

지열히트펌프 시스템 설치사례

강한기 기술영업이사
/ (주)이앤에시시스템

일반원고

1. 머리글

2003년까지만 해도 신재생에너지의 경우 높은 초기투자비에 비해 활용도와 신뢰성 저하로 인하여 크게 보급되지 못하고, 연구소 등에서 시범적용사업의 일환으로 설치되어 운영되고 있었다. 하지만 2004년부터 국제 유가 상승으로 인하여 에너지 수입액이 증가하고, 에너지수급에 문제가 발생되면서, 정부에서는 에너지절약차원에서 신재생에너지 설비의 보급을 증대시키기 위해 여러 가지 지원방안을 마련하기 시작했다. 그 중에서 신재생에너지 설비 보급에 가장 큰 기여를 한 정책이 공공의무화 사업이다. 공공의무화 사업은 공공기관에서 신축건물을 지을 경우 총 건축공사비의 5% 이상을 신재생에너지 설비를 필수적으로 설치하도록 하는 법안이다. 이러한 정부의 지원을 기반으로 2004년부터 신재생에너지 설비, 그 중에서도 지열히트펌프의 보급이 크게 증대되기 시작했다.

신재생에너지인 지열은 히트펌프를 사용하여 건 축물의 냉·난방뿐만 아니라 급탕 등에도 적용이 가능하다는 것과 태양열 및 풍력 등은 기후 및 지역조건에 따라 열원 연속성이 없기 때문에 보조 열원으로 사용되지만, 지열의 경우 항상 일정한 온도를 유지하는 특성 때문에 열원생산에 연속성을 가지고 있다는 점이 신재생에너지 설비 중 가장 큰 주목을 받고 있는 이유이다.

2003년까지는 높은 초기투자비 및 넓은 대지면적이 필요하다는 것 때문에 소용량을 위주로 학교 및 숙박시설 등에 설치되었으나, 공공의무화

사업이 진행되면서 지열히트펌프에 대한 인식이 향상되어, 현재는 공공기관뿐만 아니라 민간에도 보급도 증가되고 있는 상황이다.

지열히트펌프는 화석연료를 사용하지 않아 지구 온난화 물질인 CO₂ 배출량이 매우 적으며, 계절에 관계없이 항상 일정한 온도를 유지하는 지열을 열원으로 사용하기 때문에 히트펌프 효율이 우수하여 운전비가 저렴한 특징을 가지고 있다. 하지만 아직까지도 타 냉방시스템보다는 초기투자비가 높고, 지중열교환기 설치면적이 넓어 건물에 적용하는데 어려움이 있다.

이와 같은 지열시스템의 단점을 보완하기 위해 본사에서는 물의 현열을 이용하는 수축열시스템과 결합시킨 축열식 지열히트펌프시스템을 개발하였다. 축열식 지열히트펌프시스템은 담당부하 중 50%정도를 축열조가 담당하기 때문에 히트펌프 용량 및 지중열교환기 설치면적을 줄일 수 있어, 초기투자비를 낮출 수 있으며, 심야전력을 이용하여 기존의 지열시스템 운전비를 60% 이상 감소할 수 있는 시스템이다.

이에 본고에서는 축열식 지열히트펌프 시스템 설치사례를 중심으로 지중열교환기 방식 중 우물 관정형 공사방식 및 실제 축열식 지열히트펌프 성능이 어느 정도인지를 운전 data를 이용하여 살펴보았다.

2. 축열식 지열히트펌프 설치사례

2.1 건물 개요

본 고에서 축열식 지열히트펌프 시스템의 성능

을 확인하고자 김포에 있는 공장에 시스템을 설치하고 냉난방 운전을 통해 data를 확보하였다. 시스템이 설치되는 공장의 건물개요는 다음과 같다.

- 1) 건물면적 : 300평(지상 1층, 2개동)
- 2) 건물용도 : 공장(플라스틱 제품 생산)
- 3) 냉방부하 : 24 USRt
- 4) 냉·난방시간 : 09:00 ~ 19:00(10시간)
- 5) 축냉시간 : 22:00 ~ 08:00(10시간)
 - 축열식 지열히트펌프시스템만으로 건물의 냉·난방을 수행

2.2 시스템 개요

공장에 설치된 축열식 지열히트펌프의 경우 이중열교환 방식 중 지하수를 직접 이용하는 방식인 우물관정형(SCW, Standing Column Well)을 시공하였다. 김포공장에 설치된 축열식 지열히트펌프 재원을 표 1에 나타내었다.

본 시스템의 경우 산업용 전력이 공급되는 공장에 설치되는 관계로 주간에 발생하는 냉·난방부하를 심야에 전부 축열하는 방식인 전축열 방식을 채택하였으며, 이에 따라 히트펌프 용량이 냉방부하와 동일하게 선정되었다.

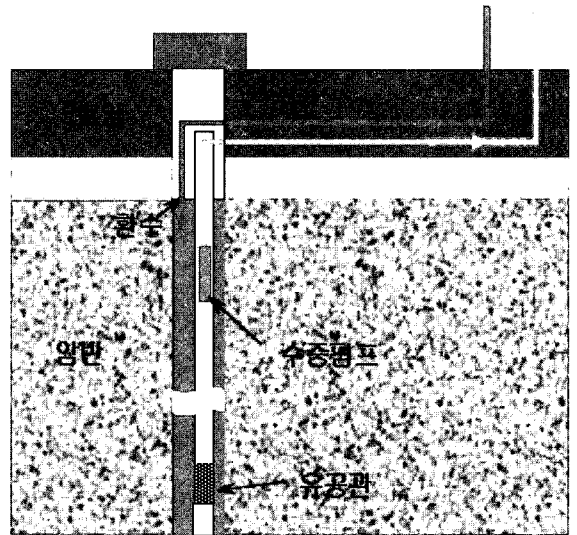
지중열교환기 방식에는 여러 가지 방식이 있는데 본 시스템의 경우에는 개방형인 우물관정형 방식을 채택하였다. 우물관정형은 하나의 관정에서 20~40 RT 정도의 용량을 낼 수 있어, 타 방식인 수직형 및 수평형보다 천공 수 및 설치면적을

줄일 수 있으며, 년중 온도가 일정한 지하수(15~20℃)를 이용하기 때문에 히트펌프 COP가 우수한 특징을 가지고 있다.

본 시스템에서 설치한 우물관정형의 재원은 다음과 같으며, 그림 1에 개략도를 나타내었다.

- 1) 천공수: 1공
- 2) 천공깊이 : 370 m
- 3) 관경지름 : 250 mm
- 4) 지하수 수위(정적수위) : 8 m

그림을 살펴보면 열교환을 거친 후 관정으로 주입되는 환수와 섞이지 않도록 관정내부에 트레일 파이프를 설치하였으며, 수중펌프는 트레일 파이



[그림 1] 우물관정형 개략도

<표 1> 시스템 재원

장비	형식	용량		수량	소비전력(kW)		
		냉방	난방		냉방	난방	
히트펌프	수냉식	24 USRt	90 Mcal/h	1	20.5	26.5	
축열조	PDF 원형	240 USRt		1	-		
2차 열교환기	판형	31 USRt		1	-		
지하수 순환펌프	심정	5 hp		1	4.7		
2차 순환펌프	인라인	3 hp		2	5.6		
축·방냉펌프	인라인	3 hp		2	5.6		
합 계						36.4	42.4

프 내에 설치하였다.

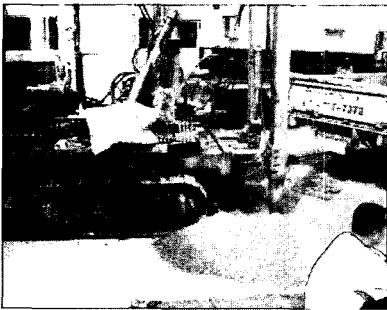
트레일 파이프 하단에 유공관을 설치하여 히트 펌프에 공급되는 지하수는 항상 지중과 열교환을 거친 지하수를 뽑아 올릴 수 있도록 하였다.

토사 및 풍화층 붕괴를 막기 위해 외부케이싱이 설치되었으며, 케이싱외부에는 그라우팅을 하여 외부케이싱을 고정하고 오염된 건수가 관정으로 유입되는 것을 방지하였다.

2.3 시스템 설치공사

본 현장의 경우 기계실이 별도로 설치되어 있지 않아, 최소한의 공간을 이용하여 축열식 지열히트 펌프시스템을 설치하였다. 천공공사 및 장비설치 공사, 축열조공사 과정은 사진을 이용하여 나타내었다.

- ① 천공공사(그림 2)
- ② 기계실 배관공사(그림 3)



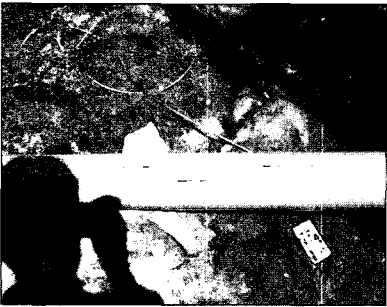
a) 토사층 천공



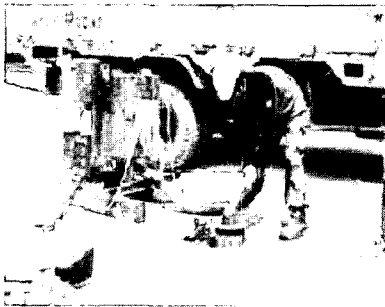
b) 토사층 천공완료



c) 암반층 천공 및 에어써징



d) 트레일 파이프 설치

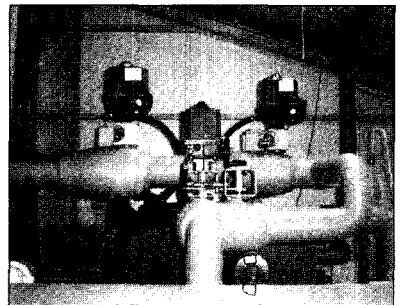
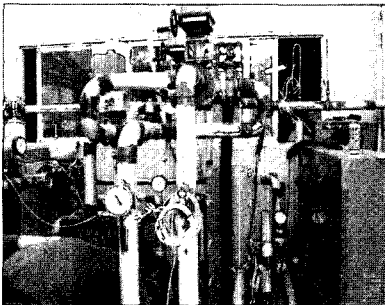
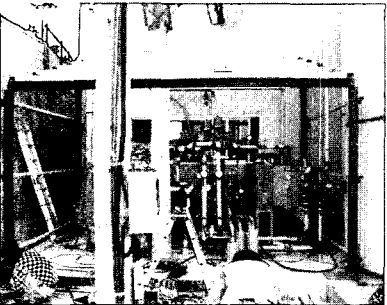


e) 그라우팅 작업



f) 맨홀 설치

[그림 2] 천공공사



[그림 3] 기계실 배관공사

③ 축열조 설치공사(그림 4)

2.4 시스템 동작원리

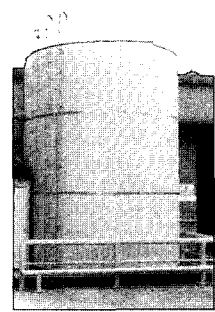
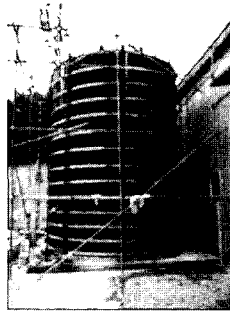
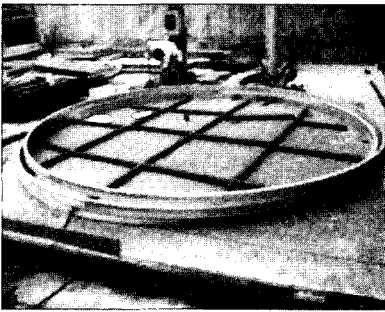
① 냉방모드

냉방운전모드에서는 심야시간대에 축열조의 물을 냉각시켜 축열조 내부의 물의 온도를 4℃까지 낮추어 저장한 후, 주간에 축열조의 냉수를 부하측으로 순환시켜 냉방에 사용하며, 냉동기 운전시의 응축기 냉각열원으로 지열원을 사용한다. 그림

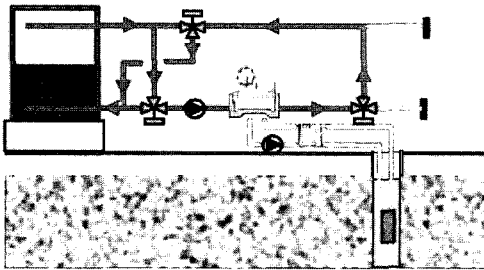
5의 경우에는 냉방운전 모드에서의 냉수 흐름을 보여 주고 있다. 축냉모드의 경우에는 상부에 있는 14℃물을 히트펌프로 보내 4℃의 냉수를 만들고 이를 축열조 하부에 저장하게 되며, 방냉모드에서는 축열조 하부의 4℃냉수를 부하측에 보내 냉방을 수행하게 된다.

② 난방모드

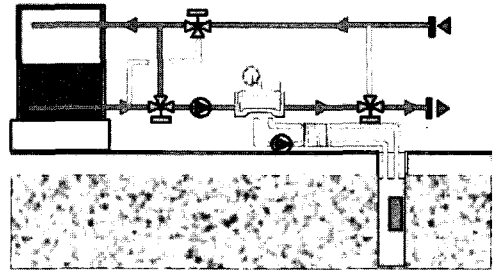
난방운전모드에서는 심야시간대에 축열조의 물



[그림 4] 축열조 설치공사

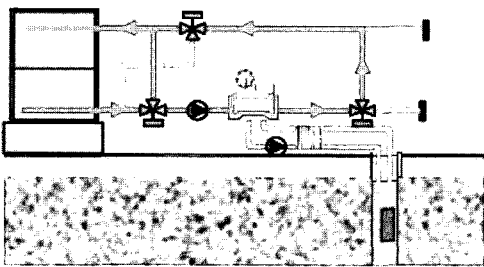


a) 축열모드

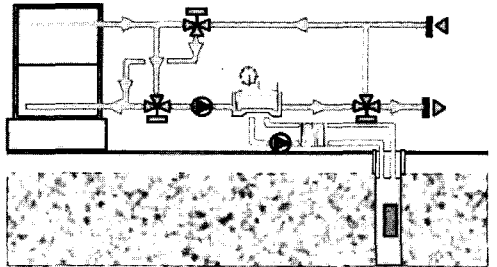


b) 방열모드

[그림 5] 냉방운전

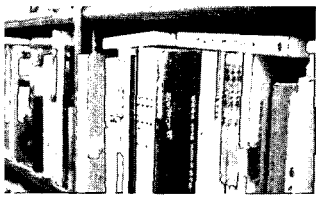


a) 축열모드



b) 방열모드

[그림 6] 난방운전



일반원고

을 가열시켜 축열조 내부의 물의 온도를 50℃ 정도로 높여 온수를 저장한 후, 주간에 축열조의 온수를 부하측으로 순환시켜 난방에 사용하며, 냉동기 운전시 증발기 가열열원으로 지열원을 사용한다. 그림 6의 경우에는 난방운전 모드에서의 온수 흐름을 보여 주고 있다. 축열모드의 경우에는 하부에 있는 40℃ 물을 히트펌프로 보내 50℃의 온수를 만들고 이를 축열조 상부에 저장하게 되며, 난방모드에서는 축열조 상부의 50℃ 온수를 부하측에 보내 난방을 수행하게 된다.

<표 2> 센서류 재원

센서종류(용도)	Signal	정밀도	비고
RTD(온도)	저항	±0.2℃	2-Pole RTD
정전용량식(습도)	mA	±2.0%	
Ultr. F/M(유량)	mA	±1.0%	1000.0, 1~5V
Watt T/D(전력량)	mA	±1.0%	138.18, 1~5V
P/T(압력)	dc-V	±0.5%	0~35, 1~5V

4.4 축열식 지열히트펌프시스템 성능분석

시스템 설치 후 냉난방 운전을 통해 획득한 data를 이용하여 성능분석을 수행하였다. data 분석에 사용된 장치는 표 2에 나타낸 것과 같다.

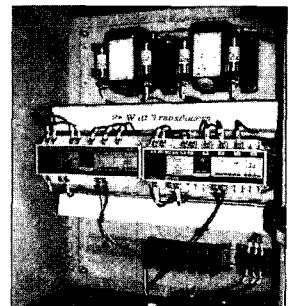
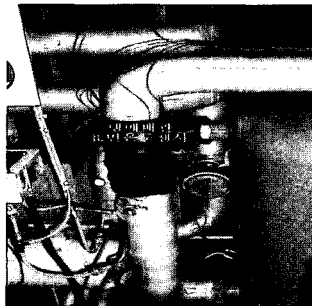
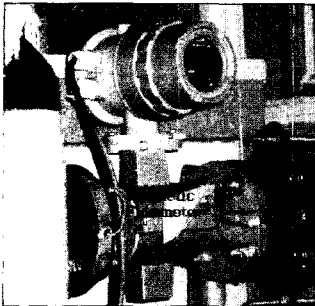
본 실험에 사용된 센서류의 경우에는 실험오차를 줄이기 위해 검교정을 실시한 후 시스템에 설치하였으며, data 측정에 사용된 기기로는 일본 YOKOGAWA의 DA100(120ch)을 사용하였다.

그림 7는 실험에 사용된 센서류 설치 모습을 보여주고 있다.

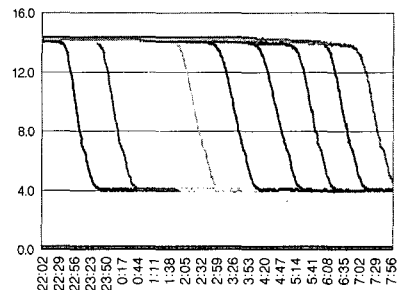
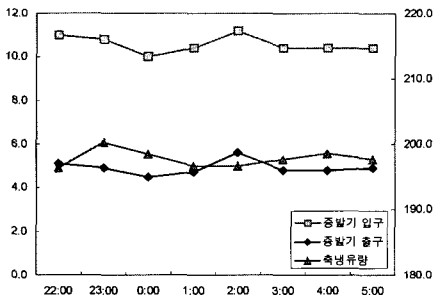
① 냉방실험

축냉시 히트펌프 능력 및 축열조의 축냉능력, 방냉시 냉방능력을 확인하기 위해 축냉과정은 10시간 이내로 히트펌프를 운전하며, 방냉과정은 축열조에 저장된 냉수를 부하측(Fan Coil Unit)으로 보내 실험을 수행하였다. 시험에서의 data 측정간격은 1분 간격으로 하였다.

그림 8는 축냉시 히트펌프 입출구 및 축열조내



[그림 7] 온도센서(히트펌프) 및 전력량계 설치 모습



[그림 8] 히트펌프 입출구 및 축열조 온도변화(축냉시)

온도변화를 보여주고 있다. 그림 8를 살펴보면 축열조 하부부터 4℃의 냉수가 저장되어 점차적으로 상부까지 4℃가 되는 것을 보여주고 있다. 14℃에서 4℃로 떨어지는 기울기가 급격할수록 온도경계층이 작게 형성되는 것이며, 온도경계층이 작을수록 축열조를 효율적으로 사용할 수 있다는 것을 의미한다.

표 3은 냉방운전을 통해 획득한 data를 이용하여 시스템 효율 및 히트펌프 COP를 계산한 결과를 나타내었다.

실험결과를 살펴보면 축냉 시작시에는 히트펌프 효율이 5.4℃이상이 되는 것을 확인할 수 있으며, 축냉 말기에는 효율이 약간 저하되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 히트펌프의 연속적인 사용으로 관정내의 지하수 온도가 약간 상승하여 응축

기 냉매온도가 상승했고, 이에 따라 히트펌프 소비전력이 증가했기 때문이다. 하지만 지하수 온도 상승으로 인한 히트펌프 COP가 약간 저하된다고 하더라도 공기열원을 사용하는 히트펌프(COP : 3.0)보다 효율이 훨씬 우수한 것으로 나타났다.

실험결과를 토대로 우물관정형 축열식 지열히트펌프시스템의 냉방 COP는 약 4.8 이상이 되는 것을 확인할 수 있었다.

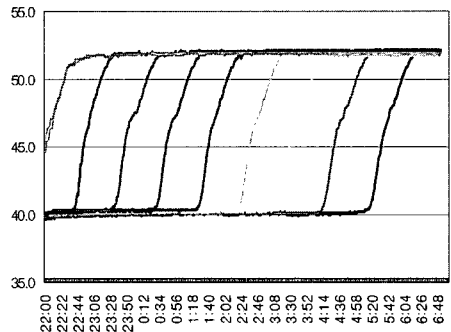
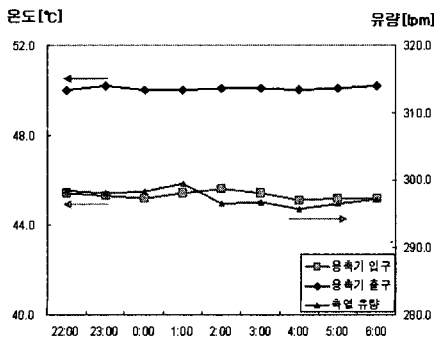
② 난방실험

난방실험도 냉방실험과 동일한 조건으로 수행하였으며, 그 결과는 그림 9와 표 4에 나타내었다.

그림 9을 살펴보면 냉방과는 반대로 축열조 상부부터 50℃ 이상으로 저장되는 것을 보여주고 있으며, 난방시에도 축열조 성층이 잘 이루어지면

<표 3> 축냉운전 data

시간	증발기 입구온도(℃)	증발기 출구온도(℃)	축냉열량(kcal/h)	축냉유량(lpm)	시스템 소비전력(kW)	히트펌프 소비전력(kW)	시스템 효율	히트펌프 효율
22:00	11.0	5.1	69,490.2	196.3	24.9	14.8	3.25	5.47
23:00	10.8	4.9	70,906.2	200.3	25.1	15.1	3.28	5.48
0:00	10.0	4.5	65,505.0	198.5	24.8	14.7	3.07	5.17
1:00	10.4	4.7	67,237.2	196.6	25.8	15.7	3.03	4.98
2:00	11.2	5.6	66,057.6	196.6	25.7	15.6	2.99	4.91
3:00	10.4	4.8	66,393.6	197.6	26.1	16.0	2.96	4.84
4:00	10.4	4.8	66,729.6	198.6	25.9	15.9	2.99	4.89
5:00	10.4	4.9	65,208.0	197.6	25.8	15.7	2.94	4.82



[그림 9] 히트펌프 입출구 및 축열조 온도변화(축열시)

서, 온수가 저장되고 있음을 확인할 수 있다.

난방실험에서도 지하수를 사용하는 축열식 지열 히트펌프의 시스템 효율 및 히트펌프 효율이 우수하다는 것을 확인할 수 있었다. 표 4를 살펴보면 난방시 히트펌프 평균 COP는 4.1로 공기열원의 경우에는 외기온도 -10°C 일 때 평균 히트펌프 COP가 1.5 이하임을 감안할 때 히트펌프 효율이 매우 우수하다는 것을 알 수 있으며, 축열식 지열히트펌프가 많은 양의 에너지 소모량(전력소모)을 절감할 수 있는 시스템으로 확인되었다.

실험결과 우물관정형 축열식 지열히트펌프시스템의 경우 시스템 및 히트펌프 COP가 타 히트펌프 시스템보다 높은 결과를 보이는 것을 나타냈다. 이는 년 중 일정한 온도를 유지하는 지열원(지하수)을 이용함으로써, 공기열원 또는 타 수열원을 사용하는 방식보다 높은 성능을 유지하는 것으로 확인되었다.

3. 수직형 지중열교환기 열용량 평가

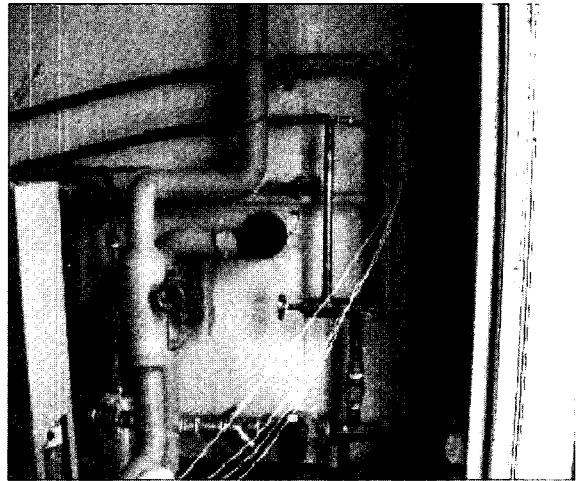
본 고에서는 우물관정형 지중열교환기뿐만 아니라 수직형 지중열교환기의 열용량 평가를 수행하였다. 수직형의 경우 30A PE파이프를 지중에 삽입한 후 그라우팅을 채운 형태의 지중열교환기로 본 고에서는 그라우팅 재질에 따라 지중열교환기

의 용량이 어떻게 변화되는지를 확인하고, 지중의 열전도율을 살펴보고자 한다.

3.1 실험방법

그라우팅 재질(벤토나이트, 모래)이 다른 두 개의 수직형 지중열교환기(깊이 : 150 m)를 설치한 후 일정시간동안 동일한 온도의 물을 지중열교환기로 흘려보내고, 입·출구 온도 및 유량을 측정하여 지중열교환기의 용량을 산출하였다.

또한 수직형 열교환기의 열전도계수는 Line Source Model을 이용하여 산출하였다.



[그림 10] 수직형 열용량 실험장치

<표 4> 축열운전 data

시간	응축기 입구($^{\circ}\text{C}$)	응축기 출구($^{\circ}\text{C}$)	축열 열량 (kcal/h)	축열 유량 (lpm)	시스템 소비전력(kW)	히트펌프 소비전력(kW)	시스템 효율	히트펌프 효율
22:00	45.4	50	82,358.4	298.4	34.5	23.7	2.8	4.0
23:00	45.3	50.2	87,641.4	298.1	35.2	23.3	2.9	4.4
0:00	45.2	50	85,910.4	298.3	33.7	22.9	3.0	4.4
1:00	45.4	50	82,662.0	299.5	34.2	23.2	2.8	4.1
2:00	45.6	50.1	80,055.0	296.5	33.9	23.0	2.7	4.0
3:00	45.4	50.1	83,697.6	296.8	35.3	24.4	2.8	4.0
4:00	45.1	50	86,935.8	295.7	36.1	25.2	2.8	4.0
5:00	45.2	50.1	87,171.0	296.5	35.8	24.9	2.8	4.1
6:00	45.2	50.2	89,130.0	297.1	35.9	25.0	2.9	4.1

$$\Delta T(r,t) = \frac{Q}{2\pi r} \int_0^\infty \frac{e^{-\beta z}}{r 2\pi k \beta} \alpha \beta \text{(Line Source Eq.)}$$

$\Delta T(r,t)$: 온도상승(°C)

r : 반경(m)

Q : 시추공 단위길이당 열유속(W/m)

k : 열전도계수(W/m°C)

α : 열확산계수(m²/sec)

β : 적분계수

Line Source Eq.을 이용하여 열전도계수를 산출하는 식을 도출하면 다음과 같다.

$$k(\text{실제열전계수}) = \frac{Q}{4\pi HS}$$

(H : 천공깊이, S : 온도곡선 기울기)

위 식을 이용하여 수직형 지중열교환기의 열전도계수를 구할 수 있으며, 열전도도를 구하기 위해 필요한 온도곡선 기울기의 경우에는 온도그래프를 로그 scale($T_f = S \ln(t) + m$)로 변환시켜 구한다.

수직형 지중열교환기 실험은 다음과 같은 순서로 진행하였다.

- ① 암반의 열확산 계수를 이용하여 실험시간 결정
- ② 실험시간 동안 각 지중열교환기 입출구 온도

및 유량을 측정(1분 간격)

③ 수직형 지중열교환기 열용량 계산

④ 온도 data를 이용하여 온도곡선 기울기(S)를 산출

⑤ Line Source Eq.을 이용하여 그라우팅 재질에 따른 열전도계수를 산출

3.2 실험결과

우선 수직형 지중열교환기의 용량을 산출하기 전 암반의 열확산계수를 이용하여 열응답측정 시간(최소)을 구하였다. 또한 측정된 온도그래프를 로그 scale로 변화시켜 각 지중열교환기의 온도기울기를 산출하였다.

① 암반의 열확산계수 : 1.32×10^{-6} m²/sec , 열응답 측정시간(최소) : 5.9 시간

② 온도기울기(S)

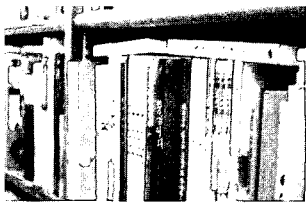
- 벤토나이트 : 1.59

- 모래 : 1.34

온도가 일정 물을 수직형 지중열교환기로 순환시켜 각 열교환기의 용량을 산출하고, 실제 열전도계수를 산출하였다. 측정data 및 열용량, 열전도계수를 산출한 결과를 표 5, 6에 나타내었다.

<표 5> 측정data 및 그라우팅 재질에 따른 지중열교환기 용량

시간	벤토나이트	벤토나이트	유량	지중열교환기용량		모래	모래	유량	지중열교환기 용량	
	입구온도	출구온도		입구온도	출구온도	kcal/h	USRt		kcal/h	USRt
	°C	°C	lpm	kcal/h	USRt	°C	°C	lpm	kcal/h	USRt
1	34.0	27.0	33.0	13860.0	4.6	33.9	25.6	33.0	16434.0	5.4
2	33.6	27.5	33.2	12151.2	4.0	33.5	26.2	33.0	14541.6	4.8
3	33.5	27.8	33.1	11320.2	3.7	33.4	26.5	33.1	13703.4	4.5
4	33.4	27.9	33.2	10956.0	3.6	33.3	26.7	33.0	13147.2	4.3
5	33.4	28.0	33.2	10756.8	3.6	33.3	26.9	33.1	12748.8	4.2
6	33.3	28.1	33.2	10358.4	3.4	33.2	27.0	32.9	12350.4	4.1
7	33.3	28.1	33.2	10358.4	3.4	33.2	27.0	33.0	12350.4	4.1
8	33.2	28.1	33.2	10159.2	3.4	33.1	27.1	33.0	11952.0	4.0
9	33.1	28.1	33.2	9960.0	3.3	33.1	27.1	33.1	11952.0	4.0
10	33.1	28.1	33.2	9960.0	3.3	33.0	27.1	33.1	11752.8	3.9



일반원고

〈표 6〉 그라우팅 재질에 따른 지중열교환기 열전도계수

시간	열전도율(kcal/hmK)	
	벤토나이트	모래
1	4.5	6.3
2	3.9	5.6
3	3.7	5.3
4	3.6	5.1
5	3.5	4.9
6	3.4	4.8
7	3.4	4.8
8	3.3	4.6
9	3.2	4.6
10	3.2	4.5

산출결과를 살펴보면 모래의 경우 열용량 및 열전도계수가 벤토나이트를 그라우팅으로 사용할 경우보다 우수한 결과를 나타내었다. 이는 모래의 경우 공극이 많아 지하수를 함유할 수 있기 때문에 열전도계수가 높아 히트펌프에서 발생하는 열량을 쉽게 제거할 수 있는 것으로 판단된다. 하지만 모래의 경우에는 대수층에 의해 유실의 위험이 있어 거의 사용되지 않고 있다.

수직형 그라우팅 재질로 많이 사용되는 벤토나이트를 사용한 경우 10시간이 지나도 3 USRt 이상을 유지하는 것으로 나타났다. 따라서 벤토나이트

혼합물을 그라우팅 재질로 사용할 경우 단위 길이당 수직형 지중열교환기의 용량은 0.02 USRt/m 정도가 되는 것을 확인할 수 있었다.

4. 맺음말

본고에서 살펴본 축열식 지열히트펌프의 냉난방 운전 수행결과와 수직형 지중열교환기 열용량 테스트 결과를 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 축열식 지열히트펌프의 경우에는 값싼 심야 전력을 사용함으로써 일반 전기를 사용하는 지열히트펌프시스템에 비해 약 50% 이상의 운전비용을 절감.
- 2) 년중 일정한 온도를 유지하는 지하수를 사용함으로써, 히트펌프 COP 및 전체 시스템 효율 역시 우수한 값을 갖는 것을 확인함.(냉방 : 4.8, 난방 : 4.1 이상)
- 3) 그라우팅 재질 중 모래의 경우가 벤토나이트 혼합물질보다 열용량 및 열전도계수가 높은 것으로 나타남(국내에서는 모래의 경우에는 지하수에 의한 유실우려가 있어 거의 사용하지 않고 있음)
- 4) 그라우팅 재질로 벤토나이트 혼합물질을 사용할 경우 수직형 지중열교환기의 용량은 0.02 USRt/m 정도가 되는 것을 확인함