

## 지중 열반응 현장시험에서 소비전력 변동의 영향

김진상<sup>†</sup>, 박근우  
삼양에코너지(주)

### Influences of Power Fluctuation on In-Situ Ground Thermal Response Testing

Jinsang Kim<sup>†</sup>, Keunwoo Park  
*Samyang Eco-Energy Co., Chuncheon, 200-853, Korea*

**ABSTRACT:** Knowing the ground thermal conductivity is very important in designing ground heat exchangers. Knowledge of the ground soil and rock composition information does not guarantee the prediction of accurate thermal information. In Situ testing of ground heat exchangers is becoming popular. However, in situ testings are performed at construction sites in real life. Adequate data collection and analysis are not easy mainly due to poor power quality. Power fluctuation also causes the fluctuation of received data. The power quality must be maintained during the entire in situ testing processes. To accurately analyse the test data, the understanding of the response of the power fluctuation is essential. Testing under the power quality varied by tester is very difficult. Analyzing power variation by numerical simulation is a realistic option. By varying power in a sinusoidal manner, its effects on predicting thermal conductivity from thermal response plots made from the test data are examined.

**Key words:** 지중열 반응(Ground Thermal Response), 지중열교환기(Ground Heat Exchanger) 현장 시험(In Situ Test), 지열히트펌프(Geothermal Heat Pump)

#### 기 호 설 명

$T_{out}$  : 지중 순환유체 출구 온도 (°C)  
 $T_{in}$  : 지중 순환유체 유입 온도 (°C)  
 $T_f$  : 순환 유체 온도 (°C)  
 $T_b$  : 보어홀 벽 온도 (°C)  
 $T_{ground}$  : 지중 온도 (°C)  
 $m$  : 온도 대 자연로그시간 그래프 기울기  
 $Q$  : 소비전력 (W)

$\Delta Q$  : 소비전력 변동량 (W)  
 $L$  : 보어홀 깊이 (m)  
 $k$  : 열전도율 (W/m°C)  
 $R_{orehole}$  : 보어홀 열저항  
 $R_{ground}$  : 지중 열저항

#### 1. 서론

연중 일정한 지중의 열은 가장 안정적인 열원의 하나로 이용되고 있다. 히트펌프를 이용하여 건물의 냉난방이나 급탕에 필요한 온도로 열을 공급하게 되는데, 지중에 설치하는 열교환기는

<sup>†</sup>Corresponding author

Tel.: +82-2-566-6754; fax: +82-2-6008-7776  
E-mail address: kimj@chol.com

히트펌프를 원활하게 구동시키기 위한 열원(heat source) 또는 히트 싱크(heat sink)로서 이용된다. 지중 열교환기를 구성하는 방식 중에서 폐회로(closed loop)를 이용하는 방법이 보편적으로 사용되고 있다. 주로 고밀도 폴리에틸렌 파이프를 다양한 형태로 제작하여 지중에 매설하고 그 파이프 내부로 물 또는 부동액이 첨가된 물을 순환시켜서 지중에 열을 저장하거나, 추출하는데 이용한다. 이러한 지중 열교환기는 일반적으로 같은 형태의 것을 모듈화하여 이를 여러 개 설치하고 이를 연결하여 사용하게 된다. 지중의 열적 특성은 매우 복잡하다. 구성하는 토양이나 암반의 구성에 따라서, 그리고 깊이, 그리고 지하수 또는 수분함유량에 따라서 크게 달라지는데 열적 특성을 정확하게 예측하여 열교환기 설계에 활용하는 것은 매우 어려운 일이다. 오랜 기간을 사용하게 되는 지중 열교환기를 정확하게 설계하기 위해서는 이를 구성하는 단위 열교환기를 설치하고 열반응시험을 실시하여 열적 특성을 측정하여 열교환기 설계에 활용하는 것이 매우 바람직한 일이다.

열반응 시험에는 단위 지중 열교환기와 전기 히터 그리고 펌프를 폐회로로 연결하고 그 내부에 물을 순환시켜서 순환되는 물의 온도를 측정하여 지중의 열전도율을 측정한다. 이러한 열반응시험은 지중열교환기가 설치될 현장에서 시행하게 되는데, 이러한 공사 현장에서 임시로 공급받는 전기를 사용하게 되는 경우가 대부분이다. 이러한 공사현장의 전력은 현장에서 여러 가지의 기계가 사용되는데, 사용되는 작동되는 장비에 따라서 전력이 크게 변동하는 품질이 낮은 전력을 공급 받게 되는 경우가 많다. 전력소비용량이 많은 장비가 사용되는 경우, 특히 정지하고 기동하는 경우에 심한 과도 전류가 흐르게 되며 센서에 노이즈가 발생하기도 한다. 지중열교환기의 종류에 따라서 열반응 시험을 장기간 수행하는 경우가 있다. 특히 수직밀폐형 지중열교환기에서는 그라우팅이 보어홀 내부에서 U자 파이프 사이의 공간을 메꾸게 되는데, 이러한 경우에 암반의 열전도율을 측정하기 위해서는 장시간 시험을 하게 된다. 이러한 경우에 작업이 많은 주간과 작업이 없는 야간등으로 주기적으로 또는 불규칙적으로 반복되는 소비전력의 변동을 보이기도 한다.

최근에 현장에서 사용되는 열반응시험기는 기기의 정밀도에 관한 정보는 물론 여기에 사용되는 센서의 정밀도에 대한 정보를 제공하지 않는 경우가 많다. 또한 열반응시험을 신뢰할 만한 수준에서 원활하게 수행하기 위해서는 열관련 시험에 경험이 있는 엔지니어가 시험을 수행할 필요가 있으며, 시험을 수행하는 동안 데이터의 상태를 모니터링하면서 수행하여야 재시험을 반복할 필요성을 줄일 수 있다.

최근 국내에서도 열반응 시험에 대한 연구가 수행되었다[1~6]. 그 중에는 수직 밀폐형 지중열교환기에 관한 것이 대부분이며[1~5], 수평형 지중열교환기에 적용한 경우[6]도 있다. 해외에서도 이에 대한 다양한 연구가 보고되어 있다[7~11]. 최근 국내 현장에서도 널리 쓰이기 시작하고 있으나, 열반응시험에 관한 규격화 또는 검증에 대한 검토는 부족한 상태이다.

본 연구에서는 지중열교환기중에서 가장 널리 사용되고 있는 수직밀폐형 지중열교환기에 대하여 열전도 현장시험을 수행한 사례를 검토하고, 현장의 전력공급의 불안정성이 시험결과에 미치는 영향을 분석하기 위하여, TRNSYS[12]를 사용하여 시뮬레이션을 수행하여 그 분석 결과를 제시하였다.

## 2. 지중 열반응 현장시험의 원리

지중 열반응 현장시험 장치는 지중 열교환기의 단일 모듈에 연결하여 일정한 열량을 공급하여 지중 열교환기의 반응을 측정하는 장치이다. 시험을 수행 한 개의 보어홀과 연결하여 시험을 수행한다. 시험 장치가 구동하면 전기 히터가 가동하여 일정한 열량을 공급하도록 하고, 펌프가 구동하여 작동유체를 일정하게 순환시키도록 작동한다.

시험 장치가 구동하기 시작하여 일정한 열량이 공급되기 시작하면 지중열교환기로 유입되는 유체온도와 나오는 유체는 일정한 온도차를 유지하게 된다. 처음에는 HDPE 파이프를 통해 열이 전달되며, 파이프를 거친 다음에는 그라우팅 재료이나, 되메움 재료를 거쳐나간다. 수평형 열교환기의 경우에는 파이프를 통과한 후 되메움 재료를 통과하게 되는데, 되메움 시에 되메움 재료에 포함된 공기등의 영향으로 열전도 성능이 낮아지

게 될 우려가 있다.

일반적으로 널리 쓰이는 수직 밀폐형 지중열교환기에서는 HDPE파이프를 통과한 열은 그라우팅 재질을 통과하게 된다. U Pipe가 중앙에 위치하고 일정한 간격을 유지하기가 현실적으로 어려우므로, 일정한 두께의 파이프를 통과한 후에는 그라우팅 재료와 암반 또는 토양 사이에서 복잡하게 열전달이 이루어진다. 이후에서는 토양 또는 암반에서 열전달이 이루어진다.

열전도율이 낮은 U Pipe를 통과할 때는 온도가 급격하게 오르며, 그라우팅재료 및 암반 복합구역을 통과할때는 온도 상승비율이 작아지게 되며, 열전도율이 높은 암반층에서는 낮은 기울기를 나타나며 일정한 기울기를 유지하게 된다.

X축에 경과시간을 나타내고 Y축에 평균온도를 나타낸 그래프에서 X축을 자연로그로 변환하면 Line Source Method[1]를 이용하면 간편하게 열전도율을 구할 수 있어서 현장에서 널리 이용되고 있다.

$$k = \frac{Q}{4\pi Lm} \quad (1)$$

식 1에서 전기히터의 소비입력과 보어홀의 깊이 그리고 자연로그 그래프에서의 기울기를 입력하면 Line Source Model을 이용한 열전도율을 간편하게 구할 수 있다. 이외에 Cylindrical Source Model에 관한 연구도 진행되고 있다[5]. Gehlin의 논문[12]에 의하면 보어홀의 저항과 토양의 저항에 관한 관계를 그림 1과 같이 잘 나타내고 있다.

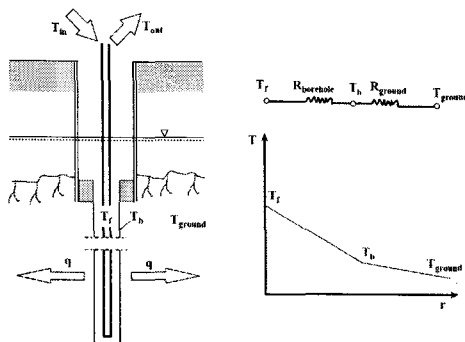


그림 1 보어홀의 지중열전달 개념도[12]

### 3. 지중 열반응 현장시험 장치의 구성

지중 열반응 현장시험 장치는 지중열교환기와 폐회로를 이루어 유체를 순환시키는 펌프를 비롯하여 일정한 열량을 공급할 수 있는 전기 히터가 설치되며, 지중열교환기의 입구와 출구에서 온도를 측정할 수 있는 온도 센서와 폐회로를 순환하는 유체의 량을 측정할 수 있는 유량계를 설치한다. 이를 간단하게 그리면 그림 2과 같다.

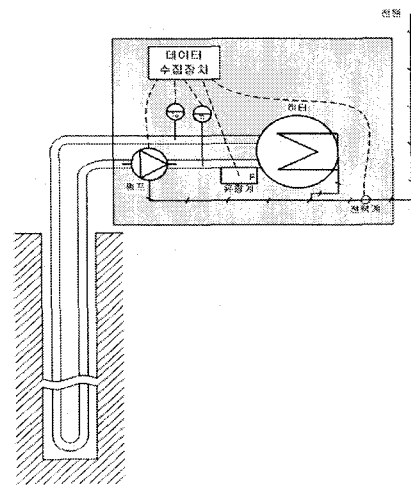


그림 2 지중열반응 현장시험 장치와 수직밀폐형 지중열교환기

수직밀폐형 지중열교환기는 고밀도 폴리에틸렌으로 만들어진 파이프 1개 이상의 쌍으로 이루어져 있으며, 보어홀의 한단에서 U-Shape가 단단하게 융착되어 있는 구조인 U-Pipe가 보어홀 바닥 끝까지 설치하고 U-Pipe와 보어홀 사이의 빈공간을 그라우팅 재료를 사용하여 바닥부터 지표까지 메우는 것이 일반적인 방식이다.

### 4. 현장시험 실시 사례

위와 같이 수직밀폐형 지중열교환기에 지중 열반응 현장시험장치를 연결하여 현장시험을 수행한 결과를 보고자 한다. 보어홀 깊이는 180m이며 이의 직경은 150mm이며, 내경이 40mm인 파이프로 만든 U Pipe 1개가 보어홀 내에 설치되었으며, 보어홀 내부를 그라우팅 재료를 사용하여 그라우팅을 수행하였다. 이를 요약하면 다음 표1과 같다.

표 1. 현장 시험 조건

항목	단 위	조건
보어홀 깊이	m	180
보어홀 직경	mm	150
HDPE 직경	mm	40
U 파이프 수	개	1
그라우트 재료		벤토나이트 실리카 샌드

전기는 현장에서 사용하는 전기를 이용하였다. 현장에서 총 10kW의 전력이 공급되고 있었으며, 현장내의 임시 식당에서도 같이 사용하고 있었다.

여기서 시험한 결과는 다음 그림 3에 표시되었다. 위의 그래프는 지중열교환기로 유입되는 유체의 온도와 나오는 온도의 평균 값이 표시되어 있고, 그 아래에는 소비전력을 나타내고 있다. X축은 시험 경과 시간을 나타내고 있으며, 왼쪽의 Y축은 평균온도로서 14에서 24℃사이에서 2℃간격으로 표시되어 있으며, 아래 그래프는 소비전력을 나타내며, 오른쪽 Y축에 표시되어 있다. 소비전력은 0부터 6,000W까지 1,000W의 간격으로 표시되어 있으며, 소비전력을 아래 쪽에 표시하기 위하여 오른쪽 Y축의 상단이 0으로 표시되고 X축과 만나는 좌표가 6,000W이다. 소비전력을 다른 그래프에 별도로 표시하면 그림 4과 같다. 여기에서는 Y축의 하한이 4,000W이고 상한이 6,000W이다.

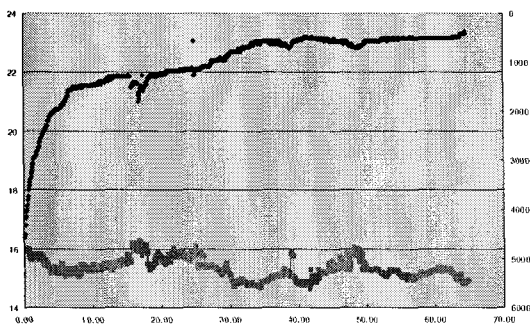


그림 3 현장 시험 사례 (평균온도 및 전력)

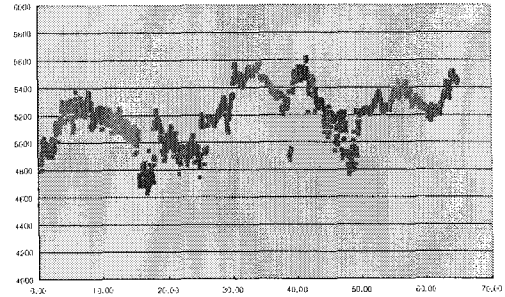


그림 4 현장 시험 사례의 소비 전력

이를 바탕으로 열전도율을 구하기 위하여 로그 축변환을 수행한 결과는 그림 5와 같다.

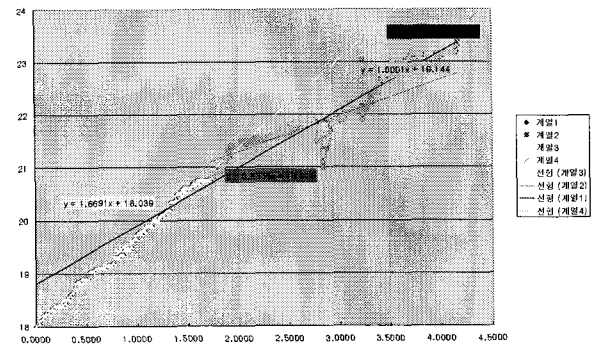


그림 5 시간의 로그 변환 결과

위의 변화결과에서 그래프의 기울기를 구간에 따라서 각각 구하면 1.6691, 0.6838, 1.0001, 1.0944등이 나온다. 이 기울기 값은 계산식의 분모도 들어가게 되며 어떤 값을 적용하느냐에 크게 변동하게 된다. 기울기로 0.6838을 적용하는 경우는 1.6691을 적용하는 경우에 비하여 최대 2.44배가 커지게 된다. 시험 초기의 데이터인 1.6991 대신에 1.0944를 적용하여도 1.6배가 되어, 신뢰도 높은 토양의 열전도율을 구하였다고 보기 힘들다.

위와 같이 지중 열반응 현장시험에서 소비전력의 변동은 신뢰도 높은 값을 얻는데 어려움을 초래한다. 소비 전력의 진폭이나 진동 주기가 시험 결과에 미치는 영향을 시험적으로 조사하기는 매우 어렵다. 설치 현장에서 소비전력을 임의로 조절하여 시험을 수행하는 것은 불가능하다. 그러므로 이러한 영향을 조사하기 위하여 TRNSYS를 사용하여 지중 열반응 현장시험의 시뮬레이션을 수행하였다.

## 5. 현장시험 모델의 시뮬레이션

위와 같이 1개의 수직밀폐형 지중열교환기에 전기히터로 열을 공급하는 수직밀폐형 열교환기에 대한 지중 열반응 현장시험 모델에 관하여 시뮬레이션을 수행하였다. 수직밀폐형 지중열교환는 Hellstrom모델을 기반으로 하고 있다.

TRNSYS를 통하여 전기 히터에 공급하는 열량을 시간에 따라 변화시켜서 지중열교환기의 열반응을 시뮬레이션을 수행하였으며, 여기에 사용된 입력조건을 요약하면 표 2와 같다.

표 2. 입력 조건표

항목	단 위	조건
지중온도	℃	14
보어홀 깊이	m	180
보어홀 직경	mm	150
HDPE 직경	mm	40
U 파이프 수	개	1
그라우트 재료		벤토나이트 실리카 샌드
평균 소비전력	kW	13.12
소비전력 변동비율		0%, 1%, 2%, 3%, 5%, 10%
소비전력 변동주기	시간	12

열량은 평균 소비전력을 기준으로 변동량만큼을 12시간을 주기로 Sine파 형식으로 변동 시켰다. 이를 수식으로 표시하면 식 2와 같다.

$$Q = Q_{average} + \Delta Q \sin\left(\frac{t}{6}\pi\right) \quad (2)$$

여기서 t는 경과시간을 나타낸다. 본 연구에서는 시험시간을 48시간으로 선정하여 12시간의 주기가 미치는 영향을 파악하여, 향후 현장시험에서 나오는 데이터를 분석할 때 활용할 수 있도록 계획되었다. 여러 가지 변동비율에 대한 열반응 한개의 그래프에 표시하면 다음과 같다.

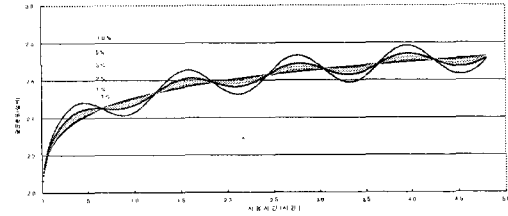


그림 6 소비전력 변동이 열반응에 미치는 영향

위의 그림 6에는 6개의 그래프가 표시되어 있으며, 진폭이 클수록, 0%, 1%, 2%, 3%, 5%, 10%의 변동비율로 그 영향이 나타나 있다. 경과시간은 48시간이며, Y축은 20에서 30℃까지 변한다. 그림 6의 그림의 X축인 경과시간을 자연로그로 변환하면 그림 7이 되며, 그 기울기를 구하여 식 1을 이용하여 지중의 열전도율을 계산한다.

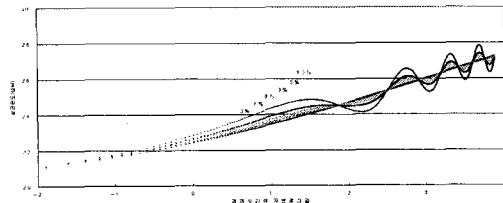


그림 7 자연로그 변환 열반응 그래프

그림 7에서 변동비율이 증가할 수록 진동이 증가함을 알 수 있다. 변동비율이 증가한 그래프에서는 기울기를 정확하게 그리고 체계적으로 간편하게 구하기가 매우 어렵다. 그 변동 비율이 증가할 수록 어려움도 증가한다.

6개의 변동 비율중에서 2%가 변화할 때의 열반응 결과를 그림 8에 표시하였다. 현장에서 통용되는 룰에 따라서 초기 10시간 정도를 제외하고 나면 나머지 데이터를 가지고 기울기를 정확하게 구하기가 어렵다. 특히 시간이 짧은 경우에는 시작하는 점과 끝나는 점에 따라서 값이 크게 변화하게 된다.

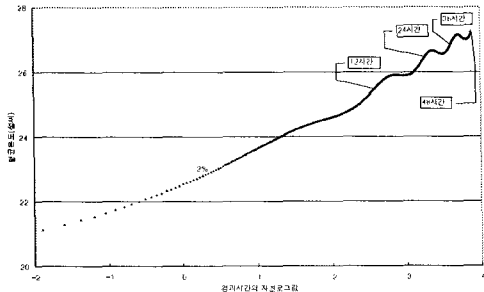


그림 8 변동비율이 2%인 경우의 열반응

전체 48시간 동안 시험한 결과를 12시간 간격으로 표시하였으며, 12시간 마다, 한 주기씩 온도가 변동함을 알 수 있다. 전력 변동이 심한 경우 초기를 제외한 결과를 이용하여 분석하는 경우 어느 지점부터 어느 지점까지의 데이터를 선택하느냐가 결과에 큰 영향을 줄 것이 분명하다. 실제에서는 시뮬레이션과 같이 주기를 정확하게 파악하기 어렵다.

## 6. 결론

전력의 변동이 지중열교환기의 지중 열반응 현장시험에서 미칠 수 있는 영향에 대하여 시뮬레이션 결과를 통하여 간편하게 알 수 있었다. 현장 시험을 수행하는 경우 전력 변동에 대한 규정이 절실하게 필요하다고 볼 수 있다. 또한 현장 시험 초기에도 전력의 변동을 판단할 수 있도록 데이터를 모니터링하는 것도 재시험으로 인한 시간의 낭비를 예방할 수 있다. 현장에서 널리 쓰이기 시작하는 지중 열반응 현장시험 결과를 유용하게 사용할 수 있도록 시험 및 데이터 처리에 관한 지침의 개발이 절실하다.

## 후 기

본 연구는 에너지관리공단이 지원한 연구과제 2005-N-GEO2-P-01의 일부로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 김영준외, 지중열교환기의 지중열전도도 성능 분석, 대한설비공학회 2005동계학술발표대회 논문집, pp. 161~166
2. 백성권외, 지중냉난방 시스템 적용을 위한 지

- 반의 열전도 특성에 관한 연구, 대한설비공학회 2005하계학술발표대회 논문집, pp.356~361
3. 손병후외, 지중열교환기 보어홀 그라우팅 재료의 유효 열전도도 측정, 대한설비공학회 2005하계학술발표대회 논문집 pp.368~373
4. 이상훈외, 지열교환기 열성능 측정에 대한 현장열응답테스트의 적용사례, 대한설비공학회 2005하계학술발표대회 논문집, pp.450~456
5. 임효재외, 그라우트 재료에 따른 지중열교환기의 열전도도에 관한 실험적 연구, 대한설비공학회 2004하계학술발표대회 논문집, pp. 1317~1322
6. 정민호외, GSHP용 수평형 지중열교환기의 열전달 성능에 관한 실험적 연구, 대한설비공학회 2005하계학술발표대회 논문집, pp.457~462
7. Witte H.J.L., et. al., In Situ Measurement of Ground Thermal Conductivity: A Dutch Perspective, ASHRAE Transactions, Vol.108, No.1.
8. Mands, E. et.al., In-Situ Determination of underground thermal parameters., International Summer School on Direct Application of Geothermal Energy.
9. Rohner, E, and et. al., A New, Small, Wireless Instrument to Determine Ground Thermal Conductivity In-Situ for Borehole Heat Exchanger Design, Proceedings World Geothermal Congress 2005
10. Gehlin, S., et.al., Thermal Response Tests of Boreholes-Results from In Situ Measurement.
11. Gehlin, S., et al., Thermal Response Test Method Development and Evaluation, Ph.D. Thesis, Lulea University of Technology, Sweden
12. TRNSYS 16, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin at Madison