

수축열 지열히트펌프 시스템의 지중열교환기 설계

김진상

한국지열에너지기술지원센터 이사

1. 서론

지열히트펌프와 연계되어 사용되는 열에너지 저장 기술에는 빙축열을 이용하는 방식과 수축열을 이용하는 방식이 주로 사용된다. 지열히트펌프는 냉방 또는 난방중 한가지만을 사용하는 냉방 또는 난방 전용방식에 비하여, 겨울철에 난방을 수행하고 여름철에 냉방을 수행하는 냉난방 겸용 역할을 수행하는 방식이 더 일반적이다. 국내에서는 지열히트펌프와 냉방과 난방에 모두 적용할 수 있는 수축열방식이 널리 사용되고 있다.

이러한 열에너지저장 기술은 열에너지를 저장한 다음에, 이를 다시 사용하는 여러 가지 기술을 부르는 용어로 사용된다. 열에너지저장은 인류 문명과 같은 긴 역사를 가지고 있으며, 대표적으로 겨울철에 얼음을 저장해 두었다가 이를 나중에 사용하는 것등을 들 수 있다.

건물에서는 여름철에 피크전력 소비시기에 냉방에 소비하는 전력은 건물에서 사용하는 전체 전력에서 상당히 큰 부분을 차지한다. 전력 공급자의 입장에서는 여름철동안 짧은 기간에 발생하는 피크 전력을 위하여 설비투자를 하게 되면 가동률이 낮으므로 경제성이 낮다. 전력 공급자는 하절기 피크 시간에 높은 전력요금을 부과하는 반면에 부하가 적은 비업무시간에는 낮은 전력요금을 부과한다. 이러한 가격차이가 냉난방 부하에

대한 열에너지저장 시스템의 도입을 촉진하게 된다. 전력요금이 낮은 비업무시간에 냉난방에 필요한 열에너지를 생산하여 저장하고, 이를 전력요금이 비싸고 부하가 큰 피크 시간대에 사용한다. 또한 냉방 또는 난방 부하가 최대인 경우가 전체 사용시간 중에서 일부인 짧은 시간에 불과한 특징을 갖는 경우가 대부분이다. 피크 부하에 해당되는 부분을 비가동시간인 비업무시간대에 열에너지를 생산하여 저장하면, 냉온수를 생산하는데 필요한 냉온수 생산 장치(냉동기 또는 히트펌프 유닛)의 용량을 크게 줄일 수 있다.[1] 냉난방에서 이용되는 열에너지저장은 에너지절약으로 보지 않고, 가격차를 이용하는 경제적인 시스템으로 보는 시각도 많다. 그러나 최근 온실가스 배출 절감이 중요해 지면서 심야시간대에 생산되는 전력의 구성과 피크 시간에 생산되는 전력의 구성에서 이산화탄소 배출량이 크게 다른 경우가 많다. 국내에서도 원자력의 비중이 높은 기저부하 운전 시간대에 발전에서 발생하는 이산화탄소 배출량이 피크 부하로 운전하는 주간시간대의 이산화탄소 배출량 보다 훨씬 적다.

수축열 방식은 물의 현열을 이용하므로 잠열을 이용하는 빙축열 방식에 비하여 필요한 물의 양이 훨씬 많으므로 큰 시설공간을 필요로 한다. 반면에, 기존의 냉방 장치를 그대로 사용할 수 있으며, 냉방은 물론 난방에도 사용할 수 있는 점으로 인하여 국내에서 지열히트펌프와 연계되어 널리

사용되고 있다.

지열히트펌프는 10여 년 전에 국내에 최초로 도입된 후로, 공공건물을 중심으로 널리 보급이 증가하고 있다. 물-공기 방식이 널리 보급되고 있는 미국등과 달리, 국내에서는 물-물 히트펌프 방식이 널리 보급되고 있다. 국내에서 생산한 물-공기 방식 대신에 그동안 건물냉난방에 널리 사용되어 온 흡수식 냉온수기와 같은 방식으로 실내에 냉수와 온수를 공급하는 물-물 방식이 설비설계자들에게 친숙한데서 기인한 것으로 보인다. 물-물 방식은 냉수나 온수를 생산하므로, 이를 수축열조에 저장할 수 있도록 연계가 가능한 방식으로 지열과 수축열을 병용할 수 있는 방식이다.

2. 수축열 지열히트펌프 시스템의 구성

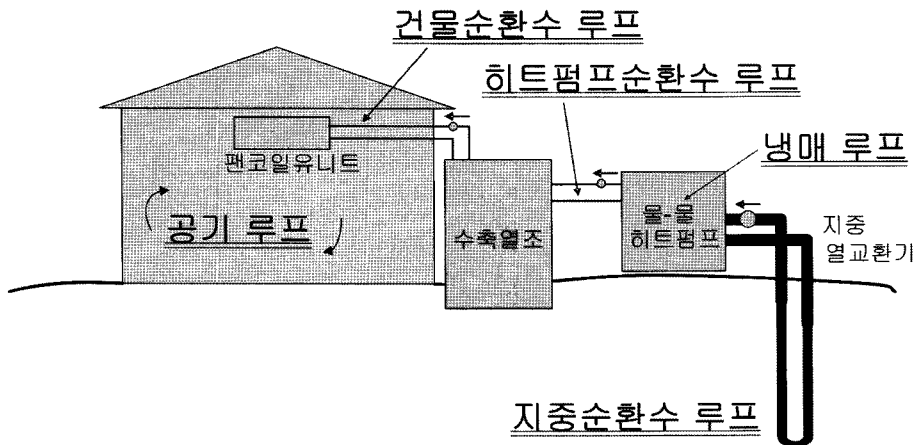
수축열 지열히트펌프 시스템은 말 그대로 지열히트펌프 시스템에 수축열저장을 결합한 방식이다. 지열히트펌프 유니트에서 생산된 냉온수를 건물로 공급하기 전에 수축열조에 저장하는 것으로

다이어그램으로 그리면 그림 1과 같다.

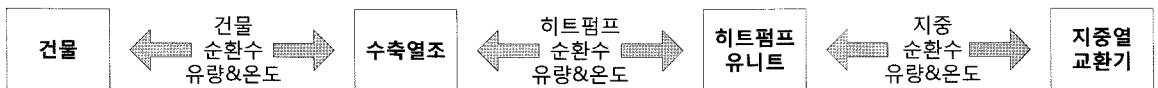
수축열 지열히트펌프 시스템의 주요한 구성요소는 건물, 히트펌프 유니트, 지중열교환기 그리고 수축열조이다. 구성요소를 연결하는 지중순환수 루프, 냉매 루프, 히트펌프 순환수 루프, 건물순환수 루프, 공기 루프의 다섯 개의 순환 루프를 구성하며, 이를 연결하는 배관 및 관련 부품과 그리고 효율적으로 운전하기 위한 제어장치로 구성된다.

3. 수축열 지열히트펌프의 에너지 흐름

여름철에 냉방을 수행하고 겨울철에 난방을 수행하는 지열히트펌프 시스템에서는 건물 내부의 환경 제어를 위하여 건물 내부에서 추출한 열을 지중에 저장하고, 지중에 저장한 열을 추출하여 건물의 난방에 이용하는 과정을 반복하면서 지중을 열저장소로 이용한다. 수축열 지열히트펌프 시스템도 일반적인 지열히트펌프 시스템과 같은 방법으로 지중을 열저장소로 이용하며, 냉방과 난방 시 에너지의 흐름을 표시하면 그림 2와 같다.



[그림 1] 수축열 지열시스템 구성 다이어그램



[그림 2] 수축열 지열히트펌프 시스템의 에너지 흐름

냉방운전을 수행하는 경우에는 건물 내부의 열이 수축열조를 거쳐서 히트펌프를 통하여 지중열교환기에 의하여 지중에 저장된다. 이와 반대로, 난방운전을 수행하는 경우에는 지중에 저장된 열이 지중열교환기를 통하여 히트펌프로 전달되고, 히트펌프 유니트에서 온수의 형태로 수축열조에 저장된 후에 건물 내부로 전달되는 경로를 거치게 된다. 냉방운전에서는 건물에서 지중으로 열에너지가 이동하고, 난방운전에서는 지중에서 건물로 열에너지가 이동한다.

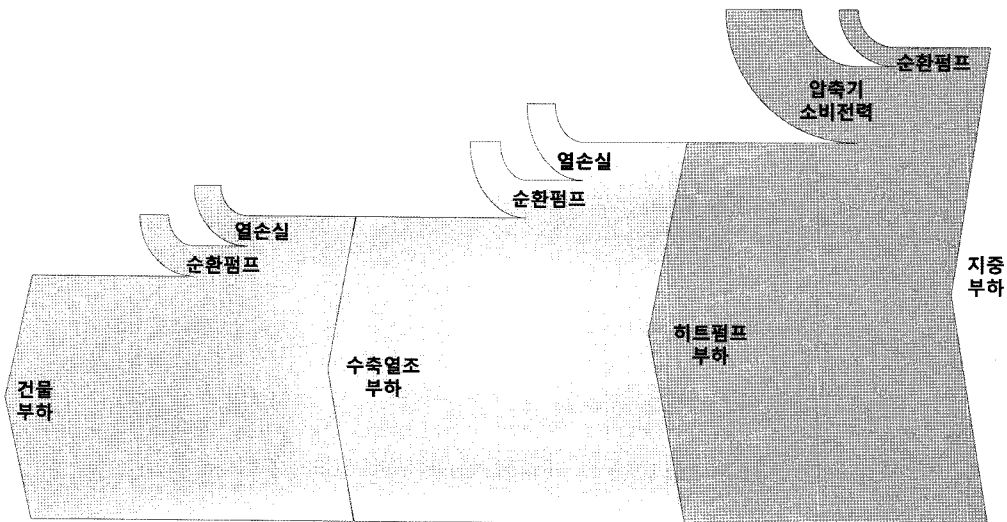
4. 수축열 지열히트펌프 시스템의 부하

수축열조 지열히트펌프 시스템을 구성하는 주요한 네 개의 구성요소인 건물, 수축열조, 히트펌프 유니트, 지중에 대한 부하가 각각의 구성요소 설계에 필요한 동시에, 지중열교환기의 설계에서도 필수적이다. 지열히트펌프에서 부하라는 용어는 장비 설계 및 선정을 위한 설계 부하(RT, kcal/h 또는 kW)와 사용 에너지량을 가르키는 에너지 부하(RT·h, kcal 또는 kWh)의 두가지 부하를 모두 포함하는 경우가 많다. 에너지 부하는 일간

에너지 부하 및 년중 월별 에너지 사용량 주로 사용된다. 건물, 수축열조, 히트펌프 유니트 그리고 지중열교환기의 냉방운전시의 냉열 공급 흐름과 부하 크기의 관계를 그림으로 표시하면 그림 3과 같다. 냉열 공급 흐름대신에 냉방 운전시 건물에서 지중으로 흐르는 에너지의 흐름도를 그리면 화살표의 방향은 그림 3의 방향과 반대이다. 난방 운전시의 에너지흐름도 냉방시의 에너지 흐름과 같은 개념으로서, 쉽게 작성할 수 있으므로 본 기고문에서 생략한다.

4.1 건물 부하

건물의 부하는 건물의 냉방과 난방을 위해 필요한 냉방 및 난방 설계 부하와 에너지 부하를 포함한다. 건물의 부하는 건물의 방향, 구조, 목적 및 건물이 소재하는 위치 등에 따라서 크게 달라지며, 건물외피 부하와 환기 부하 등이 포함된다. 설계 부하는 설계 일(design day)에 냉방과 난방에 필요한 피크 부하이며, 이는 냉난방 장비선정에 중요하다. 월별 냉난방에너지 사용량으로 에너지 부하를 나타내는 것이 일반적이며, 이는 근거로 지중열교환기 설계에 필요한 지중부하 또는 히트



[그림 3] 수축열 지열히트펌프 시스템에서 냉열 흐름 다이어그램

펌프 부하를 산정한다. 대부분의 지열히트펌프의 지중열교환기 설계 프로그램에서는 지중 부하나 건물 부하 대신에 히트펌프 부하를 입력한다.

4.2 수축열조 부하

수축열조의 부하는 건물 부하 이외에 건물과 수축열조 사이에서 발생하는 손실과 수축열조와 건물 사이의 순환펌프의 동력과 수축열조 자체에서 발생하는 손실의 영향이 포함된다. 냉방 운전을 하는 경우에, 수축열조의 부하는 건물 부하와 손실 그리고 순환동력을 더한 값이 된다. 난방 운전을 하는 경우, 수축열조의 부하는 건물 부하보다 항상 더 큰 값이 된다. 난방운전을 하는 경우에는, 수축열조 부하는 건물 부하에 순환동력을 제외하고 손실 값을 더한 값이 된다.

4.3 히트펌프 부하

히트펌프의 부하는 수축열조의 부하 이외에 수축열조와 히트펌프 사이에서 발생하는 손실과 히트펌프와 수축열조 사이의 순환펌프의 동력의 영향이 포함된다. 냉방 운전을 하는 경우에, 히트펌프 부하는 건물부하에 손실과 순환 동력을 포함하여, 히트펌프의 부하는 건물의 부하보다 더 큰 값이 된다. 난방 운전을 할 때, 히트펌프 부하는 건물의 부하에서 순환동력을 제외하고 손실을 더한 값이 된다. 히트펌프 부하는 히트펌프 유니트의 용량과 히트펌프 유니트가 생산하는 냉수와 온수의 에너지량을 나타낸다. 히트펌프 유니트의 에너지량은 월별 에너지사용량으로 표시하며, 이 히트펌프 부하는 지중열교환기 설계에 입력으로 사용되는 경우가 대부분이다.

4.4 지중열교환기 부하

지중열교환기의 부하는 히트펌프의 부하에 지중열교환기와 히트펌프 사이를 순환하는 지중순환수의 동력의 영향을 포함한다. 냉방 운전을 수행하는 경우에는 지중열교환기 부하는 히트펌프 부하에 지중순환수 순환동력을 더한 값이 되면서,

항상 히트펌프 부하보다 크다. 난방운전을 하는 경우에는 지중열교환기 부하는 히트펌프 부하에서 지중순환수 순환동력을 제외한 값이 되어, 항상 히트펌프 부하보다 작게 된다. 지중열교환기 부하는 월별 에너지량으로 표시하며, 지중부하라고도 불리우며, 히트펌프를 사용하지 않은 지중열교환기 설계에서는 입력으로 사용된다.[2]

5. 적용 대상 건물 에너지 분석

서울의 기상데이터를 근거로 연면적 11,148m²이고 창면적이 벽면적의 30%인 6층으로 구성된 상업용 건물의 모델을 System Analyzer[3]로 에너지 부하를 분석하여 월별 냉난방 에너지사용량을 정리하면 표 1과 같다.

이 건물의 냉방 설계 부하는 1,113kW이고, 난방 설계 부하는 610kW이다. 표 1의 월별 에너지 사용량에서 보여주는 것과 같이 이 건물은 냉난방 사이에 균형이 잘 맞지 않고, 냉방이 대부분인 건물이다. 이 건물에 일반적으로 적용될 수 있는 하루동안의 냉방운전 부하 변동을 반영하는 프로파일을 적용하면 그림 4와 같다. 일간 부하에서 수축열조를 적용하여 야간시간 동안에 히트펌프

<표 1> 대상건물의 냉난방 부하

월	냉방부하	난방부하
1	7,985.5	45,743.1
2	3,699.1	46,261.8
3	29,895.4	15,842.8
4	75,614.1	263.2
5	122,373.5	-
6	158,299.4	-
7	194,056.4	-
8	233,783.3	-
9	120,221.6	-
10	63,117.2	1,028.1
11	24,955.0	16,508.1
12	9,940.5	40,797.2
합계	1,043,941	166,444

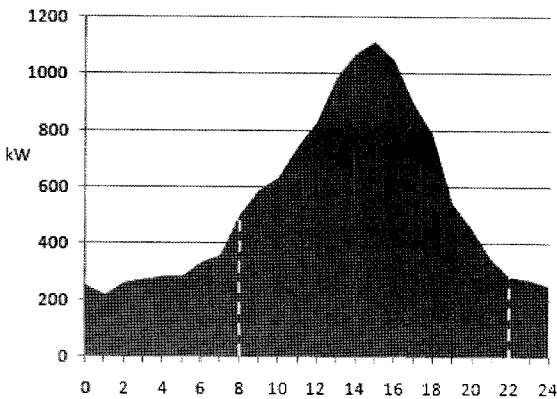
유니트를 운전하여 저장하고, 나머지 주간운전 시간 동안에는 필요한 부하만큼만 운전한다.

최대부하가 1,113kW인 일반적인 냉방운전에 수축열조를 적용하여 운전비용이 적게 드는 심야 시간에 최대 부하로 운전하여, 주간(피크)운전시에 부하를 최소화 하도록 운전하는 것이 일반적인 운전방법이다. 600kW급 히트펌프 유니트를 적용하여, 심야시간에 600kW인 최대부하로 운전하고 주간 시간에는 526kW의 부하로 일정하게 운전하는 것으로 가정한다. 여기에는 이를 그래프로 그리면 **그림 5**와 같다. 위와 같은 부하 프로파일에서는 주간운전시에 일부 축열이 필요하나, 이에 관한 설명은 생략하고 **그림 5**와 같은 2단계 운전으로 가정한다.

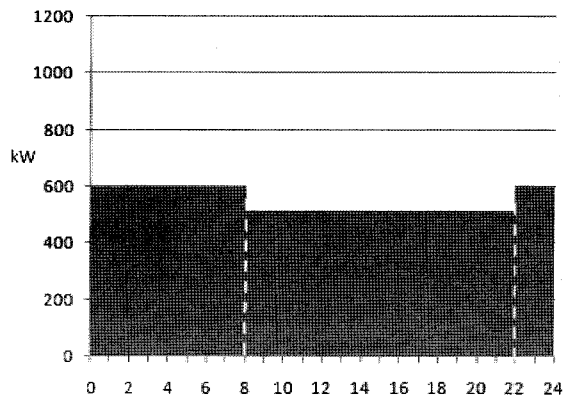
여기에 축열용 펌프가 히트펌프 유니트가 생산한 냉수를 수축열조에 저장한 다음에 일정 시간이 경과한 후에 건물의 냉방을 위하여 방열용 펌프를 통하여 공급하게 된다. 수축열조가 개방형인 경우에는 밀폐형인 일반 지열 히트펌프 시스템에

비하여 펌프의 소비동력의 비중이 증가하게 되면서, 저장과 이용 과정에서 2회의 펌프가 동력을 소비하게 되므로 이를 고려하는 것이 필요하다. 펌프의 사용과 일정기간 동안 수축열조에 저장된 기간 동안에 발생하는 손실을 전체 부하량의 10%, 20%, 30%를 고려하면 심야시간, 주간시간 그리고 일일 평균부하는 **표 2**와 같다.

순환동력 및 손실을 고려함으로써 냉방 부하의 크기가 증가함에 따라서 처음에 적용한 600kW의 히트펌프 유니트로 하루 동안 발생하는 냉방 부하를 담당할 수 없어지므로, 10%의 펌프/손실을 고려하는 경우에는 히트펌프 유니트의 용량이 600kW에서 50kW만큼 늘어난 650kW를 적용하고 이를 근거로 주간 운전부하를 계산하면 586kW가 된다. 20%를 고려하는 경우에는 1일 평균부하가 668kW가 되어 히트펌프 유니트를 50kW증가한 700kW로 설정하며, 이를 근거로 주간시간의 평균부하를 계산하면 645kW가 된다. 펌프/손실을 30%를 고려하는 냉방운전의 경



[그림 4] 대상 건물에 대한 수축열저장 적용전의 일간 부하



[그림 5] 대상건물에 대한 수축열저장 적용한 일간 부하

<표 2> 펌프/손실로 냉방부하 증가를 고려한 부하계산 (단위: kW)

냉방부하 증가	0%	10%	20%	30%
심야시간 부하	600	650	700	750
주간시간 부하	526	586	645	705
일일 평균부하	557	612	668	724

우에는 히트펌프 유닛이 750kW까지 증가하였으며, 이를 근거로 주간운전 부하를 계산하면 705kW가 된다.

펌프와 수축열조내 손실을 고려하여 냉방부하를 일정비율 만큼(10%, 20%, 그리고 30%) 증가시키면, 월별 냉방 에너지 부하도 그 비율만큼 증가하게 된다. 난방 운전하는 경우에는 펌프의 순환동력으로 얻어지는 에너지와 수축열조내 손실이 서로 상쇄되는 경향을 보이므로 난방시에는 부하의 변동이 없는 것으로 설정하였다. 이와 같은 방법으로 펌프/손실을 고려한 연간냉방에너지와 난방에너지의 양은 표 3과 같다.

6. 지중열교환기 설계 결과

지중열교환기의 설계는 여러 가지 소프트웨어가 개발되어 있다. 여러 가지 방법 중에서 g-fuction이 정확도가 높은 것으로 알려져있다. GLHEPRO[4]는 g-function 방법을 사용하는 소프트웨어로서 오클라호마 주립대학에서 개발 보급되고 있으며, 신뢰도에 대한 검증이 잘 이루어져 있다.

위의 건물은 냉방이 대부분인 건물로서, 이 건물의 지중열교환기의 길이는 냉난방이 비교적으로 균형을 이루는 건물에 비하여 훨씬 긴 특성을 갖는다. 이 건물 부하에 수축열조를 적용하는 경우

에 펌프와 손실을 고려하여 지중열교환기를 계산하여 비교한다. 본 기고문에서는 수축열조의 설계를 포함하지 않는다.

지중열교환기 보어필드는 가로 세로가 10 × 20의 형상으로 총 200개의 보어홀로 구성되고, 보어홀의 직경은 150mm, 보어홀 간격은 5m, 그리고 HDPE 파이프의 직경은 34mm, 지중열전도율은 2.9 W/mK인 경우로 계산하였다. 지중루프를 순환하는 순환수의 히트펌프 유닛 유입시 최고온도인 EWTmax는 30℃로 정하였다. 이러한 가정에서 펌프 순환동력 및 각종 손실을 고려한 에너지 데이터를 입력하여 구한 지중열교환기 길이는 표 4와 같다.

표 4에는 첫 번째 열에 '일반'이라는 이름으로 표시한 데이터는 수축열조를 적용하지 않은 일반적인 지열히트펌프의 지중열교환기 설계결과이다. 난방이 냉방에 비하여 매우작은, 냉방에 집중된 경우라서 통상적인 경우보다 지중열교환기의 길이가 상당히 길다는 것을 알 수 있다. 냉방과 난방에서 어느 정도 균형이 이루어지지 않는 경우에는 지중열교환기의 길이가 어느 정도 균형이 맞는 경우에 비하여 훨씬 더 길다. 수축열저장을 하지 않는 일반적인 지열히트펌프의 지중열교환기를 기준으로 수축열조를 적용한 지열히트펌프의 지중열교환기 설계 결과를 비교한다. 펌프의 순환

<표 3> 펌프/손실을 고려한 연간에너지 변화 (단위: kWh)

	0%	10%	20%	30%
연간냉방에너지	1,043,941	1,148,335	1,252,729	1,357,123
연간난방에너지	166,444	166,444	166,444	166,444

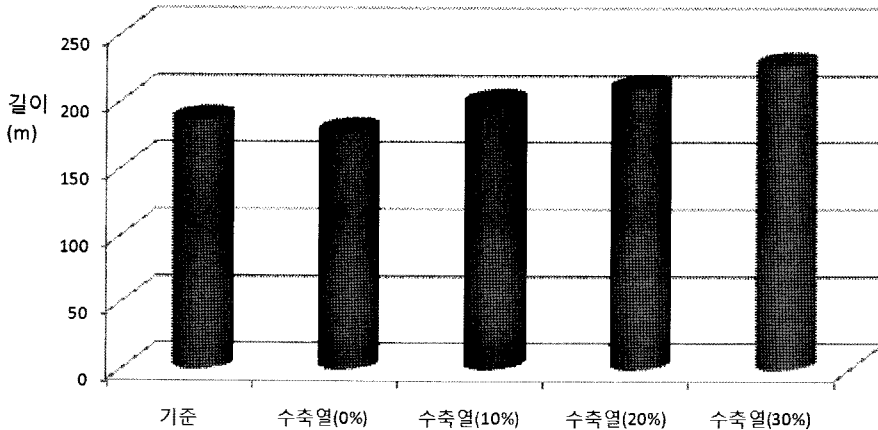
<표 4> 순환동력 및 손실을 반영한 지중열교환기 계산 결과

	일반	수축열조			
		기준	0%	10%	20%
순환동력/손실	기준	0%	10%	20%	30%
히트펌프 유닛(kW)	1150	600	650	700	750
지중열교환기 길이(m)	185.76	177.18	198.82	209.3	226.48
길이 증가율(%)	0	-4.6	7.0	12.7	21.9

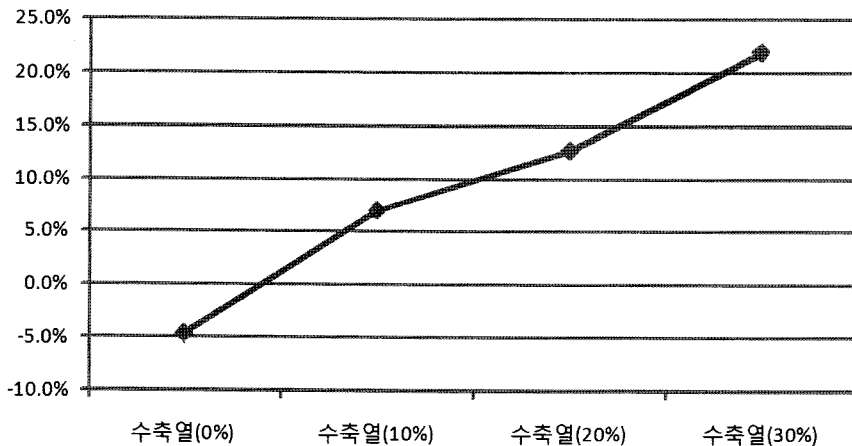
동력이나 축열조의 손실을 고려하지 않는 경우를 0%, 순환동력이나 손실을 전체 에너지 소비량의 10%로 추정하여 반영한 경우, 그리고 이를 20%와 30%를 반영한 경우의 결과를 일반적인 지열히트펌프의 경우와 지중열교환기의 길이를 비교하여 그림으로 표시하면 그림 6과 같다.

일반적인 지열히트펌프 열교환기의 길이는 185.76m이고, 수축열을 적용하면서 추가적으로 순환동력이나 손실이 없다고 가정한 경우(0%)에는 지중열교환기 길이가 약간 감소하여 177.18m로 산정되었다. 그러나 순환동력이나 손실의 발생

을 전체 에너지의 10% 정도로 가정하는 경우에는 지중열교환기의 길이가 일반적인 경우에 비하여 증가한 198.82m가 되었다. 이를 20% 그리고 30%로 가정하는 경우에는 지중열교환기의 길이가 더욱 증가하며, 수축열조에서 발생하는 손실이 크고 순환동력의 증가가 커서 전체 에너지의 20%가 된다고 가정하여 지중열교환기의 길이를 산정하면 209.3m에 달하여 수축열조를 적용하지 않는 일반적인 지열히트펌프의 지중열교환기 길이에 비하여 증가함을 알 수 있다. 이러한 증가율을 백분율로 환산하여 표시하면 그림 7과 같으며,



[그림 6] 수축열적용 지열히트펌프의 지중열교환기 설계 길이의 비교



[그림 7] 지중열교환기의 백분율 비교

기준에 비하여 순환동력이나 손실을 고려하지 않으면 지중열관기의 길이가 -4.6%가 변화하고, 순환동력과 손실을 10%, 20%, 30%를 고려함에 따라서 지중열교환기의 길이는 수축열조는 적용하지 않은 일반 지열히트펌프에 비하여 7.0, 12.7, 그리고 21.9%가 증가하게 됨을 알 수 있다.

지열히트펌프 설계에 이해가 부족한 경우에는 수축열조를 적용하는 지열히트펌프 시스템에서 히트펌프 유니트의 장비용량으로 줄여서 설계하는 경우도 있다. 예를 들면 일반적인 경우에 1150kW 용량의 히트펌프 유니트를 사용하던 것이, 수축열조를 적용하여 야간시간에 축열함으로서 히트펌프 유니트의 용량을 600kW로 줄일 수 있음을 앞에서 설명하였다. 지중열교환기를 설계할 때, 수축열조를 적용하기 이전에 산정된 185.76m를 기준으로 히트펌프 유니트 용량이 감소한 비율로 줄여서 96.9m로 지중열교환기의 길이의 48%를 줄여 버리는 사례가 발생하는 것으로 알려져 있다. 이는 지중열교환기를 지중 열저장소로 이해하지 않고, 일정한 온도의 물이나 공기가 항상 공급할 수 있는 다른 열교환기와 동일시 하여 발생하는 것으로 보인다. 이러한 경우에는 건물부하가 두 배 정도로 과설계 되어있는 경우라면 별 문제 없이 운전할 수 있지만, 그렇지 않은 경우에는 시간의 경과에 따라 설계 조건을 준수하지 못할 것이다. 심각한 경우에는 지중순환유체의 히트펌프 유입온도인 EWT가 히트펌프 유니트의 운전범위 내에서 유지하지 못하여 작동을 멈추게 될 것이다.

일반적인 지열히트펌프 설계에서도 히트펌프 유니트의 부하를 합하여 전체 부하로 사용하지 않고, 건물 부하를 합하여 총 부하로 산정하는 것은 기본적인 규칙이다. 또한 지중열교환기 설계에서 장비 부하가 아니라 에너지 부하가 큰 영향을 미치는 것 또한 지열히트펌프 설계자가 숙지해야 할

기본적인 사항이다.

7. 결론

수축열에너지 저장은 온실가스 배출절감에 기여할 수 있는 동시에, 에너지 비용절감에 크게 기여할 수 있는 유용한 기술이다. 이러한 유용한 기술이 지열히트펌프와 원활하게 연계하여 두 가지 기술의 장점을 살릴 수 있을 것을 기대한다. 기존의 지열히트펌프 시스템에 비하여 수축열조를 중심으로 저장과 공급단계를 거치므로 순환동력이 크게 증가한다. 또한 수축열조가 개방형인 경우가 대부분이라서 순환동력의 증가는 더욱 더 크다. 냉수나 온수를 저장할 때, 온도에 따른 밀도변화를 이용하는데, 저장한 열에너지의 대부분을 이용하지만, 축열조 내부에서 발생하는 손실도 고려할 필요가 있다. 순환동력과 손실을 최소화하는 수축열조와 순환시스템의 설계를 통하여 지중열교환기의 길이를 최소화할 수 있도록 하는 것이 중요하다. 그리고 건물의 에너지부하 대신에 히트펌프 유니트 용량으로 지중열교환기를 설계하는 관행도 시급히 개선되어야 한다.

참고 문헌

1. Turner and Doty, Energy Mangement Handbook, 6th ed, 2006, Fairmont Press
2. NREC, Closed-Loop/Ground-Source Heat Pump Systems, Installation Guide, NRECA Research Project 86-1, IGSHPA, 1988
3. System Analyzer, Version 6.1, Trane Corporation
4. GLHEPRO Version, Version 4, Oklahoma State University 