

고효율 그라우팅

이 두 영
코텍엔지니어링(주)

1. 개요

근래 들어 설치 사례가 증가하고 있는 지열 열펌프 시스템(ground source heat pump systems)에서 수직형 지중 루프 열교환기는 수직으로 천공된 보어홀(borehole)과 U자 형상의 파이프 그리고 보어홀과 파이프 사이의 빈 공간을 채우는 그라우팅 재료(grouting material)등으로 구성된다. 보어홀 그라우팅 재료는 지중 열교환기 파이프 내의 순환수와 보어홀 주변 토양층(또는 암반층)간의 열전달을 촉진하고, 보어홀 주변의 지하수나 지표면 오염물질이 보어홀 내로 유입되는 것을 차단하기 때문에 그 역할이 매우 크다.

벤토나이트, 시멘트, 콘크리트, 모래 등 다양한 종류의 그라우팅 재료 중, 현재 국내·외에서 주로 사용되는 재료는 벤토나이트이다. 벤토나이트는 기본적으로 점토 광물이며, 지중 환경보호 측면에서 타 재료보다 우수한 것으로 알려져 있다. 하지만, 순수 벤토나이트(벤토나이트+물)는 보어홀 주변의 토양 또는 암반과 비교했을 때 상대적으로 낮은 열전도도를 갖는 것이 단점이다. 따라서 이러한 단점을 극복하기 위해 순수 벤토나이트에 각종 첨가제를 혼합하여 사용하기도 한다.

열전도도가 향상된 그라우팅 재료를 사용할 경우, 지중 루프 열교환기의 열전달 성능이 향상된다. 이는 파이프 길이 및 보어홀 천공 깊이 등의 감소를 유도하여 시스템 초기 설치비의 절감을 가능하게 할 것이다.

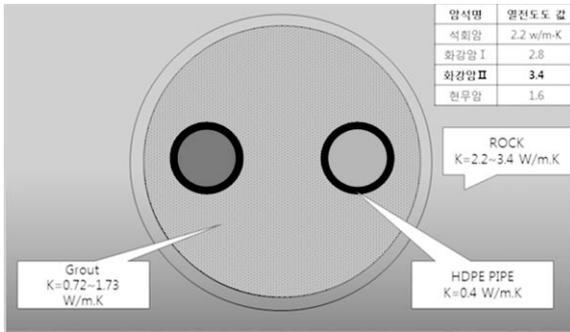
이번 논고에서는 지열 냉난방 시스템에서 이러한 중요한 역할을 하는 고효율 그라우팅에 관하여 알아보도록 하겠다.

2. 본론

2.1 Borehole 구조

일반적으로 수직 천공된 보어홀에는 PE재질로 된 U자 형상의 지중열교환기와 토양 혹은 암반층 사이에 빈 공간을 채우는 그라우팅 재료로 구성된다. 실제로 지열을 이용한 시스템은 지중열교환기 내부의 물과 토양 혹은 암반층과의 열전달을 이용한 방법이다. 따라서 이 둘 사이에 있는 PE재질의 지중열교환기와 벤토나이트의 열전도도는 지열 냉난방 시스템에서 가장 중요한 부분이고 개선되어야 할 사항이다.

하지만 작동유체인 물과 지중열교환기인 PE



[그림1] Bore Hole 구조

Pipe, 천공부지에 있는 토양층과 암반층의 열전도도를 변화시키는 것은 불가능하며 시공에 앞서 유일하게 변화를 줄 수 있는 것이 벤토나이트 뿐이므로 고효율 그라우팅은 지열시스템의 성능을 좌우하는데 가장 큰 역할을 할 수 있으며 벤토나이트의 열전도도를 높이는 연구가 활발하게 진행되고 있다.

일반적으로 특수한 환경의 지층이 아닌 이상 지중 암반은 석회암, 화강암, 현무암으로 구성되며 보통 1.6~3.4 W/m · K의 열전도도를 가진다.

또한 그라우팅에 쓰이는 벤토나이트는 시공을 했을 때 0.72~1.73 W/m · K의 열전도도를 갖는 것으로 알려져 있다. 하지만 1.73 W/m · K의 열전도도를 갖는 그라우팅의 경우 시공상에 많은 어려움으로 인하여 대부분의 업체에서는 사용하지 못하고 있다. 이와 관련된 내용은 2.4절에서 언급하도록 하겠다.

기술적으로 그라우트의 열전도도가 왜 중요한가에 대해서는 천공 길이에 따른 열전달량을 계산하는 방법으로 설명 할 수 있다.

$$\frac{q}{L} = \frac{(T_{loop} - T_{soil})}{R_{total}} \quad (1)$$

q/L = 각 시추공 길이당 열전달 (Btu/hr ft)

T_{loop} = 순환 설계 온도 (°F)

T_{soil} = 자연상태 토양 온도 (°F)

R_{total} = 총 열전도 저항 값 (hr ft °F/Btu)

$$R_{total} = R_{pipe} + R_{grout} + R_{soil} \quad (2)$$

R_{total} = 총 저항 값

R_{soil} = 토양 저항 값

R_{grout} = 그라우트 저항 값

$R_{pipe} = 0.096 \text{ hr ft } ^\circ\text{F/Btu}$, 순환수의 저항 값을 포함한 u-bend의 저항 값 (난류를 포함한 물로 가정)

$$R_{grout} = \frac{\ln(D_{bore}/\sqrt{2}D_{po})}{2\pi k_{grout}} \quad (3)$$

D_{bore} = 시추공의 지름 (in)

R_{grout} = 그라우트 저항 값 (hr ft °F/Btu)

D_{po} = u-bend 파이프 외부 지름 (in)

k_{grout} = 그라우트 열전도도 (Btu/hr ft °F)

$$R_{soil} = \frac{\ln(D_{soil}/D_{bore})}{2\pi k_{soil}} \quad (4)$$

D_{bore} = 시추공의 지름 (in)

D_{soil} = 자연상태 토양의 지름 (in)

k_{soil} = 토양 열전도도 (Btu/hr ft °F)

R_{soil} = 토양 저항 값 (hr ft °F/Btu)

위의 식에서 알 수 있듯이 그라우트 저항 값이 시공을 하기에 앞서 조절 할 수 있는 유일한 부분이다.

2.2 그라우팅의 특성 비교

고효율 그라우팅과 일반 그라우팅의 가장 큰 차이점은 실리카샌드를 배합하는가 혹은 그렇지 않은가에 있다. 일반적으로 실리카샌드의 함유량이 많으면 많을수록 그라우팅의 열전도도는 상승한다고 알려져 있다. 하지만 실리카샌드의 함유량을 무한정 높이기에는 시공상의 문제점을 안고 있기 때문에 시공이 가능하게 하면서 실리카샌드의 함유량을 높이는 것은 각 지열업체의 기술의 척도이기도 하다. 일반 그라우팅에도 실리카샌드를 혼

<표 1> 일반그라우팅과 고효율 그라우팅의 조성 비교

구분	혼합비 (벤토나이트:실리카샌드:물)	열전도도 (W/m·k)	천공길이 (%)
일반그라우팅	1:0:4	0.73	100
고효율그라우팅	1:5:3	1.73	70

합하여 시공 할 수 있지만 여기서는 실리카샌드가 혼합되지 않은 일반 그라우팅과 고효율 그라우팅을 비교 하도록 하겠다.

표 1에서 알 수 있듯이 고효율 그라우팅의 경우 실리카샌드는 벤토나이트의 5배가 혼합된다. 이는 그라우팅의 열전도도를 상승시키며 일반그라우팅으로 시공했을 때보다 최대 30%의 천공길이 절감 효과를 볼 수 있었다.

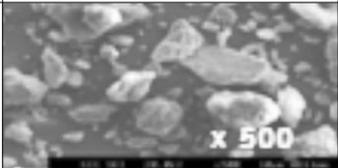
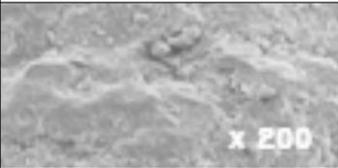
표 2는 고효율 벤토나이트와 일반 벤토나이트의 특성을 비교한 표이다. 입자형상은 각각 분말과

과립형태로 이루어져 있으며 벤토나이트 자체의 열전도도는 고효율 벤토나이트가 0.04 W/m·k 더 높은 것으로 나타났다. 이중 눈여겨 보아야 할 점은 팽윤도이다. 고효율 벤토나이트의 경우 일반 벤토나이트보다 팽윤도가 더 낮게 나타났다. 지열에 이용하는 벤토나이트는 팽윤도가 높을수록 지중열교환기의 파손을 불러일으킬 수 있기 때문이다. 고효율 벤토나이트의 팽윤도는 충분한 팽윤도를 지니고 있으므로 열교환기에 파손을 불러일으킬 소지가 있는 일반 벤토나이트의 팽윤도보다 더욱 유리한 조건에 있다고 볼 수 있다.

2.3 그라우팅의 경제성 비교

그라우트의 열전도도가 올라감에 따라 같은 양의 열을 전달하기 위해 필요한 시추공의 길이가 줄어든다는 것은 표 1에서 확인결과 알 수 있었

<표 2> 벤토나이트 비교

구분	고효율 벤토나이트	일반 벤토나이트	
입자형상	분말	과립	
확대형상			
열전도도 (W/m·k)	0.78	0.74	
투수계수 (cm/sec)	0.69 x 10 ⁻⁷	1.0 x 10 ⁻⁷	
입도	10.6	959.3	
화학조성	SiO ₂	66.35	61.62
	AlO ₂	15.33	14.68
	CaO	2.93	3.87
	Na ₂ O	2.93	3.72
	MgO	1.45	2.61
	Fe ₂ O ₂	3.54	5.02
	K ₂ O	0.24	1.02
	TiO ₂	0.54	0.69
P ₂ O ₃	< 0.1	0.23	
팽윤도 (cm/2g)	13.8	21.0	

다. 하지만 더욱 흥미롭게도 열전도도가 높아질수록 필요한 시추공의 감소치가 점점 줄어든다.

그라우팅의 열전도도가 선형적으로 동일한 양만큼 증가하고는 있지 않지만 천공깊이에 따른 감소량의 폭이 확연하게 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이러한 점은 그라우팅의 열전도도를 늘리기 위해 비용과 시공의 어려움을 비교해야 한다는 점을 의미한다.

예를 들어 그라우팅 열전도도가 0.98 W/m·k에서 1.20 W/m·k로 변화시킬 때 천공깊이가

396 m가 감소하지만 1.52 W/m·k에서 1.73 W/m·k로 변화시킬 때 천공깊이는 177 m밖에 감소하지 않는다. 하지만 사용되는 실리카샌드의 양은 표 4에서 알 수 있듯이 3배 가까이 더 소비되는 것을 알 수 있다. 이것은 흔히 “수익감소의 법칙”이라고 불리우는데 어떤 열전도도 값의 그라우트가 프로젝트에 맞는가를 정하는데 매우 중요한 요인이 된다.

표 5는 당사에서 진행한 프로젝트를 정리한 표이다. 일반 그라우팅과 고효율 그라우팅으로 시공

<표 3> 벤토나이트 비교(그라우트 1ton 당)

그라우팅 열전도도 (W/m·k)	천공 깊이 (m)	감소량 (m)
0.70	8507	-
0.98	7544	963
1.20	7148	396
1.36	6913	235
1.52	6745	168
1.73	6568	177
1.85	6483	85
1.97	6410	73
2.07	6352	58
2.42	6200	152
2.76	6084	116

<표 4> 고효율 그라우팅 조성비

그라우팅 열전도도 (W/m·k)	벤토나이트 (kg)	실리카샌드 (kg)	물 (kg)	부피 (gal)	밀도 (lb/gal)	고형율 (%) by weight
0.78	22.67	0	53.0	17.0	9.81	30.0
0.98	22.67	22.7	54.9	19.6	11.27	45.3
1.20	22.67	45.4	58.7	23.0	12.14	53.7
1.36	22.67	68.0	62.5	26.2	12.89	59.2
1.52	22.67	90.7	66.2	29.3	13.51	63.1
1.73	22.67	113.4	70.0	32.6	13.94	66.0

<표 5> 그라우트 경제성 비교

구분		프로젝트1	프로젝트2	프로젝트3	비고	
일반	그라우트	k-Vlaue	1.16	0.76	0.95	W/m · k
		조성비	-	20 : 0 : 80	20 : 15 : 65	
	총 천공길이 (m)	110,000	36,000	40,000		
	천공수량 (hole)	500	180	200		
	단위천공길이 (m/hole)	220	200	200		
	옥외공사비 (억 원)	32.2	9.45	10.56		
고효율	그라우트	k-Vlaue			1.73	
		조성비			11 : 55 : 34	
	총 천공길이 (m)	96,600	26,000	31,400		
	단위천공길이 (m/hole)	193	145	157	천공수 동일 조건	
	옥외공사비 (억 원)	28.3	7.8	8.24		
천공 감소	1공당 (m)	27.0	55.0	43.0		
	비율 (%)	12.3	27.5	21.5		
천공 절감액 (억 원)		3.9	1.6	2.3		
공사비 절감률	옥외	12.1	17.4	22.0	%	

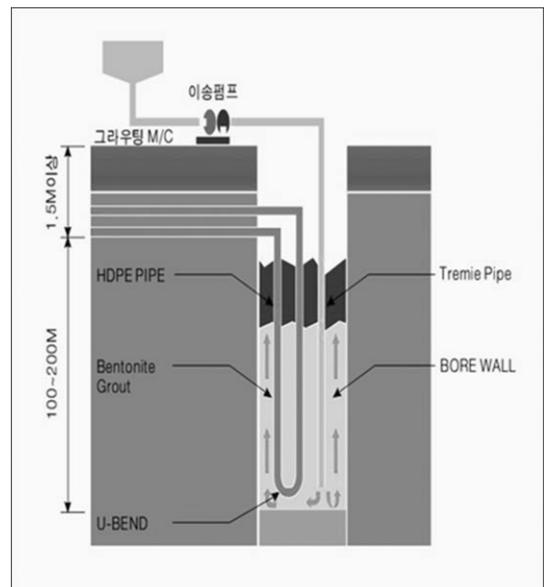
을 했을 때 필요한 천공 길이와 시공비 절감 효과를 볼 수 있다. 프로젝트1의 경우 일반 그라우팅으로 시공했을 때 필요한 천공수와 동일조건으로 정리하면 천공길이는 220 m에서 193 m로 감소하였다. 이는 옥외공사비를 12.1% 절감한 효과이다. 마찬가지로 프로젝트 3의 경우 천공길이는 200 m에서 157 m로 감소하였다. 공사비 절감률은 22%에 이르는 것으로 확인 되었다.

위에서 살펴보았듯이 적절한 열전도도를 갖는 그라우팅을 선정 하는 것은 무척 중요하다. 무조건 높은 열전도도를 갖는 그라우트를 선택하는 것은 경제성이나 시공성에 부적절하며, 잘 선택된 그라우트는 표 5에서 알 수 있듯이 큰 공사비 절감률을 얻을 수 있기 때문이다.

2.4 시공방법

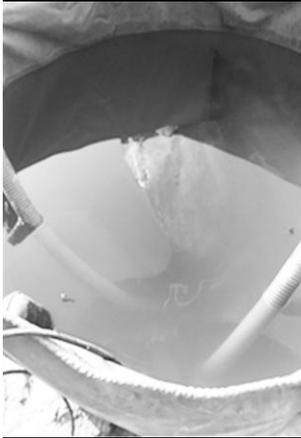
적절한 고효율의 그라우팅을 하는 것은 중요하지만 시공하는데 큰 어려움이 따른다. 기본적으로 당사는 열전도도 대비 가장 효율적인 1.73 W/m ·

K의 열전도도를 갖는 그라우트로 시공을 한다. 하지만 당사 또한 처음 시공을 할 때 무수한 시행착오를 겪으며 노하우를 축적하였다. 이 절에서는



[그림2] 그라우팅 시공 계략도

<표 5> 그라우트 시공과정



수질확인 및 계량



실리카샌드 준비



벤토나이트 운반 및 적지



벤토나이트+실리카샌드 투입



믹싱 개시



펌핑개시

고효율 그라우팅을 하는데 있어 간단한 시공방법에 대하여 알아보겠다.

- ① 가장 먼저 그라우팅 머신의 혼합믹서에 필요한 물의 양 만큼 채워 넣는다. 물의 양은 벤토나이트 제조사의 혼합표를 참조 한다.
- ② 믹서를 가동시키고 벤토나이트 1포를 투입한 후 1분간 혼합믹서를 가동한다.
- ③ 실리카샌드 필요량을 1~2분간 천천히 투입한다.
- ④ 실리카샌드를 모두 투입하고 추가로 1~2분간 믹서를 가동한다.

(유동화재 없이 최대 30분간 펌핑 가능)

여기서 주의할 점은 펌핑에 사용되는 펌프는 양압추출형 펌프를 사용해야 한다. 또한 트레미 파이프는 1¼ inch를 사용해야하며 펌핑유량은 5~15 갤런/분으로 조절해야 한다. 적정량 이상의 물을 투입하면 펌핑하기 어려워지므로 주의를 기울여야 하며 투입하는 물은 10~27℃의 수온을 지니고 있는 것이 좋다.

3. 결론

본 논고에서는 지열 냉난방 시스템의 시공 중 가장 중요한 요소라고 할 수 있는 그라우팅에 관하여 알아보았다. 고효율 그라우팅을 함으로써 지중 열교환기와의 열전달을 향상시켜 천공길이를 줄이고, 결과적으로 작업시간과 천공 홀 당 그라우트의 체적을 줄여주는 것을 알 수 있었다. 이로 인해 인건비와 자재비에 드는 비용 또한 줄이는 효과를 갖게 시간과 비용 모두 절약할 수 있었다.

현재 대한민국은 RHO(신재생에너지 공급의무화)제도의 도입을 앞두고 있다. RHO제도가 도입되면 보다 많은 건축물에서 지열을 이용한 냉난방을 도입할 것이 확실 시 된다. 하지만 우리나라는 다른 나라와 달리 땅의 여유가 충분하지 않다. 좁은 땅에서 건축물의 냉난방 부하를 최대한 담당 할 수 있는 방법은 고효율 그라우팅이 유일하다고 생각하며 지열냉난방 산업의 방향 또한 고효율 그라우팅으로 나가야 한다. 