

지중 유효 열전도도 측정 방법 및 결과 분석

임 효 재*, 공 형 진**

*지식경제부 지정 지열인력양성센터 센터장, **지식경제부 지정 지열인력양성센터 사무국장

일반원고

1. 서론

지열 열펌프 시스템은 연중 일정한 지중 열원을 이용하여 외기 온도와 관계없이 냉/난방 용량을 유지할 수 있으며, 어느 곳에서나 개발 및 이용이 가능해 재생에너지원으로서 많은 관심을 받고 있다.

그러나 지열 열펌프 시스템이 일반적인 냉난방 시스템으로 인정받지 못하는 가장 큰 이유는 시스템 설치에 많은 예산이 소요되기 때문이다. 특히 지중 열교환기 설치에 전체 시공비의 약 50%가 소요된다.

지열 냉난방 시스템의 구성요소는 세 부분으로 실내부하, 열펌프 및 지중 열교환기로 나눌 수 있다. 설치 현장의 지중 상황에 가장 큰 영향을 받는 지중 열교환기는 전체 시스템의 성능을 결정하는 주요 부분이며, 열교환기 성능은 지중 열교환기 내부의 순환유체와 지중 지반과의 열전달과 밀접한 관련이 있다.

최적의 지중 열교환기 설계 및 시공은 지열 냉난방 시스템의 초기 설치비와 성능을 결정짓는 매우 중요한 역할을 담당하기 때문에 현장에서 이뤄지는 지중 유효 열전도도 측정을 통해 설계 요소를 파악하는 것이 중요하다.

지중 열교환기의 열적 성능에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 지중 구성물질의 열전도도와 보어홀의 열저항이다[1]. 따라서 지중 구성물질의 열물성을 파악하는 것이 중요하다. 그 외에는 지질학적인 특성, 지중 지반의 함수비 및 지하수 유동 등에 영향을 받는다. 일반적으로 지중은 설치위치가 동일한 지역이라도 깊이에 따라 구성 물질이 다를

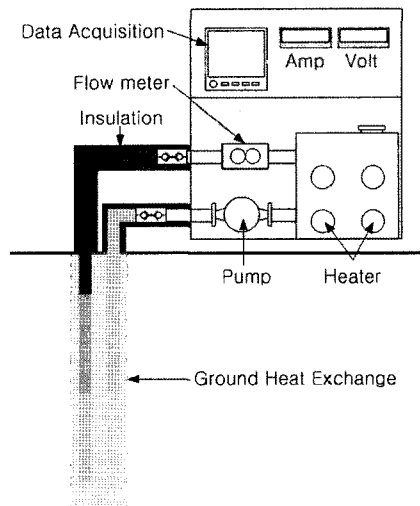
수 있다.

지중 유효 열전도도는 현장에서 직접적인 시험을 통해 분석할 수 있으며, 실제 사용되는 조건으로 열전도 시험을 수행하여 측정된 데이터를 라인소스 이론을 적용하여 계산한다[2].

본 원고에서는 현장에서 진행되는 수직형 지중 열교환기의 유효 열전도도를 진행하는 기준과 절차를 알리고자 한다.

2. 지중 유효 열전도도 측정 기준

국내에 설치되는 지열 열펌프 시스템의 형태는 대부분 수직형 지중 열교환기를 이용한다. 수직형 열교환기는 연중 일정한 온도를 이용할 수 있도록 지하 100 ~ 200m 정도의 수직 보어홀에 고밀



[그림 1] 지중 열전도도 측정 모식도

도 폴리에틸렌 파이프를 제작된 U-tube를 삽입하고, 그 주위를 벤토나이트 계열의 그라우팅 재료로 그라우팅하여 이용한다.

설치가 완료된 지중 열교환기 내부로 순환유체를 순환시켜 지중과의 열교환을 통해 열펌프로 공급해서 실내에 냉난방 운전을 하게 된다.

그림 1은 수직형 지중 열교환기와 지중 유효 열전도도 측정 장비의 개략도를 나타낸 것이다. 측정 장비는 순환수의 보급 및 히터가 장착된 수조와 순환유체를 순환시키는 순환펌프, 전원을 공급하는 전원부 그리고 데이터를 저장하는 측정부로 나눌 수 있다.

지중 유효 열전도도 측정 원리는 열교환기 파이프 내로 히터를 통해 가열된 순환유체를 유입시켜 지중과의 열교환을 통해 환수되는 유체의 온도차와 유량, 에너지 투입량을 측정하여 분석한다.

온도, 유량, 전력 및 데이터 측정 장치는 검, 교정을 받은 장비를 사용하고 약 10분 이상의 무부하 운전으로 순환하여 지중 초기온도를 측정한다. 이어서 히터에 전원 투입 후 48시간 연속으로 측정하여, 10분 이하의 간격으로 데이터를 수집한다.

수직형 지중 열교환기의 지중 열전도도 테스트 측정기준은 표 1에 나타내었다[3].

3. 지중 유효 열전도도 측정

3.1 지중 유효 열전도도 측정 준비

지중 유효 열전도도 측정은 지열원 열펌프 시스템의 구성요소 중 하나인 지중 열교환기에서 진행된다. 지중 열교환기는 보어홀, 고밀도 폴리에틸렌 u-tube, 보어홀과 파이프사이의 빈 공간을 채우는 그라우팅 재료 등으로 구성되며 그 절차는 다음과 같다.

- (1) 지중 열교환기를 설치하는 지역에 굴착행위 신고
- (2) 보어홀 천공을 위한 인력과 장비 준비
- (3) 천공 시작전 시추 슬러리와 지하수 등을 원활히 배수할 수 있는 배수로 준비
- (4) 파이프 삽입전 연결부위 검사 및 압력 테스트 수행
- (5) 보어홀 깊이 및 파이프 길이 확인
- (6) 지중 열교환기 파이프와 트래미 파이프를 보어홀에 삽입
- (7) 트래미 파이프를 이용하여 보어홀 최하단부터 그라우팅
- (8) 그라우팅 재료를 지속적으로 보충

<표 1> 측정 항목 및 기준

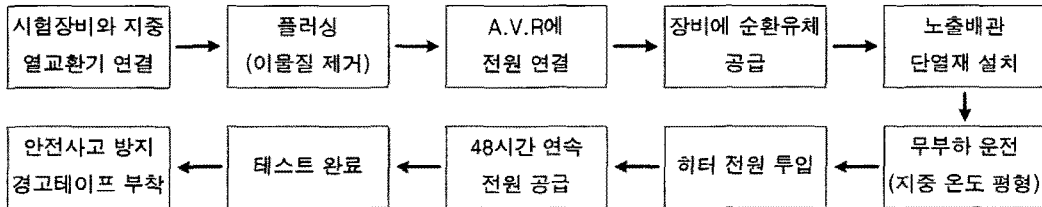
구분	항 목	기 준
측정시간	열전도도 측정 개시	그라우팅 완료 후 벤토나이트 그라우팅 : 72시간 이후 시멘트 그라우팅 : 14일 이후
	제외 시간	시험 시작 후 12시간 데이터 제외
	유효 데이터의 연속 취득시간	48시간 이상 연속 취득
	데이터의 취득 간격	10분 이하
측정조건	측정공 투입 전력량	2관식 : 50 ~ 80 W/m 3관식 : 60 ~ 95 W/m 4관식 : 65 ~ 105 W/m
	Loop 입출구 온도차	3.5 ~ 7℃
측정오차	측정온도의 오차	±0.3% 이하 (평균온도에 대한 표준편차)
	입력전력의 오차	±3% 이하 (평균전력에 대한 표준편차)
재 측정	재측정 개시	지중 초기 온도의 0.3℃ 이내까지 회복 후 재측정

3.2 지중 열전도도 측정 절차

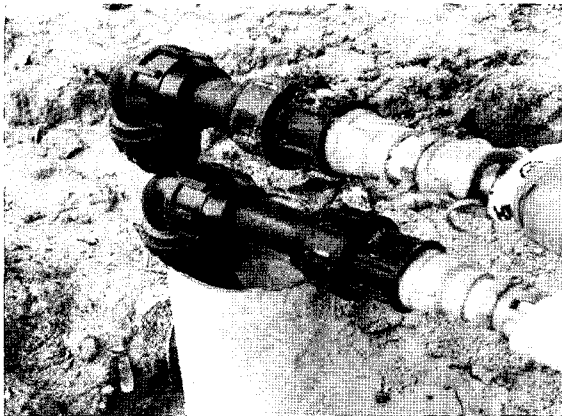
지중 열전도도 측정을 위한 방법은 그림 2와 같다. 그림 3과 같이 지중 열교환기를 측정 장비와 체결하고, 플러싱을 작업을 통해 파이프 내부의 이물질을 제거

한다. 그림 4는 전원 공급을 위해 수전설비나 발전기를 자동 전압 조정기(A.V.R, Automatic Voltage Regulator)에 연결한다.

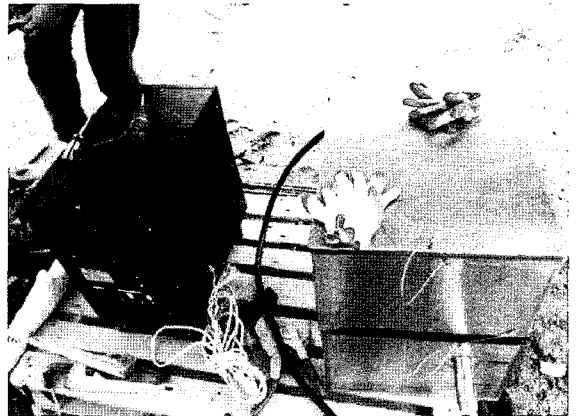
지중 열전도도 측정장비 내부에 위치한 수조에 적정량의 물을 공급하여 지중 열교환기와 연결된



[그림 2] 지중 열전도도 측정 절차



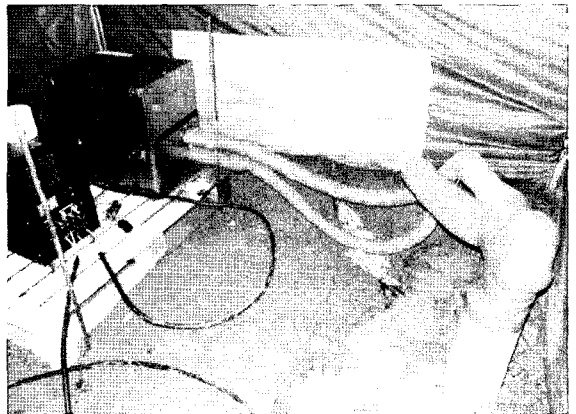
[그림 3] 배관 연결



[그림 4] 장비 설치



[그림 5] 보온재 설치



[그림 6] 측정 준비

배관의 누수여부를 확인한다. 그리고 그림 5, 그림 6과 같이 외기 영향을 차단하기 위해 대기에 노출된 배관을 단열재로 보온하여 외기 영향을 최소화한다. 이어서 약 1시간 정도의 무부하 운전 을 통해 순환유체와 지중과의 평형상태를 유지한다. 지중과의 온도가 안정적으로 유지하면 히터를 작동시켜 열원을 지중으로 공급한다.

대기영향 및 우수의 침투 방지를 위해 그림 7과 같이 차단막을 설치하여 48시간 연속으로 전원을 공급하여 데이터를 취득한다. 그림 8은 실험을 완료하여 안전사고 방지를 위해 열교환기 주위에 경고 테이프를 부착한 사진이다.

3.3 지중 유효 열전도도 측정 신청 절차

지중 유효 열전도도 신청 절차는 다음과 같다.

- (1) 지열인력양성센터 홈페이지(www.gteec.or.kr) 접속
- (2) 기술지원신청란에서 지중 유효 열전도도 신청
- (3) 측정 일자 및 준비사항 점검 후 접수
- (4) 지열인력양성센터와 일정 협의
- (5) 지중 유효 열전도도 측정 (현장)
- (6) 연속 48시간 전원 투입 유지
- (7) 측정 장비 철수 및 측정 현장 정리
- (8) 성적서 발급 및 측정 데이터 이메일 전송 후 우편 발송



[그림 7] 측정 완료

4. 지중 유효 열전도도 분석

4.1 라인소스 이론

지중 유효 열전도도를 분석하기 위해 Kelvin의 라인 소스 이론을 이용한다.

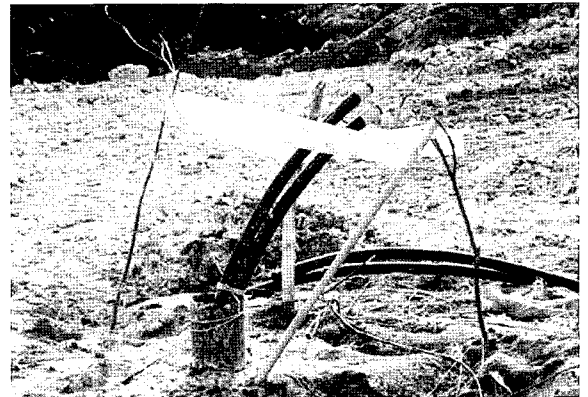
라인소스 이론은 무한 영역의 열원에서 특정 지점의 온도를 산정하는 방법이다. 열전달은 보어홀과 지중 암반의 접촉면에서 일정한 열 유속으로 열원의 수직방향으로만 이루어지며 열원의 온도는 항상 일정하게 유지된다고 가정한다. 그리고 지반의 물성치는 항상 일정하며, 지하수의 이동과 보어홀 끝단에서의 영향은 고려하지 않는다.

Ingersoll and Plass은 Kelvin[1]의 라인소스 모델을 식 (1)과 같이 나타내었다.

$$\Delta T(r, t) = \frac{\dot{Q}}{2\pi k} \int_r^\infty \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} a \quad (1)$$

식 (1)에서 $\Delta T(r, t)$ 는 열원으로부터 반경 r 인 지점의 초기온도 T_0 에서, 시간 변화에 따른 온도 상승율을 의미한다. \dot{Q} 는 보어홀의 단위 길이당 열전달량(specific heat transfer rate)이며, k 는 지중 열전도도이다. 그리고 a 는 $k/\rho C$ 로 정의되는 지중 구성물의 열확산 계수이다.

위의 식 (1)은 Mogensen에 의해 순환유체와



[그림 8] 최종 정리

지중 열교환기 파이프 벽면의 열저항 m_{TR} 과 일정 기간 동안 투입되는 열주입량과 온도변화에 의한 지반의 유효 열저항을 고려하여 식 (2)와 같이 나타내었다.

$$\Delta T(R,t) = \dot{Q} m_{TR} + \frac{\dot{Q}}{4\pi k} \left[\ln\left(\frac{4a}{R^2}\right) - C \right] + \frac{\dot{Q}}{4\pi k} \ln t \quad (2)$$

식 (2)의 우변의 첫 번째 항과 두 번째 항에서 열전달량과 열저항 값, 열 확산 계수가 시간에 대해 일정하다고 가정하고, 열전도도 측정 기간이

충분히 긴 경우 식 (2)는 식 (3)과 같이 간소화시켜 표현할 수 있다.

$$\Delta T = A + \left(\frac{Q}{4\pi k}\right) \times \ln(t) \quad (3)$$

식 (3)에서 ΔT 는 지중 열교환기 파이프내부를 순환하는 순환유체의 온도변화율을 의미하며, Q 는 지중으로 투입된 열량, t 는 시간을 뜻한다. 식 (3)을 열전도도 k 로 정리하면

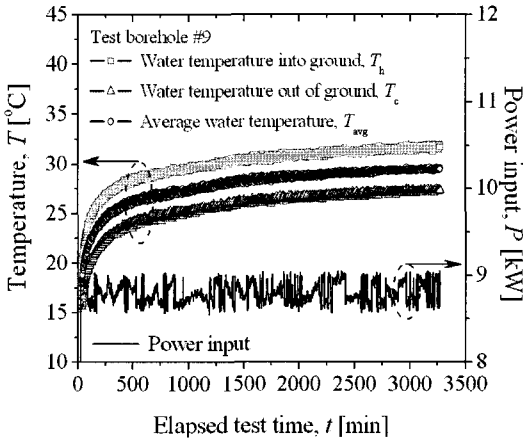
$$k = \frac{Q}{4 \times \pi \times L \times S} \quad (4)$$

식 (4)에서 Q 는 지중으로 투입된 열량이며, L 은 보어홀의 깊이, S 는 로그변환 시간-온도 그래프의 기울기 값이다.

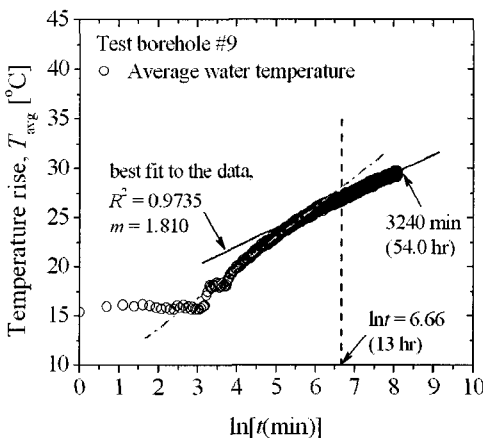
4.2 분석 결과

그림 9는 지중 유효 열전도도 측정 완료 후 취득한 데이터를 이용해 진행 시간에 따른 열 투입량과 온도 변화량을 나타낸 그래프다.

그림 10은 로그 시간 - 평균온도를 나타낸 것으



[그림 9] 시간별 온도변화량



[그림 10] 로그시간 - 평균온도 변화

시험 결과 TEST RESULT	
실험자 번호 Test. No.	QTREC-08- [] 페이지 1/4
1. 고객명 (Client)	
기업명	대우건설
담당자(담당자명)	김영민
주소 (주요주소)	경남 창원시 마산합포구 마산대로 100
2. 시험명세서의 용도 (Purpose of Test) : 기타(수업실습/시험준비용/연구용)	
3. 시험규격 표준 (Test Standard) : KS K 5101-2008 (KS K 5101-2008) '지반의 열전도도, 열저항, 열용량 측정 방법'	
4. 적용시험도 측정물 (In-Situ Thermal Conductivity Test Hole)	
시험물	구경/깊이
시험시간	2008-12-22 09:12:14
유체	시험유체
유체	시험유체
5. 시험기간 (Date of Test) :	
6. 시험환경 조건 (Test Conditions) :	
7. 시험결과 : 열량자료	
* 이 시험결과서는 온도 기록의 사용용입니다.	
* 이 시험결과서는 시험용입니다.	
The copy of this test reports is available for use.	
확인	승인자(Approved by)
일명	일명
일명	일명
2009년 11월 10일	
지열인력양성센터 (지열특성기술연구센터)	
주소 : 부산광역시 중구 중앙대로 108-1 (신대동) 12-101호	
TEL : 910-2411-2500 FAX : 910-2411-5500	

[그림 11] 결과 보고서

로 초기 12시간의 데이터를 제외하고 기울기 값을 계산한 그래프다.

그림 11은 지중 유효 열전도도 측정 완료 후 실험 결과를 작성한 결과보고서다.

지열원 열펌프 시스템은 지중의 열에너지를 이용하는 유망한 기술 중에 하나이다. 지중 유효 열전도도 및 초기 온도는 지역 및 깊이에 따라 물리적, 열적 성질의 차이로 인해 매우 큰 편차를 나타내고 있다. 따라서 최적의 시스템 구성과 효율적인 지중 열교환기 구성을 위해서는 현장의 열전도도를 측정하여 설계에 반영하는 것이 필요하다.

참고문헌

1. Austin W. A III, 1998, Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties, MS thesis, Oklahoma State University, Stillwater, OK, U.S.A.
2. Stephen P. Kavanaugh, Kevin Rafferty, 1997, Ground-Source Heat Pumps, A.S.H.R.A.E., Atlanta, Georgia, pp. 27~31.
3. 신·재생에너지센터, 2010, 신·재생에너지 설비의 지원 등에 관한 지침