

# 지중 루프 열교환기 인증기준

본 고에서는 지중 루프 열교환기의 인증기준으로서, 루프 열교환기의 분류, 평가기준, 열·물리적 성질 검증 그리고 성능 검증 등에 대해서 개략적으로 기술하고자 한다.

조정식, 손병후, 신현준  
한국건설기술연구원

## 1. 개요

토양 열원 열펌프 시스템을 구성하는 지중 루프 열교환기의 성능 및 보어홀 그라우팅 재료의 열·물리적 성질 검증에 적용되며, 수직형 지중 루프 열교환기를 주 대상으로 한다.

본 고에서는 지중 루프 열교환기의 인증기준으로서, 루프 열교환기의 분류, 평가기준, 열·물리적 성질 검증 그리고 성능 검증 등에 대해서 개략적으로 기술하고자 한다.

## 2. 분류

### 2.1 벤토나이트계열 그라우트

- (1) 벤토나이트와 물을 혼합한 순수 벤토나이트 슬러리는 지중 열교환기 보어홀의 그라우팅 재료로 사용될 수 있다.
- (2) 그라우팅 재료로서 순수 벤토나이트는 나트륨을 주성분으로 하는 벤토나이트와 첨가제를 물과 혼합한 슬러리 형태이다. 이 때 벤토나이트와 첨가제로 구성된 고체성분이 물과 혼합되는 과정의 초기에는 점도가 낮은 상태로 있지만, 시간이 경과함에 따라 물의 흡수량이 증가하여 슬러리의 점도 또한 증가한다.
- (3) 따라서 현장에서 그라우트를 보어홀 내로

주입할 때 작업 소요시간에 주의를 기울여야 한다.

### 2.2 시멘트계열 그라우트

- (1) 순수 시멘트 그라우트는 수화 시멘트와 물의 혼합만으로 이루어진다.
- (2) 대수층 지하수의 유속이 큰 경우, 벤토나이트 그라우트는 씻겨 나갈 우려가 있다. 그러나 순수 시멘트 그라우트는 지하수 흐름에 의한 침식에도 매우 우수한 저항을 발휘한다.
- (3) 순수 시멘트 그라우트의 팽윤량을 증가시키고 밀도를 감소시킬 목적으로 벤토나이트나 모래 등을 순수 시멘트 그라우트의 첨가제로 활용할 수 있다. 일반적으로 2%~8% 질량비율로 벤토나이트를 순수 시멘트 그라우트에 첨가하여 혼합 슬러리로 만든다.
- (4) 시멘트 그라우트 슬러리의 점도를 낮추기 위해 물을 과다하게 혼합하면 접착력이 감소하기 때문에 주의가 필요하다.

## 3. 평가 기준

### 3.1 순수 벤토나이트 그라우트

토양 열원 열펌프 시스템에 사용되는 순수 벤토나이트 그라우트는 표 1에 주어진 조건을 만족하여야 한다.

### 3.2 순수 시멘트 그라우트

토양 열원 열펌프 시스템에 사용되는 순수 시멘트 그라우트는 표 2에 주어진 조건을 만족하여야 한다.

### 3.3 벤토나이트/첨가제 그라우트

토양 열원 열펌프 시스템에 사용되는 벤토나이트/첨가제 그라우트는 표 3에 주어진 조건을 만족하여야 한다.

트/첨가제 그라우트는 표 3에 주어진 조건을 만족하여야 한다.

### 3.4 시멘트/첨가제 그라우트

토양 열원 열펌프 시스템에 사용되는 시멘트/첨가제 그라우트는 표 4에 주어진 조건을 만족하여야 한다.

<표 1> 순수 벤토나이트 그라우트(neat bentonite grouts)의 열·물리적 성질.

제조사	고체 벤토나이트 함량 (%)	물 (liter)	팽윤량 (liter)	그라우트중량 (kg/liter)	열전도계수 (W/mK)	투수도* (cm/sec)
Aquaguard	30.0	53.0	63.6	1.19	0.74	$1 \times 10^{-6}$
Aquagrout	22.7	75.7	87.8	1.14	0.74	$8 \times 10^{-8}$
Benseal/EZ Mud	15.3	124.9	138.5	1.07	0.66	$6 \times 10^{-8}$
BH Grout	30.0	53.0	63.6	1.19	0.78	$3 \times 10^{-8}$
Enviroplug	30.0	53.0	63.9	1.18	0.76	$1 \times 10^{-8}$
Groutwell	18.0	102.2	116.2	1.08	0.71	$1 \times 10^{-7}$
Puregold	30.0	53.0	63.9	1.18	0.76	$2 \times 10^{-8}$
Quick Grout	20.0	87.1	102.2	1.11	0.71	$3 \times 10^{-7}$
Volcay Grout	20.0	87.1	104.1	1.09	0.74	$1 \times 10^{-7}$

\* 80시간 경과 후 측정된 투수도.

<표 2> 순수 시멘트 그라우트의 물리적 성질.

시멘트 형식	물 대 시멘트 혼합비*(lb/lb)	혼합에 사용된 물의 양 (liter)	슬러리 산출량**(liter)	슬러리 중량*** (kg/liter)	열전도도, (W/m·K)
Type I, II, V	0.46~0.53	19.7~22.7	34.4~40.1	1.7~1.8	0.97
Type III	0.56~0.62	23.8~26.5	39.7~43.1	1.6~1.7	0.92
Type K	0.46~0.53	19.7~22.7	34.4~40.1	1.7~1.8	0.87

\* : 물의 질량(lb 또는 kg) 대 시멘트 질량(lb 또는 kg)

\*\* : 물과 수화 시멘트를 혼합하였을 때 산출되는 슬러리 양.

\*\*\* : 산출된 슬러리 1 liter 당 중량(무게).

<표 3> 벤토나이트/첨가제 그라우트의 열전도도.

Grouts without additives	k · Btu/h · ft · °F (W/m · K)	Thermally enhanced grouts	k · Btu/h · ft · °F (W/m · K)
20% Bentonite	0.42 (0.73)	20% Bentonite-	0.85 (1.47)
30% Bentonite	0.43 (0.74)	40% Quartzite	0.70~0.75 (1.21~1.30)
Cement mortar	0.40~0.45 (0.69~0.78)	30% Bentonite-	0.45 (0.78)
Concrete (50% quartz sand)	1.1~1.7 (1.90~2.94)	30% Iron ore	--

<표 4> 시멘트(type I)와 첨가제의 혼합.

첨가제	첨가제 혼합비 %	물/시멘트 혼합비 lb/lb	슬러리 산출량 liter(gal)	슬러리, 중량 kg/liter (lb/gal)	열전도계수 W/m · K (Btu/h · ft · °F)
	20	0.50	41.3 (10.9)	1.9 (16.1)	1.23 (0.71)
모래 (sand)	40	0.55	54.9 (14.5)	2.0 (16.7)	1.61 (0.93)
	60	0.60	78.3 (20.7)	2.2 (18.2)	1.92 (1.11)
	20	0.50	41.3 (10.9)	1.9 (16.1)	1.42 (0.82)
규사 (silica sand)	40	0.55	54.9 (14.5)	2.0 (16.7)	1.99 (1.15)
	60	0.60	78.3 (20.7)	2.2 (18.2)	2.67 (1.54)
	1.73 [3]	0.71	46.2 (12.2)	1.6 (13.4)	0.95 (0.55)
벤토나이트 (bentonite)	3.86 [8]	0.99	58.7 (15.5)	1.5 (12.6)	0.90 (0.52)
	6.12 [16]	1.46	79.5 (21.0)	1.4 (11.7)	0.80 (0.46)

[ ] : 시멘트에 대한 벤토나이트의 비율(%)

#### 4. 그라우팅 재료의 열·물리적 성질 검증

- (1) 수입 벤토나이트 그라우트인 경우 제조사가 정확한 혼합비율을 제공하고 있어 다행이지만, 이는 시공업체가 그 비율을 준수하여 시공할 때에만 의미가 있다.
- (2) 지중 열교환기 보어홀 그라우팅 재료로 사용되는 국산 벤토나이트 그라우트는 주로 토목용에 사용되던 것으로서 혼합비율에 대한 정확한 데이터가 없는 것도 우리의 실정이다. 따라서, 지중 열교환기 보어홀 그라우팅 재료에 대한 열·물리적 성질(유효 열전도도)을 검증하고, 이들 재료를 이용하여 지중 열교환기를 시공하는 것은 무엇보다 중요하다.
- (3) 지중 열교환기 시공에 사용하고자 하는 그라우팅 재료의 시편(sample)을 적절하게 만들어, 상용 열전도도 측정기를 이용하여 시편의 유효 열전도도를 측정한다.
- (4) 또한 측정 장치를 구성하여 시편의 유효 열전도도를 산정할 수 있다. 상용 열전도도 측

정기는 시편 내부에 공극(void)이 없으면서, 거의 고체에 가까운 시편의 열전도도를 측정하는 데 적용되며, 유효 열전도도 측정 장치는 모래와 물 혼합물과 같이 시편 내부에 공극과 물 성분이 있는 경우에 적용된다.

#### 5. 현장 열응답 시험을 통한 지중 루프 열교환기의 성능 검증

- (1) 실제 시공된 지중 열교환기 파이프 주위에 존재하는 그라우트/토양 혼합층의 유효 열전도도를 효과적으로 측정할 수 있는 방법이 현장 열응답 시험으로, 복합매질의 유효 열전도도를 산정하고, 지중 루프 열교환기의 성능을 검증하기 위한 방법으로 널리 적용되고 있다.
- (2) 열응답 시험은 그라우트의 종류나 현장의 지층구조, 지중 열교환기의 규모 등에 의해 영향을 받기 때문에 18시간에서 72시간의 범위 내에서 시험을 수행한다.
- (3) 그라우팅 작업을 실시한 후, 3일 이상의 기

일이 경과한 이후에 시험을 수행한다.

### 5.1 현장 열응답 시험 장치의 구성

- (1) 현장 열응답 시험 유닛과 시험용 지중 열교환기 및 일련의 배관 등으로 실험장치(그림 1)를 구성하여 지중 루프 열교환기의 성능을 현장에서 검증함과 동시에 열교환기 파이프 주위 토양의 유효 열전도도를 산정한다.
- (2) 시험용 지중 열교환기, 열원부, 순환부, 계측부로 시험장치를 구성한다. 열원부는 지중 열교환기 순환유체에 일정 열량을 가하는 전열기 및 수조로 구성되며, 순환부는 순환유체가 지중 열교환기와 열원부를 순환하면서 지중으로 열을 전달할 수 있도록 순환펌프 및 배관 등으로 구성된다. 순환유체 유량, 지중 열교환기 입·출구 온도, 전열기 전력 소모량 등을 측정하기 위한 각종 계측기와 데이터 획득장치 등으로 계측부가 구성된다.
- (3) 시험용 보어홀을 실제 시공하고자 하는 보어홀의 구경과 동일하게 시추한다. 이 때 천공 과정 중에 발생하는 토양이나 암반 잔재들을 수집하여 현장 토양의 종류 및 조성을 참고문헌과 비교한다.
- (4) 고밀도 폴리에틸렌 파이프를 열융착법을 이용하여 U자 관 형상으로 성형한 후, 보어홀

에 삽입한다.

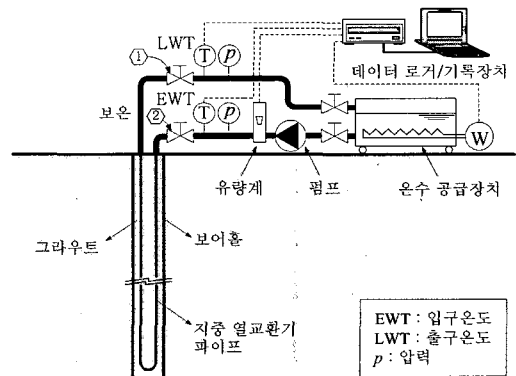
- (5) 다음으로 시험용 보어홀과 지중 열교환기 파이프 사이의 빈 공간을 실제 사용하고자 하는 그라우트를 이용하여 완전히 채운다. 이 때, 그라우팅 재료의 혼합비를 포함하여 그라우팅 방법 및 절차 등은 지중 열교환기 시공에 적용하고자 하는 것들과 동일해야 한다.
- (6) 대기 중에 노출되는 부분의 파이프는 단열재를 이용하여 열 손실을 최소화한다.

### 5.2 현장 열응답 시험 방법 및 절차

- (1) 먼저 지중 열교환기 파이프 내에 존재할 수 있는 공기 또는 불순물 등을 물을 고속으로 순환시켜 제거한다.
- (2) 순환유체의 초기온도를 측정하고, 전열기를 가동하여 순환유체에 열을 가하면서 온도, 유량, 전력량 등을 데이터 획득 시스템을 이용하여 1분 간격으로 측정한다.
- (3) 각 변수의 불확실도를 산정한 후, 계산 결과에 영향을 미치는 측정 데이터의 편차 등을 조합하여 시험결과의 상대 불확실도를 계산한다. 다음의 표 5는 현장 열응답 시험의 실험조건 및 이들 변수의 불확실도에 대한 일례를 보여주고 있다.
- (4) 지중 열교환기 입/출구 온도차, 측정 시간, 열

<표 5> 현장 열응답 시험에서 변수의 불확실도(예).

Parameters	Nominal values		Uncertainty
	Test borehole #1	Test borehole #2	
Entering water temperature(°C)	21.7	23.6	±0.3°C
Leaving water temperature(°C)	19.2	21.1	±0.3°C
Power input(W)	4515.1	4572.0	±3.0%
Water flow rate(l/min)	25.9	26.1	±3.5%



[그림 1] 현장 열응답 시험장치

- 입력량 등을 이용하여 온도와 시간(로그 값)에 대한 그래프를 작성하고, 이 그래프의 기울기를 구하여, 유효 열전도도를 계산한다.
- (5) 시험용 지중 열교환기에 대한 현장 열응답 시험절차를 자세히 기술하면 다음과 같다.
- 1) 깨끗한 물을 시험용 지중 열교환기 파이프 내로 순환시켜 파이프 내에 남아있을 수 있는 이물질과 공기 등을 배출시킨다. 이 때 플라싱 유닛을 **그림 1**의 밸브 ①과 밸브 ②에 연결하여 작업을 수행한다.
  - 2) 배출되는 물의 깨끗한 정도를 육안으로 확인한다. 파이프 내부 세정 중, 이물질 또는 공기가 배출되지 않으면 플라싱 유닛의 운전을 멈추고, **그림 1** 밸브 ①과 ②를 닫는다. 다음으로, 파이프 내 물의 온도가 지중 온도와 같아지도록 하루 정도 여유를 둔다.
  - 3) 현장 열응답 시험 유닛을 **그림 1**에서와 같이 시험용 지중 열교환기 파이프에 연결한다. 이 때, 열응답 시험과 관련된 모든 배관이 지상으로 노출되는 것을 최소화한다. 부득이하게 노출되는 배관 또는 밸브 및 연결구 등에 대해서는 보온에 주의를 기울인다.
  - 4) 밸브 ①과 밸브 ②를 개방한 후, 시험용 지중 열교환기 파이프와 열응답 시험장치 그리고 연결 배관 등의 내부에 물을 완전히 채운다. 지중 열교환기와 열응답 시험장치를 순환하는 물의 양이 부족한 경우, 물을 보충한다. 하지만, 일단 시험이 시작된 후에는 시험장치에 물을 보충해서는 안 된다. 또한 시스템의 압력은 대기압 수준에서 유지된다.
  - 5) 시험용 지중 열교환기 입·출구에서 물의 온도와 지중 토양의 온도가 동일해질 수 있도록, 열응답 시험장치에 부착된 순환펌프로 설계치와 동일한 유량을 유지시키며 약 30분 동안 물을 순환시킨다. 이 때, 측정 데이터 및 이들 데이터의 저장 등 시험장치의 정상 작동 여부를 확인한다.
  - 6) 지중 열교환기 입·출구에서의 물의 온도, 유량, 압력 등의 데이터를 모니터를 통해 확인하면서, 온수 공급장치에 장착된 전열기를 가동한다. 이 때, 그라우트/토양 혼합층의 예상되는 유효 열전도도에 따라 전열기에 공급되는 전력을 순차적으로 공급한다.
  - 7) 전열기 가동에 따른 지중 열교환기 입·출구에서 물의 온도 변화를 관측하면서, 열응답 시험장치에 누수가 있는지 또한 비정상적인 데이터가 모니터에 표시되는지 주의를 기울여 관측한다. 또한 전열기로의 전력공급이 차단되는 일이 없도록 주의를 기울인다.
  - 8) 시험 개시 후, 약 8~10시간이 경과하면 지중 열교환기 입·출구에서 물의 온도 차이는 거의 일정한 값을 갖는다.
  - 9) 지중 열교환기 입·출구에서 물의 온도 차이를 지속적으로 관찰하면서, 최소 24시간 이상 시험을 실시한다.
  - 10) 현장 열응답 시험이 종료된 후, 온수 공급장치의 전열기에 공급되는 전력을 차단한다. 지중의 온도가 시험 전의 온도로 회복될 수 있도록 최소 4시간 이상 물을 지속적으로 순환시킨다.
  - 11) 시험이 완료되면 순환펌프와 데이터 기록장치의 전원을 차단하고, 측정된 데이터를 별도의 디스켓에 저장한다.
  - 12) 현장 열응답 시험에서 측정된 데이터를 이용하여 시험용 지중 열교환기 파이프 주위 그라우트/토양 혼합층의 유효 열전도도를 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$\Delta T \approx \frac{Q}{4\pi k_s L} \ln t$$

여기서,

$\Delta T$ : 지중 열교환기 입·출구에서 물의 평균 온도(°C)

Q: 전열기에 공급되는 열량(W)

$k_s$ : 그라우트/토양 혼합층의 유효 열전도율 (W/m°C)

L : 시험용 지중 열교환기 보어홀의 깊이(m)  
 t : 열응답 시험 수행 시간(min)

열교환기 매설을 위한 보어홀 천공은 필연적으로 보어홀 주변의 토양에 영향을 주게 된다. 보어홀 천공을 위해 머드 로터리 드릴링 방법을 이용하는 경우 천공 과정에서 지중에 머드 유체를 분사하게 되므로 보어홀 벽면에 점토 층이 형성될 수 있다. 또한 공기 드릴링 방법을 이용하였다면 드릴에서 나오는 공기가 건조하거나 온도가 높기 때문에 지하 토양을 건조시킬 수 있다.

따라서 천공 전 최초 토양상태로 복귀할 수 있는 시간이 경과한 후 현장 열물성 실험을 수행해야 한다. 현장 열 물성 실험에서 발생할 수 있는 오차를 줄이기 위해서 일반적으로 다음의 사항을 준수해야 한다.

- 1) 지중 열교환기 파이프를 통한 열전달량은 시스템 적용 건물의 예상 최대 부하와 비슷한 값으로 하여 12~72 시간을 유지하여야

한다.

- 2) 보어홀 내(파이프 및 그라우트)의 열저항을 최소화한 상태에서 측정된 온도 상승이 지중의 열 물성에 의해 영향을 받도록 한다.
- 3) 시험 보어홀의 깊이는 실제 지중 열교환기 매설 깊이와 동일하게 한다.
- 4) 지중 열교환기 파이프 매설 후 24시간이 경과한 후에 시험을 시작하며 시멘트 그라우트인 경우 72 시간이 지난 후에 시험을 시작한다.
- 5) 시험 보어홀 천공 시 대량의 진흙이나 공기가 사용되었거나 혹은 열전도율이 매우 낮은 그라우트를 사용했을 경우 36~48 시간의 시험 시간을 고려한다.

## 후 기

본 연구사업은 에너지관리공단 신재생에너지센터의 지원하에 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 