는 자석을 이용하여 작동시킬 수 있고 그에 따른 방법은 자석을 eTRT 표면에 "TEST" 라 적혀있는 부분에 접촉하여 비프음이 울릴 때 때어낸다. 이때 비프음은 4번 연속으로 울리며, 그 후 "on/off"부분으로 자석을 접촉하면 비프음이 울리면서 eTRT가 작동하게 된다. 작동이 시작된 eTRT는 일정한 간격으로 비프음을 울린다. eTRT에서 읽어드리는 데이터는 측정시간에 따라 압력 및 온도를 측정하며 지중열교환기 깊이에 대한 데이터는 전용프로그램에 제공되어진 관계식에 의해서 나타나게 된다. 측정이 완료된 데이터 수집 및 분석은 eTRT 소프트웨어 전용 프로그램을 이용하여 시간, 압력 및 온도를 읽을 수 있으며 엑셀 매크로로 구성된 전용프로그램을 통하여 측정된 데이터를 분석할 수 있다. 또한 eTRT 소프트웨어를 통해 eTRT의 메모리에 저장되어 있는 데이터를 자유롭게 삭제/회수가 가능하며 시간의 정확성을 보장하기 위해 컴퓨터 시간과 동일하게 맞출 수 있다.

Table 2 Specifications of electronic thermal response test (eTRT)

Material	Steel
Diameter [mm]	23
Weight [g]	120
Length [mm]	247
Temperature measurement range [°C]	-5 to +50
Sink velocity [m/s]	0.1
Max. measurement depth [m]	400
Water resistant [bar]	110
Battery usage time [hour]	3
Store measurement data	16,348
Measurement time[sec]	3.5



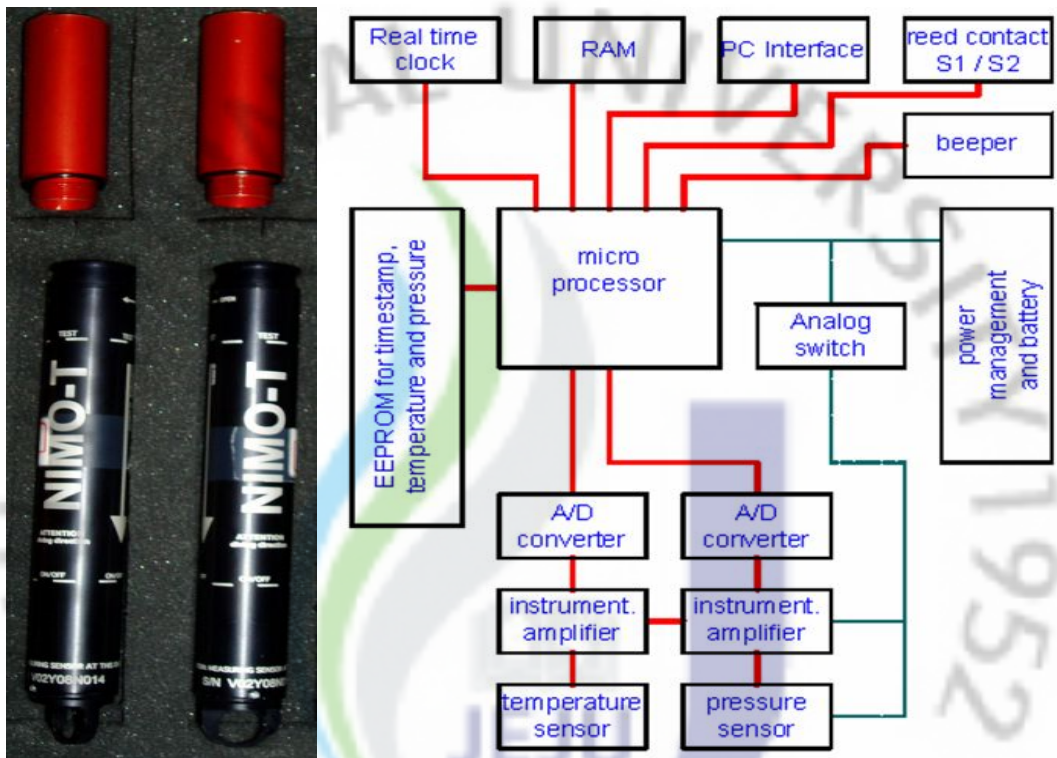


Fig. 9 Wireless P/T probe and block diagram(eTRT)

(2) eTRT 현지 지중열교환 유효도 산출 방법

eTRT를 통한 현지 지중열교환 유효도 측정은 현장에 설치되어진 지중열교환기에 직접 투하하며 온도와 압력에 대한 데이터를 산출하여 앞서 설명한 식(19)에 의해서 지중열교환기 구간별 지중열교환 유효도를 구할 수 있다. 또한 eTRT의 압력과 온도를 위한 보정식은 식(23)과 같은 이차방정식으로 나타낼 수 있으며 보정상수 a, b, c는 프로브에 저장되어 데이터 측정 후 백업 시 알 수 있다.

$$y = ax^2 + bx + c \quad (23)$$

전자식 지중유효도 측정장치를 이용한 지중의 온도 및 압력 측정에 대해 설명하면, Fig 10과 같이 전자식 지중유효도 측정장치를 작동 시키고 지중열교환기에 투하된 전자식 지중유효도 측정장치는 지중열교환기 열교환기의 바닥까지 내려가는 동안 설정된 시간 2 ~ 8초 간격으로 온도와 압력을 측정한다. 여기서 전자식 지중유효도 측정장치가 지중열교환기의 바닥면까지 0.1m/s의 속도로 내려간다고 가정하면 지중열교환기 U-tube의 깊이가 150m의 바닥면까지 도달하는 시간은 약 25분이 걸린다. 측정을 마친 전자식 지중유효도 측정장치에 삽입된 입구의 반대편에 물을 채워주고 소형펌프를 이용하여 U-tube 내에 채워진 물을 빼줌으로써 전자식 지중유효도 측정장치를 회수한다. Fig. 11은 펌프를 이용한 회수 방법을 나타낸다. 이렇게 회수되어진 전자식 지중유효도 측정장치는 eTRT PC 어댑터를 컴퓨터의 USB 통신 커넥터와 연결하여 컴퓨터로 측정데이터를 전송하고 eTRT 전용 소프트웨어 통해 전자식 지중유효도 측정장치내 메모리에 저장되어진 데이터를 수집한다. 본 실험의 총 측정시간은 eTRT가 회수 되어지는 시간을 포함하여 약 30분의 시간이 걸렸다.



Fig. 10 eTRT insert to U-tube



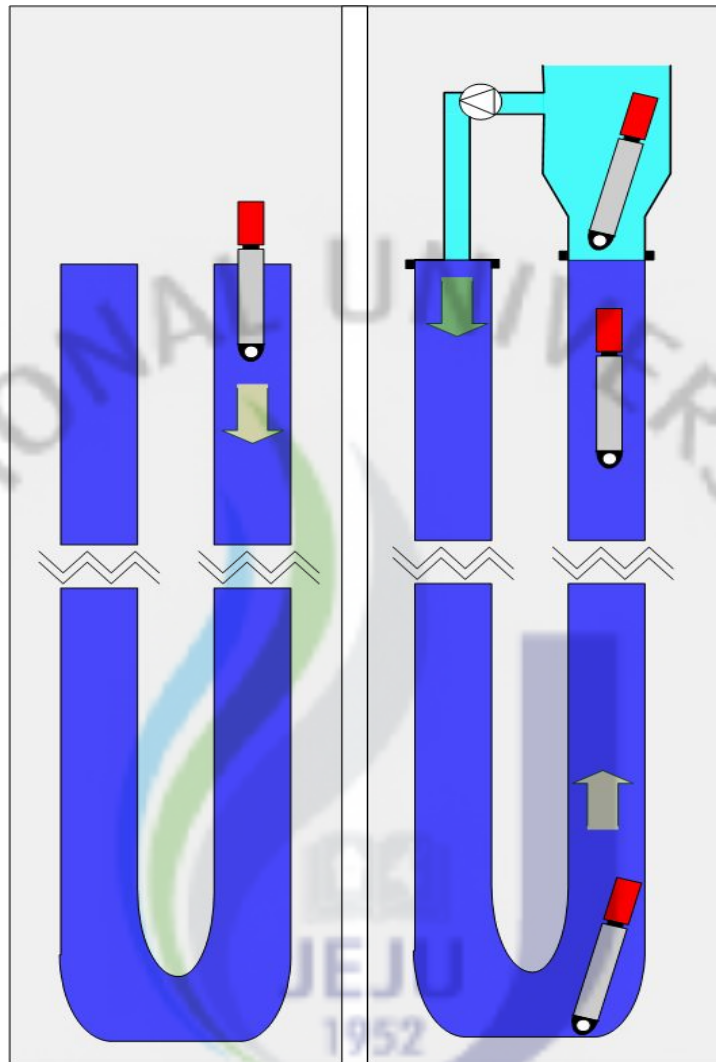


Fig. 11 eTRT measurement and recovery method

## IV. 실험 결과 및 고찰

### 4-1 cTRT를 통한 지중열교환 유효도 측정 결과

열유체식 지중열교환 유효도 시험장치(cTRT)를 이용하여 KIER내에 설치되어 있는 지중열교환기 시험공에 대하여 지중열교환 유효도 시험을 실시하였다. 현지에 매설한 시험용 지중열교환기는 2관식 수직밀폐형으로 천공 깊이가 약 150m, 그라우트 재료는 벤토나이트, 지중열교환기 구경 30A, 지중루프의 재료는 폴리에틸렌 (HDPE), 작동 유체는 물을 사용하였다. Table 3은 지중열교환기의 위와 같은 내용을 나타낸다. 측정 날짜는 2008년 6월 20일부터 2008년 6월 22일 까지 측정하였으며 측정기간 동안 최고기온은 27.2℃이고 최저기온은 20.0℃의 기온차를 보였다. Fig. 12는 현지 측정하는 모습을 나타내고 측정 시간은 49시간 동안 진행되었으며, Fig. 13에 측정하는 동안에 입·출구 온도값과 평균온도값을 나타냈다. 전기히터의 열량을 주입하기 전 지중의 초기 온도 측정을 위해서 10분간 순환수를 순환하여 측정한 결과 초기 온도는 16.2℃로 나타났다. 전기히터를 통해 열이 주입되면서 지중열교환기 입·출구의 온도는 8시간이 경과될 때 까지 급격히 상승한 후, 점점 완만한 기울기를 유지하였으며 시험 전반에 걸쳐서 안정적인 결과를 보였다. Fig. 14은 지중열교환기 온도 변화 곡선에 대하여 대수시간(Logarithmic time)에 대한 평균온도 변화곡선을 나타낸다. 측정 시간 12시간 후 온도변화곡선에서 지중열교환기 순환수 온도와 열전달이 안정화되어 기울기가 일정해지는 13시간 이후부터의 측정값을 가지고 기울기를 구하였으며, 이때 기울기는 1.7263의 값을 갖고 지중열교환 유효도는 2.58 [W/m℃]의 값을 갖는다. Table 4는 열유체식 지중열교환 유효도 측정장치로 측정된 결과를 나타낸다.

Table 3 Specifications of the ground heat exchanger

A sort of heat exchanger	Single U-tube (Vertical)
U-tube diameter	30mm
Borehole diameter	150mm
Borehole depth	150m
Borehole material	HDPE(High density polyethylene)
Grouting material	20% bentonite

Table 4 The result of thermal response test

Time	48	[hr]
Interval of time	5	[min]
Ground temperature	16.2	[°C]
Inlet temperature	34.9	[°C]
Outlet temperature	30.2	[°C]
Mean temperature	4.7	[°C]
Flow rate	25.7	[LPM]
Power	8,515.3	[W]
Heat transfer	8,404.3	[W]
Linear FIT slope	1.7263	-
Heat transfer effecting	2.583	[W/m-K]



Fig. 12 The picture cTRT and geothermal heat exchange loop at KIER

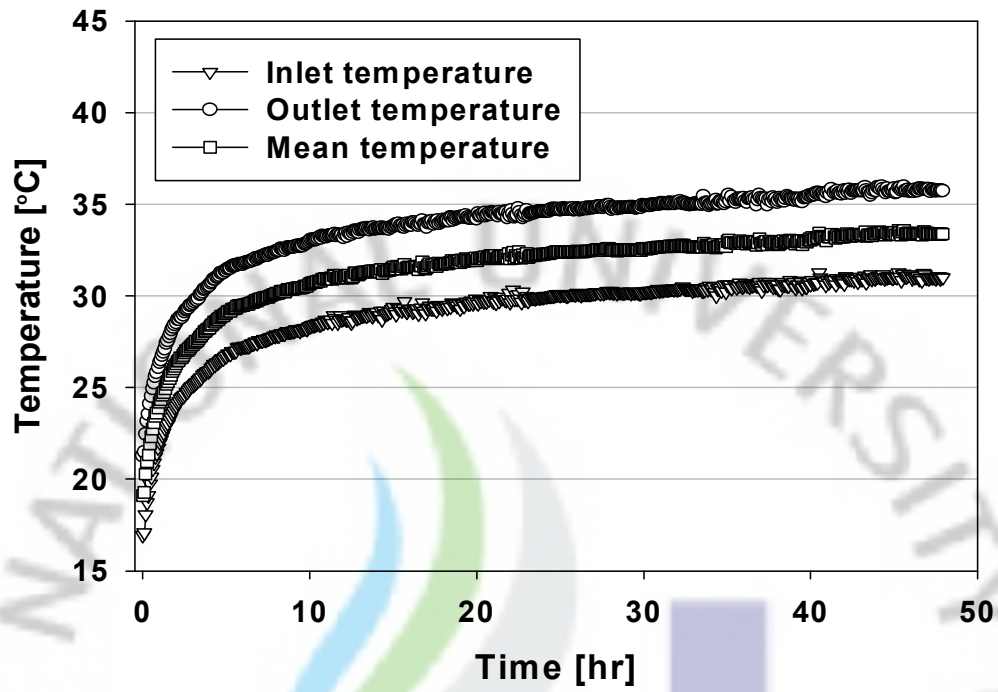


Fig. 13 Inlet and outlet temperature variations with time

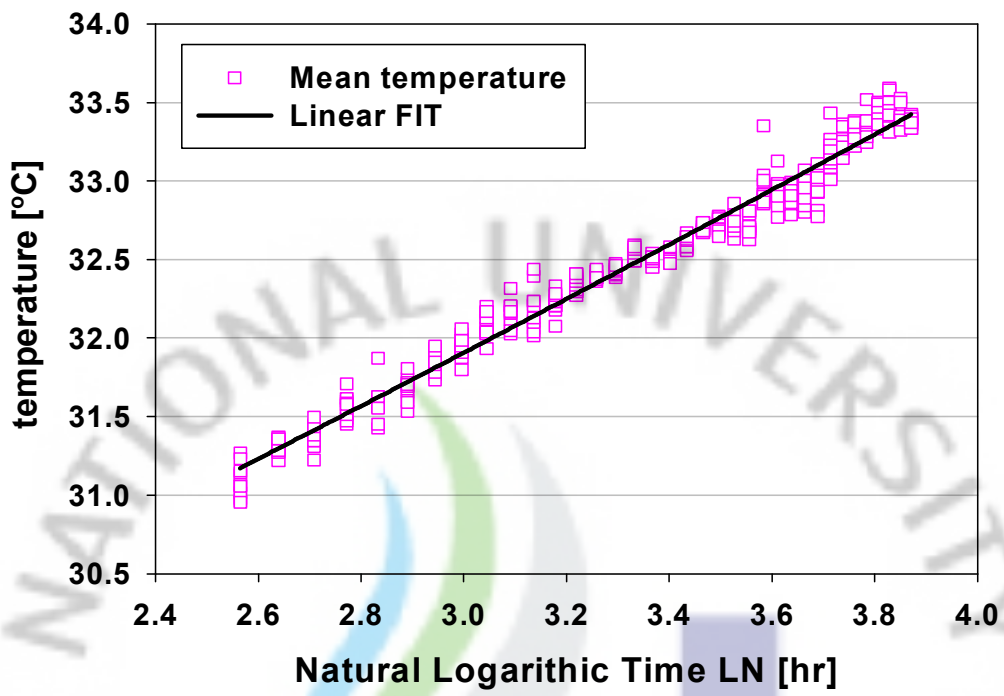


Fig. 14 Temperature plot respect with logarithmic time



## 4-2 eTRT를 통한 지중열교환 유효도 측정 결과

초고속 무선 전자식 지중열교환 유효도 측정 장비를 이용하여 KIER에 시추되어 있는 지중열교환기 시험공에 대하여 지중열교환 유효도 시험을 실시하였다. 시험공은 앞서 설명한 바와 같이 깊이가 150m이며 2관식 밀폐형 수직지중열교환기이고 시험측정 날짜는 2008년 7월 21일이며 기온은 최고 26.8℃, 최저 23.0℃의 기온차를 보였다. 시험 시간은 측정 장비 투하 및 회수까지 약 30분의 시간이 소요된다. Fig. 15는 초고속 무선 전자식 지중열교환 유효도 측정 장비로 측정한 깊이별 온도 분포를 나타낸다. 온도 분포를 살펴보면 지표면에서부터 20m까지 큰 온도 변화가 일어나고 20m에서부터 75m 까지 15.3℃~15.6℃의 미묘한 온도 변화를 보이고 75m 이후의 온도에서 안정적인 기울기를 보이면서 온도가 증가하고 있다. 이와 같은 온도 분포 현상에 대하여 깊이별 온도변화의 특성을 고려하여 보면 지표면에서부터 20m까지는 일사영향권내에 있어 기후의 영향을 받는 구간임을 알 수 있으며 20m 이후부터 75m까지는 온도가 미묘한 온도변화를 보이면서 일정한 온도를 유지하는 것으로 보아 일사영향이 적은 구간임을 알 수 있고 75m 이후부터는 안정적으로 온도가 증가하는 것으로 보아 순수 지열의 영향권내에 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 깊이별 지중온도 분포를 온도 구배분포로 나타내면 Fig. 16과 같이 나타난다. 온도 구배 분포를 살펴보면 지표면에서 25m까지는 온도 구배 변화가 급격하게 일어나고 25m에서 75m까지의 온도 구배는 0값에서 가까워지며 75m 이상에서는 안정적인 형태로 양(+)의 값을 나타낼 수 있다. 이와 같은 현상은 25m까지는 일사영향을 가장 많이 받는 구간이고 25m에서 75m까지는 일사영향과 순수 지열영향을 동시에 받아 열평형이 일어나거나 두 영향이 전혀 받지 않는 지역이라 할 수 있다. 75m 이상의 깊이에서는 안정적인 형태로 온도 구배가 일어나는 것으로 보아 순수 지열영향만을 받는 구간임을 알 수 있다. 따라서 일사영향을 받는 Solar zone, 순수 지열의 영향을 받는 Geothermal zone과 그 경계가 되는 Neutral zone 결정할 수 있다. 각 구간을 결정하기 위해서 Neutral zone을 결정해야 하며 그 지점은 위의 두 개의 그래프를 비교해보았을 때 25m에서 75m 구간과 75m 이상의 구간으로 넘어가는 지

점으로 볼 수 있다. 이러한 구간 설정을 명확하게 하기 위해서 Fig.17에 계절별 측정된 결과를 나타내었다. 계절별 깊이별 온도 측정된 결과 55m까지는 일사 및 기후영향을 받아 온도변화가 극심하고 계절별 온도분포가 다르다는 것을 알 수 있고 그 이후부터 세 개의 데이터가 안정적인 온도 분포를 나타냄을 알 수 있다. 이러한 현상을 명확하게 나타나게 하기 위해 그림에 표시된 부분을 Fig. 18에 나타내었으며, 그 결과 55m지점에서 기울기 변화가 일어나기 시작하였고 75m 지점부터 안정적인 기울기를 갖는 온도 분포를 나타냄을 알 수 있다. 따라서 실질적인 Neutral zone은 25m~75m 구간 보다는 55m~75m 사이임을 알 수 있다. Fig 19에 깊이별 온도 분포에 대해서 각 구간으로 구분하여 나타내었다. Fig. 20은 eTRT에서 구한 깊이별 온도 분포와 식(17)와 식(19)에 의해서 구해지는 지중열교환 유효도를 나타낸다. 깊이별 온도분포를 이용한 지중열교환 유효도를 구하는 관계식의 특성상 양(+)의 온도 구배에서 성립이 가능하기 때문에 순수 지중열원 영향만을 받는 Geothermal zone에서의 열전도도를 나타내었고, 대전 인근 지역 평균 지열류량인  $0.053[W/m^2]$ 의 값을 사용하여<sup>(5)</sup> 평균적인 열전도도를 계산해 보면 약  $2.63[W/mK]$ 의 값을 얻을 수 있었다.

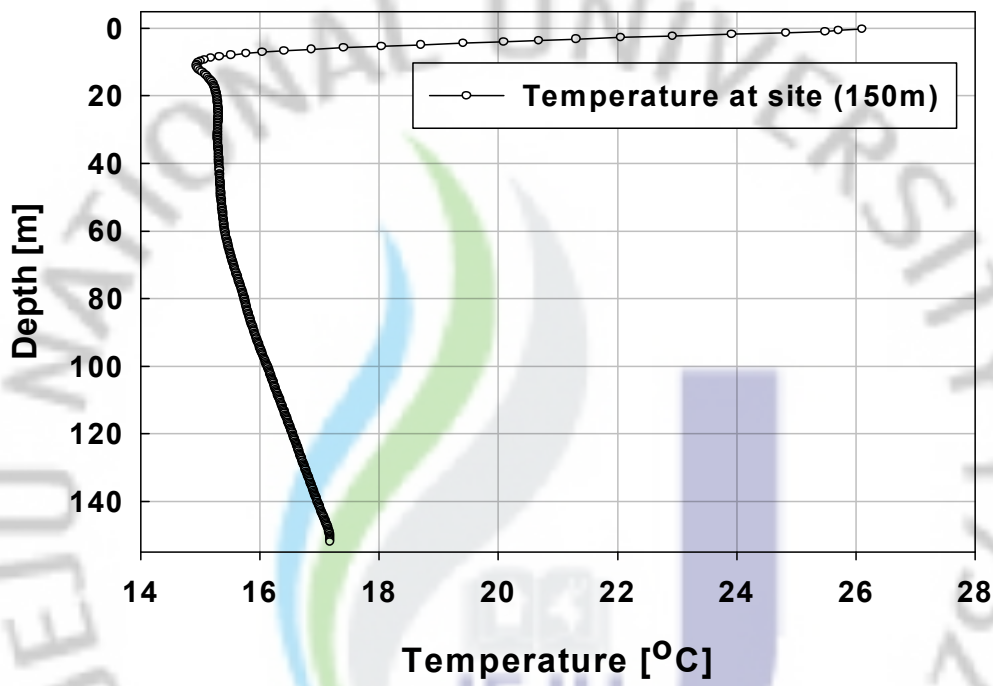


Fig. 15 Temperature variations with depth

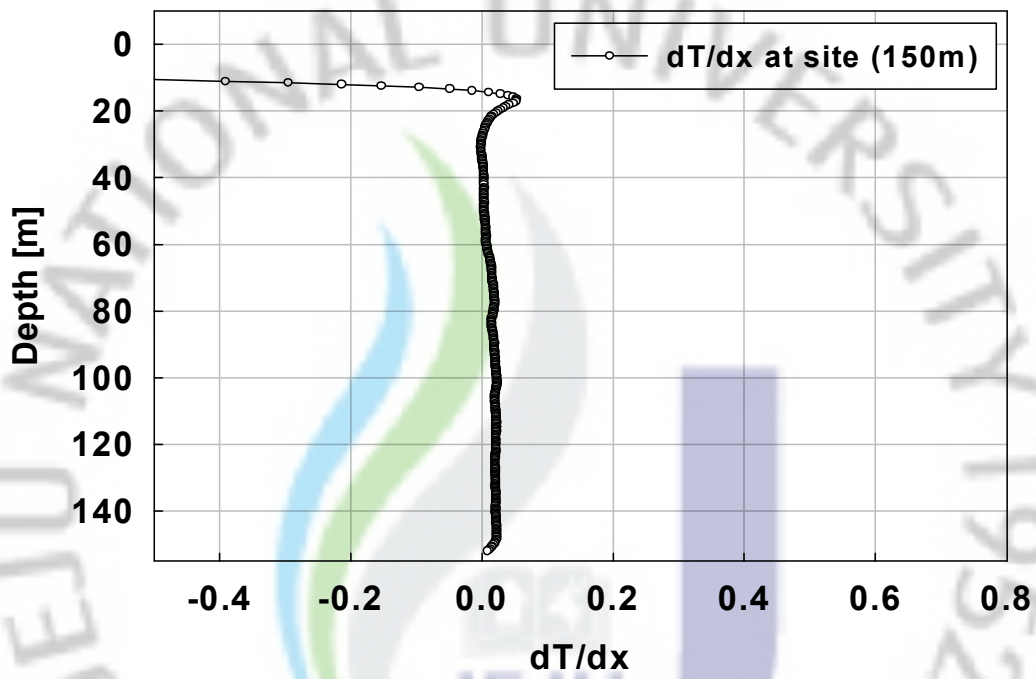


Fig. 16 Temperature gradient variations with depth

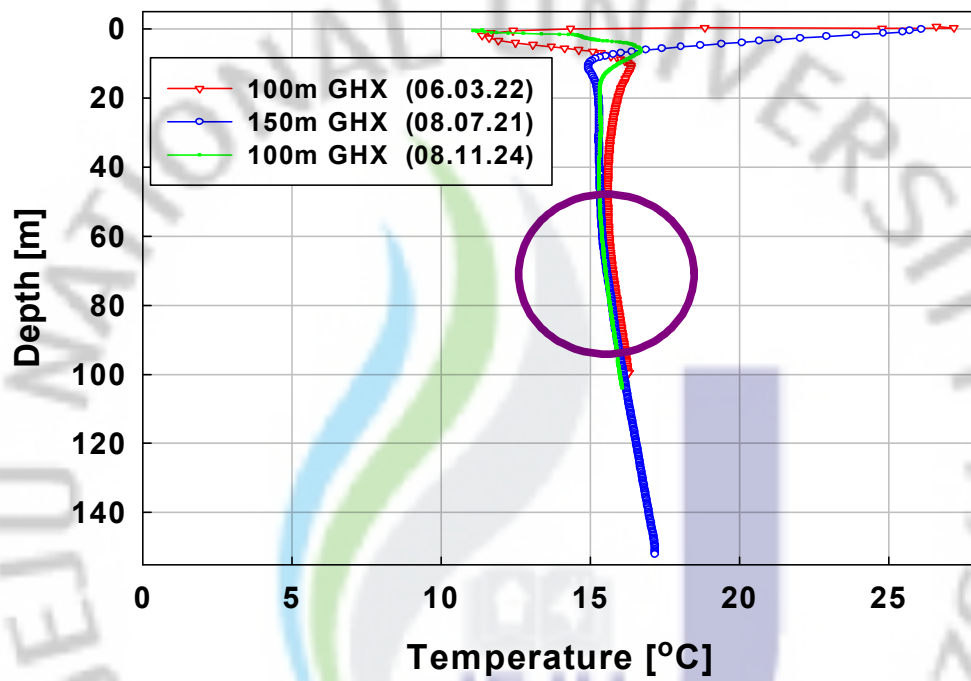


Fig. 17 Seasonal temperature variations with depth

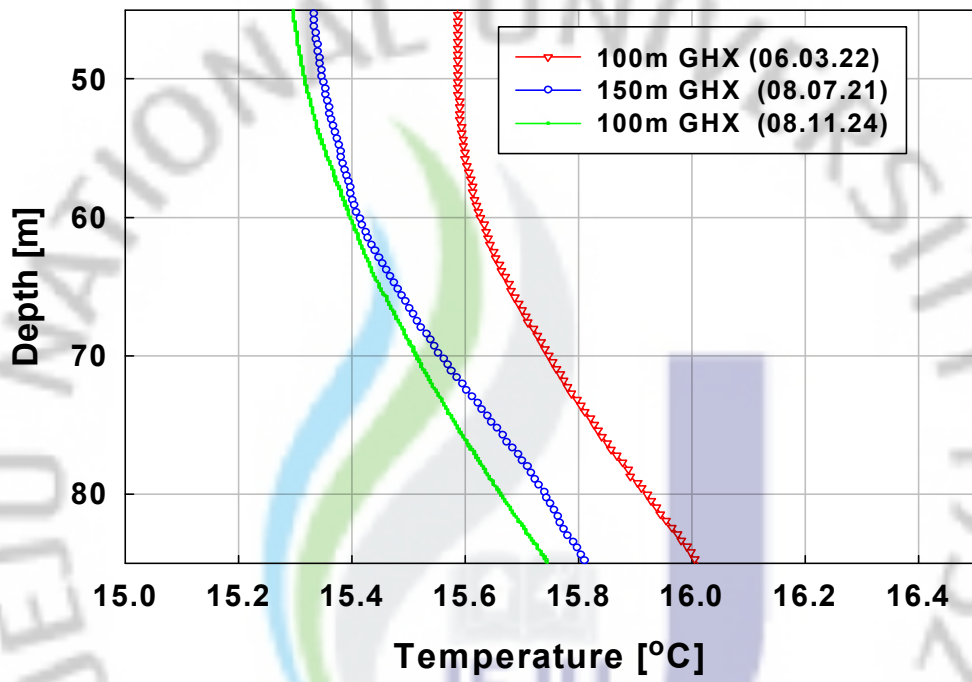


Fig. 18 Seasonal temperature variations with depth



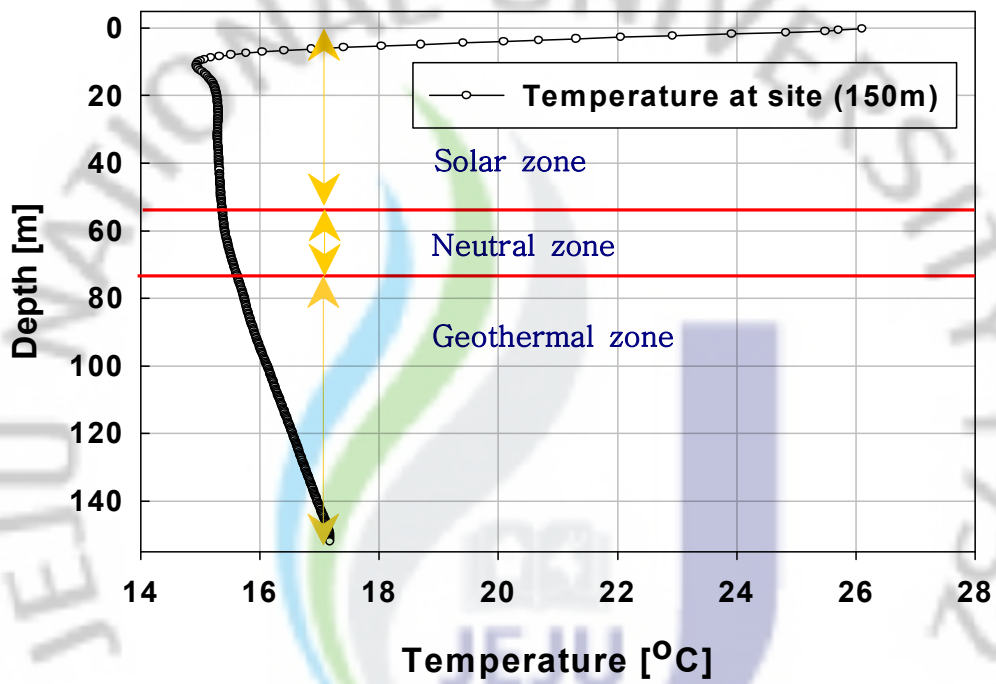


Fig. 19 Temperature zone variations with depth

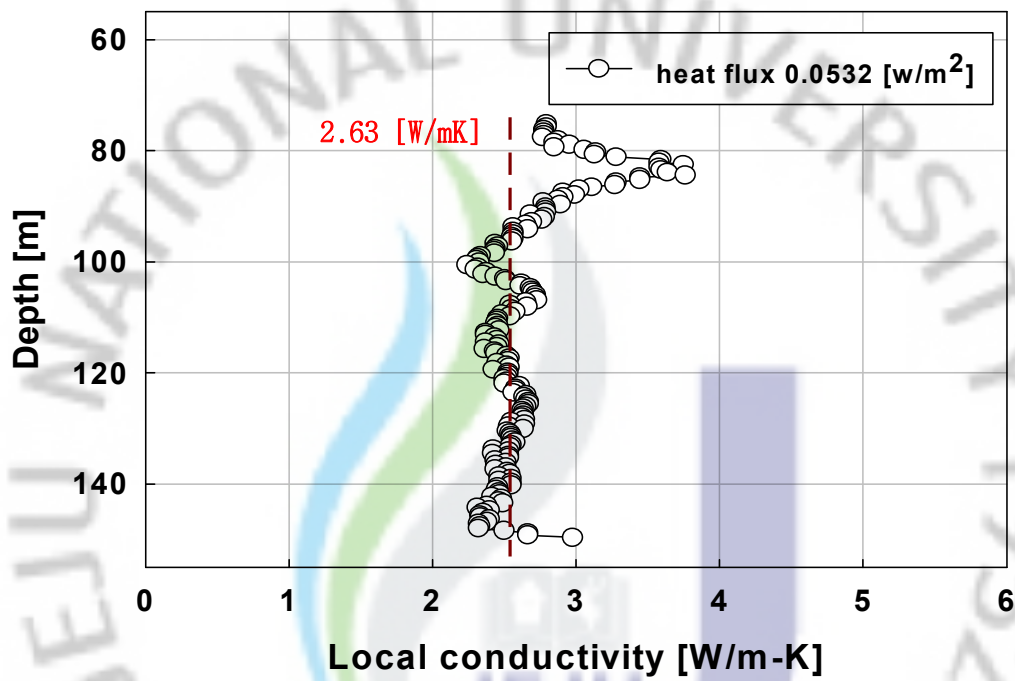


Fig. 20 Local conductivity variations with depth

## V. 결 론

본 연구에서는 수직형 지중열교환기의 열교환 유효도 측정 기술에 대하여 기존의 열유체식 지중열교환 유효도 측정 방식과 전자식 지중열교환 유효도 측정 방식을 통한 토양의 지중 열적 거동을 예측하고 지중열교환기의 지중열교환 유효도를 측정하여 검증하였다. 또한 기존의 열유체식 지중열교환 유효도에 측정 방식과 전자식 지중열교환 유효도 측정 방식을 비교 분석하여 기존의 열교환 유효도 대한 측정 장치에 대비 전자식 지중열교환 유효도 상호대비 우수성 및 보안점을 파악하였으며, 마지막으로 전자식 지중열교환 유효도 측정장치를 이용하여 지중 열적 거동의 각 구간별 경계 구분에 대해서 분석하였다. 이와 같은 연구를 수행한 결과는 다음과 같다.

열유체식 지중열교환 유효도 측정 방식에 대한 내용을 보면 KIER내에 천공되어 있는 150m의 지중열교환기에 대해서 측정하였으며, 이에 따른 내용을 보면 총 측정 시간은 49시간이며 5분 간격으로 유량, 지중열교환기 입·출구 온도 및 전력 등에 대한 데이터를 수집하였다. 그 후 Kelvin의 열 이론식으로부터 해석되어진 선형열원 모델을 이용하여 지중열교환 유효도를 도출하였다. 또한 전자식 지중열교환 유효도 측정 방식에 의해서 지중열 교환기 깊이별 온도측정을 한 후, Fourier의 법칙에 의해서 깊이별 지중온도에 따른 토양의 열적 거동 및 지중열교환 유효도 특성을 도출하였다.

먼저 열유체식 지중열교환 유효도 측정 방식에 의해서 측정되어진 데이터를 분석한 결과 지중열교환기 입·출구 온도는 안정적인 평균 온도차 4.7℃를 보이며 서서히 증가 측정 시간이 지날수록 안정적으로 보이는 것을 확인할 수 있었고, 지중열교환기 입구 측으로 공급되는 평균 열량은 8.4kW로 분석되었으며 실제 측정 장치에 공급된 소비전력에 근접한 값을 나타내었다. 지중열교환기 입·출구 온도 측정 후 대수시간에 대한 평균온도 변화 곡선의 기울기는 1.7263으로 나타났고 열전달률 및 기울기에 의한 평균 지중열교환 유효도 결과 값은 2.58[W/mK]로 측정되었다.

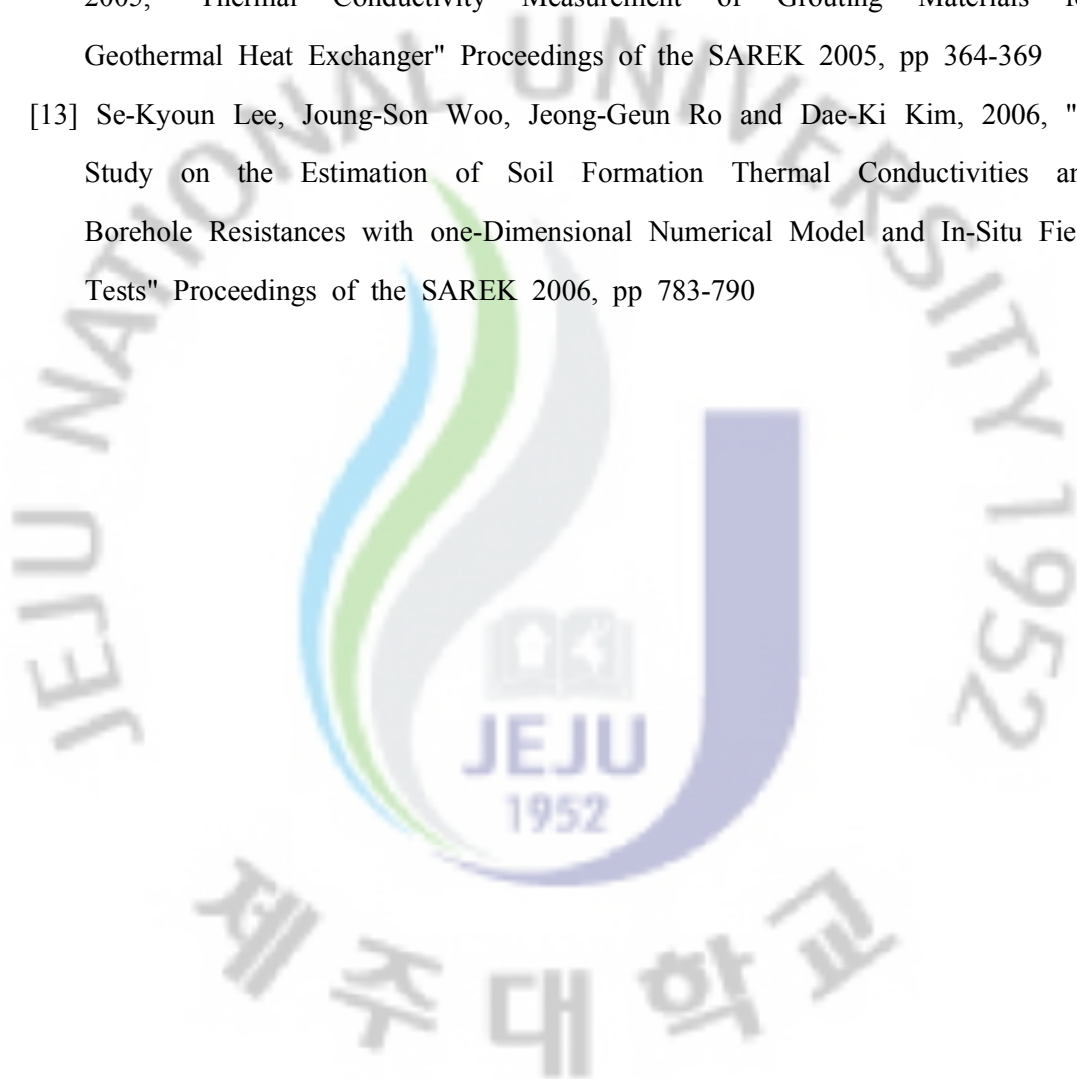
전자식 지중열교환 유효도 측정 장치를 이용하여 열유체식 지중열교환 유효도를 측정하였던 같은 현장에 대해서 깊이별 온도변화를 측정하였다. 그 결과 일사영향을 받는 지표면으로부터 25m까지는 26℃에서 15.3℃의 급격한 온도변화 분포를 보이고 25m에서 75m까지는 15.3℃~15.6℃의 온도 분포를 보였으며 75m 이상의 깊이에서의 온도변화는 안정적인 기울기에 따라 온도가 일정하게 증가함을 보였다. 이와 같은 온도 변화만을 보면 지표면에서부터 25m까지는 Solar zone, 25m~75m 사이에 Neutral zone, 75m이상에서의 깊이에서는 Geothermal zone으로 나눌 수 있다. 여기서 Neutral zone은 계절적인 일사영향이나 심부지열의 영향을 받는 각 zone의 경계가 되어 일정한 온도를 유지하는 구간이라 봤을 때 계절적인 요소에 따라 깊이별 온도 변화가 안정적이며 동일한 형태로 나타나는 구간을 말하며 계절적인 깊이별 온도 측정 결과 55m ~ 75m에서 가장 안정적이며 동일한 형태의 온도 분포를 보였다. 따라서 지표면에서 55m까지는 일사영향을 받는 Solar zone, 55m~75m는 Neutral zone, 75m이상의 깊이에서는 심부지열의 영향을 받는 Geothermal zone으로 나타났다. 마지막으로 안정적인 온도변화를 갖은 Geothermal zone의 평균 지중열교환 유효도는 2.63[W/mK]으로 측정되었으며 이와 같은 측정값은 열유체식 지중열교환 유효도 측정장치를 통한 지중열교환 유효도 값에 대한 오차가 2% 이내로 나타났다.

결론적으로 열유체식 지중열교환 유효도 측정장치는 지중열교환기에 전체 깊이에서의 일관적인 지중열교환 유효도 측정이 가능하고 전자식 지중열교환 유효도 측정장치는 깊이에 따른 국부적인 지중열교환 유효도 측정이 가능하였다. 열유체식 방식은 지중열교환기의 전체적인 관점에서의 지중열교환 유효도 측정에 관하여 매우 유용한 측정방식임을 알 수 있었지만, 많은 시간과 전력 및 현지 환경 등에 많은 제약을 받는 것으로 알 수 있었다. 반면에 전자식 측정방식은 깊이별 온도 변화를 통한 토양의 지중 열적 거동 분석이 가능하고 이를 통해 깊이별 지중열교환 유효도 측정이 가능하였으며, 전반적으로 측정시간이 짧고 현지 환경적인 제약을 받지 않았다. 하지만 Geothermal zone을 제외한 Solar zone과 Neutral zone에 대해서는 온도 분포가 급격하게 변하고, 온도구배의 변화가 안정적이지 않아 지중열교환 유효도 분석하는데 있어 용의하지 않음을 알 수 있었으며 상호보완적으로 개선이 필요함을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] 산업자원부 보고서, 2005, “현지용 지중 열전도율 예측기술 개발”, pp4-22, pp50-65
- [2] 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, Vol. 30, pp29-68
- [3] Frank P. Incropera & David P. DeWitt, 1999, "열전달", 교보문고, pp72-77
- [4] 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.
- [5] Yong Hwan Kim, Gun Hyuk Ko, Eun Chul Kang and Euy Joon Lee, 2007, "Wireless High Speed Electronic Geothermal Temperature Measurement Study" Proceedings of the SAREK 2007 Summer Annual Conference, pp 245-250.
- [6] Hyung Chan Kim, Saro Lee and Moo Young Song, 2004, "Geological Characteristics and Heat Flow Relationship in South Korea", Economic and environmental geology, Vol. 37, pp 391-400.
- [7] Yong Hwan Kim, Hyun Myung Taek, Eun Chul Kang, Park Young Jung, and Euy Joon Lee, 2006, “Model to Predict Non-Homogeneous Soil Temperature Variation Influenced by Solar Irradiation”, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 26 No.4
- [8] 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.
- [9] Yong Jun Kim, Jae Sang Choi and Yong Tae Kang, 2005, "Performance Analysis of Ground Thermal Conductivity by Ground Heat Exchanger" Proceedings of the SAREK 2005 Winter Annual Conference, pp 161-166

- [10] Adam Austin, Development of an In Situ System for Measuring Ground Thermal Properties, Oklahoma State Univ. Master's Thesis, 1995.
- [11] Lund, J.W. and Freeston, D.H. , 2001, "World-wide direct uses of geothermal energy", Geothermics, Vol 30, pp29-68.
- [12] Hyo Jae Lim, Hyoung Jin Kong, Yoon Seok Song and Seong Koo Park, 2005, "Thermal Conductivity Measurement of Grouting Materials for Geothermal Heat Exchanger" Proceedings of the SAREK 2005, pp 364-369
- [13] Se-Kyoun Lee, Joung-Son Woo, Jeong-Geun Ro and Dae-Ki Kim, 2006, "A Study on the Estimation of Soil Formation Thermal Conductivities and Borehole Resistances with one-Dimensional Numerical Model and In-Situ Field Tests" Proceedings of the SAREK 2006, pp 783-790





## 감사의 글

어느덧 한국에너지기술연구원에서 지낸 시간이 두 해가 지나갔습니다. 이 시간들은 저에게 있어 새로운 갈림길에서 첫발을 내딛는 매우 뜻있는 시간이었습니다. 지나온 시간들을 돌이켜 보면 많은 분들의 관심과 도움으로 저희 부족한 지식을 채우고 가르침을 얻을 수 있었습니다. 그래서 지면을 빌어 저에게 많은 가르침과 격려를 해주신 많은 분들에게 감사의 글을 전하고자 합니다.

우선, 본 논문이 나오기까지 수많은 지도와 격려를 아끼지 않으시고 믿음과 사랑으로써 감싸 안아주신 이의준 박사님과 강은철 선배님, 김지영 선배님께 진심어린 감사의 마음을 전해드립니다. 그리고 항상 따뜻한 말씀과 지도를 해주신 현명택 교수님께 진심어린 감사의 마음을 전합니다.

또한, 바쁘신 와중에도 제 논문에 많은 관심을 가져주시고, 심사를 맡아주신 권기린 교수님과 박윤철 교수님께 깊은 감사의 말씀을 올립니다. 제주대학교 대학원에서 학연생인 이유로 자주 찾아뵐 수 없었지만, 학과 수업과 생활에 도움을 주신 김귀식 교수님, 허종철 교수님, 정동원 교수님, 고경남 교수님을 비롯한 기계공학 전공 교수님께도 감사의 마음을 전합니다. 그리고 학교를 방문할 때마다 타향살이 하느라 고생한다며 끼니를 챙겨주신 열전달 & 열시스템 실험실의 이동원 박사님, 늘 따뜻한 가슴으로 반겨주셨던 양원호 선배님을 비롯한 김용환 선배님, 김광일 선배님, 홍권태 선배님, 김군철 선배님, 동관, 성부, 원기, 길 그리고 여러 선후배님들께도 고마움을 전합니다.

한국에너지기술연구원에서 학연생으로 있는 동안 제 인생에 있어 또 다른 인생의 지표를 만들어 주신 장기창 센터장님, 우정선 박사님, 윤형기 박사님, 박준택 박사님, 박성룡 박사님, 이영수 박사님, 라호상 선생님께 감사드립니다. 언제나 활동적이시면서 인생의 진로와 지표를 말씀하여 주신 백영진 박사님, 김민성 박사님, 신광호 선배님, 권화길 박사님과 같은 사무실에서 타향살이 하는데 많은 도움을 주었던 관종이형, 함께 어려운 학연생활을 슬기롭게 헤쳐나갔던 용대, 실험하는데 있어 많은 도움을 주었던 재훈, 대전에서 처음 친구가 된 진현, 인생의 반환점을 맞는 재철, 여러모로 도움을 주셨던 명진씨, 일하는데 있어 웃음을 잃

지 않았던 경환, 아들이 첫돌을 맞은 상현이형을 비롯한 태양열지열연구센터의 여러 분들께 감사의 마음을 전합니다.

외로운 타향에서 정으로써 외로움을 달래주셨던 강명철 박사님, 김형중 선배님, 유승훈 선배님, 이승보 선배님께 감사드리고 축구를 통해 많은 기쁨과 즐거움을 함께 할 수 있었던 류재홍 박사님, 생활의 조언과 격려를 아끼지 않으셨던 조영래님께 감사의 마음을 전합니다.

어렸을 때부터 언제나 함께하며 기쁨일과 슬픈일을 함께 나누었던 친구 영균, 경민, 병남, 기환, 대근, 정영과 곧 백년가약을 맺는 찬이, 학교생활에 큰 도움을 주었던 명근, 대학생할 때 같이 꿈을 키웠던 경용, 선희에게 고맙다는 말을 전합니다.

끝으로 오늘의 제가 있기까지 항상 바른길로 이끌어주시고 늘 지켜봐주신 부모님과 누나에게 작은 결실과 함께 머리 숙여 감사의 마음을 전합니다.

2009년 1월 고건혁

