

# 대체 에너지원으로서 지하수 및 천부지열의 활용방안

한 정 상

연세대학교 지하수토양환경연구소 부소장 / 중국길림대학교 객좌교수

## 1. 서언

1973년에 발생한 석유파동 이후, 선진각국들은 그 동안 등한시 해왔던 자국의 에너지 자원 수급문제를 심도있게 검토하는 계기가 되었다. 그 결과 최근 각광을 받게 된 분야가 바로 우리 발 밑에 무진장 부존되어 있는 천부 地中熱(이하 지열이라 한다)과 연중 일정한 수온을 보유하고 있는 지하수의 열에너지를 저렴하게 추출하여 친환경적인 각종 열에너지로 사용할 수 있는 지열교환기술(Ground Source (coupled) Heat Pump System) 개발이 각광을 받게 되었다. 혹자는 이를간단히 지열펌프시스템이라고도 한다.

현재 우리나라의 경우, 지열펌프시스템의 보급은 미대사관과 용산 미8군 기지를 위시하여 일부 양어장의 온수 공급 등 중-저개발국까지 확산되고 있다. 특히 이미 구미제국은 지열펌프를 개발하여 지하의 청정지열 에너지를 학교, 아파트, 양어장, 그린하우스(비닐하우스 포함), 호텔, 대규모 빌딩 뿐만 아니라 가정용 냉난방용으로 다양하게 이용하고 있다.

지열펌프시스템은 현재까지 지구상에서 가용한 에너지 중에서 가장 안전하고, 효율적이며, 친환경적인 무공해 냉난방에너지 이용시스템이다. 즉 지열펌프시스템은 굴뚝이나 매연이 발생하지 않는 일종의 로(furnace)와 같다. 따라서 지열펌프는 화석연료를 사용하지 않고 지중이나 지하수내에 무진장 저장되어 있는 지열을 이용하기 때문에 주변환경에 악영향을 주지 않는 청정에너지 시스템이다.

지열펌프시스템은 땅속에 무진장 부존되어 있으며, 연중 비교적 일정한 온도를 가진 지열을 이용하여 동절기에는 난방용으로, 하절기에는 냉방용으로 열에너지를 이용할 수 있을 뿐만 아니라 추가적으로 온수를 무상으로 사용할 수 있다. 따라서 지열펌프시스템은 화석연료를 연소시켜 열에너지를 얻는 것이 아니라 지구 생성 이후부터 우리의 땅속에 무진장 부존되어 있는 천부지열에너지를 사용하기 때문에 전통적인 화석연료인 유류나 천연가스 및 전기열 펌프시설을 사용할 때 보다 에너지가 50%~70% 이상 적게 소모되는 효율적인 냉난방시설이다.

## 2. 지하수열 및 지열펌프시스템의 원리

지열펌프(Geothermal Heat Pump, GHP)는 여러 가지 형식으로 설치할 수 있다. 지열펌프는 통상 열 에너지가 필요한 곳이나 그 인근지에 설치한다. 그리고 건물 하부나 건물 부지내에서 지열을 추출·방열하기 위해 지열추출 및 방열용 순환회로(GHEX loop)를 설치하고 이들 지열회로와 지열펌프를 서로 연결시켜 겨울철에는 지열을 추출하여 실내 난방용으로, 여름철에는 실내에서 추출한 열을 지중에 방열하여 냉방용으로 사용한다. 지열펌프는 순환회로의 형식에 따라 개회로와 폐회로로 구분하며, 이들 지열순환회로가 바로 실내열을 지중으로 전이시키는 매개체 역할을 한다.

또한 지열펌프시스템은 표준 공기원 열펌프에 비해 약 55~60% 이상의 온실가스 배출량을 감소시킬 뿐만 아니라 타 냉난방 장치에 비해 일산화탄소와 이산화탄소를 거의 배출하지 않는 장치이다.

지열펌프시스템의 초기 투자비(장치 가격 및 설치비 포함)는 일반적인 공간 냉난방 시설의 설치비보다 다소 비싸긴 하나, 지열펌프시스템의 고냉난방 효율에 따른 저렴한 운영관리비와 친환경 및 경제적인 난방시설 설치시 정부가 적극적으로 지원하는 저금리 및 보조금 제도 등으로 초기의 투자비는 지열펌프시스템 설치 후 통상 2~3년 이내에 모두 회수할 수 있다.

따라서 미국 연방정부는 지열펌프의 이용을 적극적으로 국민들에게 권장하고 있으며, 해당 주정부는 지열펌프 설치자에게 각종 세제혜택과 저리의 융자금 및 보조금을 지급하고 있다.

공기는 온도가 절대온도인  $-273^{\circ}\text{C}$ 까지 내려가야만 열에너지가 0이 된다. 따라서 겨울철 실외온도가  $-7^{\circ}\text{C}$ 인 경우에 이는 절대온도보다  $280^{\circ}\text{C}$  높은 열에너지를 가지고 있다. 또한 여름철의 실외온도가  $21^{\circ}\text{C}$  일때의 실외공기는 절대온도보다  $251^{\circ}\text{C}$  높은 열에너지를 가지고 있다.

따라서 지열펌프는 짧은 거리에서 열에너지가 높은 곳에서 낮은 곳으로 이전시키는 역할을 하는 장치이다.

지열펌프용 냉매로 사용하는 Monochlorodifluoromethane( $\text{CHClF}_2$ ) 또는 R-22는 비교적 낮은 온도( $-43^{\circ}\text{C}$ )와 압력하에서 쉽게 가열되어 기화하는 냉매이다. R-22는 일종의 프레온가스류에 속하는 물질이긴 하나 CFC-12에 비해 오존 파괴계수(Ozon depletion potential)가 5% 정도밖에 되지 않으며, R-22는 액체로서 그 온도가 매우 낮다. 그러나 열을 받으면 낮은 온도에서도 쉽게 기화하는 냉매이다. 지열펌프 시스템은 이러한 R-22와 같은 냉매를  $7^{\circ}\text{C}$  이상 온도를 유지하고 있는 천부지열이나 연중  $15^{\circ}\text{C}$  이상의 온도를 유지하고 있는 지하수체에 통과시키므로서 이들로부터 열을 추출하여 열에너지를 발생토록하여 난방용으로 이용하는 장치이다. Process를 간략히 설명하면 다음과 같다.

- 1) 일정한 온도( $10\sim 15^{\circ}\text{C}$ )를 가진 지하수를 채수한 후 R-22 냉매가 들어 있는 지열펌프의 열교환기(Freon heat exchanger)에 통과시키면
- 2) 열교환기 안에서 흐르고 있는 R-22는 지하수의 열을 흡수하여 곧 기화한다.
- 3) 기화된 R-22는 콤프레셔 안에서 압력을 받은 후 그 온도는  $93\sim 100^{\circ}\text{C}$ 까지 상승한다.
- 4) 이 뜨거운 R-22 가스는 실내의 공기 열교환기(Heat exchanger)를 통과하면서 실내로 열을 방출하며 방열된 열은 송풍기에 의해 실내로 송풍(이때 실내온도는  $30^{\circ}\text{C}\sim 43^{\circ}\text{C}$  조절가능)하여 겨울철 난방을 한다.
- 5) 공기 열교환기와 송풍기에 의해 열을 빼앗긴 R-22 가스는 액화되었다가 다시 확장밸브(Expansion Valve)를 통과하면서 저압, 초저온의 액체 냉매로 변한다.
- 6) R-22는 열교환기를 통과하면서 다시 지하수( $13^{\circ}\text{C}\sim 15^{\circ}\text{C}$ )나 지중에서 열을 추출한 후 기화되어 응축 증발과정을 반복한다.

위의 4)에서 방열된 열을 덕트 시스템을 통하여 필요한 곳으로 송풍된 후 건물난방을 한다. 만일 온

수를 사용코저하는 경우에는 컴프레샤와 덕트 사이에 온수탱크를 부착한다.

하절기에는 실내열을 추출하여 실내를 냉방시키고 실내에서 추출한 열을 지하수나 폐쇄형 순환회로를 통해 지중으로 방열시킨다.

### 3. 열원으로서는 지하수, 천부지열과 지열시스템의 종류

물은 지구에 존재하는 물질 중에서 열을 가장 많이 저장·운반하는 물질중의 하나이다. 단위질량당 온도를 1℃ 상승시키는데 필요한 열에너지를 비열(specific heat)이라고 하며, 물은 비열이 매우 높다. 따라서 물은 열을 가장 많이 저장, 운반하는 물질이다.

땅속에 부존되어 있는 지하수는 지중에 존재하는 지열 때문에 그 온도는 당해 지역의 지열온도와 동일하게 되면서 열에너지(지열)를 저장하게 된다. 그러므로 지하수 이용은 바로 지열 에너지를 이용하는 것과 동일하다. 즉, 땅 속의 지열을 지하수라는 매체를 통하여 간접적으로 사용할 수 있다는 뜻이다.

지열펌프시스템에서 지하수를 사용하는 이유중의 하나는 지하수가 계절에 무관하게 연중 수온이 일정하기 때문이다. 건물의 냉난방용으로 사용하는 실내 설계온도(design temperature)는 위도, 지역에 따라 약간의 차이가 있긴하나 대체적으로 21~23℃ 정도이다.

따라서 실내 설계온도를 지속적으로 유지할 수 있도록 하기 위해서는 열에너지의 공급원인 지하수나 해당지역의 지열이 연중 일정한 온도를 유지하고 있어야 한다. 따라서 연중 온도가 일정한 지하수가 이 조건을 가장 양호하게 충족시켜주는 물질이다.

그러나 지하수가 전혀 산출되지 않는 곳에서는 지하수 대신에 지중열인 천부지열을 지중열교환기로 방열·추출해서 냉난방으로 이용할 수 있다. 지열펌프의 열추출 대상인 지하수의 수온은 10~20℃ 일 때 가장 양호하다.

국내의 경우 지하수면하 1~2m 하부에 부존된 지하수의 평균온도는 국내 연평균온도와 유사한 13~16℃ 정도이며, 지열구배는 100m 당 평균 (2±α)℃ 규모이다. 따라서 지하수의 온도는 지열펌프의 가장 중요한 요소이다. 환원하면 15℃의 열에너지를 보유하고 있는 지하수는 채수 즉시 3~4℃의 열만 추출 이용하고 지하수 자체는 원래의 이용 목적대로 사용할 수 있어 지하수자원은 용수로서의 물자원과 열에너지원으로서의 열원 등 다목적으로 활용할 수 있다.

우리나라보다 위도의 범위가 넓은 미국은 지표면하 15~50m 지점에 부존된 지하수의 평균온도는 11℃ 정도이며, 이 중에서 지열펌프시스템의 최저기준이 되는 7.2℃ 이상인 지하수는 전체 지하수의 74%나 된다고 한다.

지열펌프시스템의 열원으로 지하수를 사용하는 경우에 냉동 톤(RT)당 필요한 순환수의 양은 약 5~16m<sup>3</sup>/일(1~3gpm) 정도이다. 따라서 가정용 지열펌프는 평균 3RT이면 충분하므로 필요한 지하수 순환수의 양은 최대 50m<sup>3</sup>/일 정도이면 충분하다.

강원도 일대에 분포된 일부 대석회암통에 발달된 용천의 온도가 9℃ 정도로 조사된 예가 있긴 하나, 그 이외의 지역에서 일반적인 지하수의 수온은 계절별로 약간의 차이가 있긴하나 대체적으로 13℃~16℃ 이상으로서 우리나라는 지하수 지열펌프시스템을 사용할 수 있는 최적조건을 구비하고 있다.

전술한 바와 같이 지열펌프시스템의 효율에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 지표하 1~2m 하부(또는 지하수면하 1m이하) 심도에 분포된 지하수의 연중 온도가 일정하다는 지질학적인 사실이다.

전세계적으로 지하수의 온도는 그 지역의 연평균 대기온도와 거의 비슷하다. 열에너지는 분명히 태양 에너지와 지구 내부의 지열에너지로부터 유래된다. 위도가 낮은 지역일수록 평균기온과 지하수의 평균 온도는 상승한다. 지열은 이러한 태양열에너지와 지구내부의 지열에너지로부터 유래된다. 지열펌프의 효율은 난방효율인 성적계수(COP)와 냉방효율인 EER 표현할 수 있다.

### 3.1. 지열펌프시스템의 열효율

지열펌프의 성적계수(COP)은 일종의 난방효율로서 열에너지의 사용량과 이로 인해 신규로 생성된 열에너지와의 비를 뜻한다. 즉,

$$COP = \frac{\text{신규로 생성된 열량}}{\text{사용한 열에너지(KW)}} = \frac{\text{신규로 생성된 열량(BTU/h)}}{KW \times 3412 \text{ BTU/h/KW}}$$

1KW의 전력을 전기난로에 흐르게 하면 전기난로에서 저항에 의한 열손실이 없다고 가정하는 경우 생성되는 열에너지는 최대 1KW(3.412 BTU/h)가 된다. 이 경우 COP는 1 이다. 일반적으로 에너지원으로 여러종류의 화석연료를 사용하는데 전력과 화석연료의 난방효율을 비교해 보면 표 1과 같다.

표 1. 전기와 화석연료의 COP

연료	COP	COP
전 기		1
천연가스		0.8
석 유		0.7
석 탄		0.6

따라서 화석연료를 포함한 모든 물질은 COP가 1이상 되는 물질은 없다. 그러나 지열펌프시스템에 10KW의 에너지를 투입하면 이로부터 생성되는 열에너지는 사용하는 지열펌프시스템의 종류에 따라 약간의 차이가 있긴 하나 통상 40~50KW 정도이다. 즉, 성적계수는 4~5가 된다는 뜻이다.

이는 여름철의 냉방형식의 경우에도 동일한 원리를 적용할 수 있다. 이 경우 일반 에어컨은 여름철에 실내에서 추출한 높은 온도의 열에너지를 대기로 쓸모 없이 방출하여 도시의 열섬화의 원인이 되게 하지만 지열펌프시스템의 경우에는 건물 내부에서 추출한 열을 우물 속의 지하수나 지중 loop를 통해 지중으로 방열하여 저장하기 때문에 겨울철에 이 열에너지를 재 추출하여 사용할 수 있는 추가 열원이 된다.

따라서 지열펌프 기술은 추후 많은 에너지를 사용해야 하는 우리나라의 경우 조속히 도입하여 우리현실에 부합되게끔 실용화해야 할 기법이며 장치이다.

### 3.2. 지열펌프시스템의 장점과 적용분야

지열펌프시스템의 장점을 간략히 설명하면 다음과 같다.

- 1개 장치로서 냉난방을 동시에 가동할 수 있으며, 장치가 단순하다.
- 화석연료를 사용하지 않아 온실가스를 위시한 유해대기오염물질의 방출량을 55~60% 이상 저감시킬 수 있는 Montreal 의정서에 부합되는 친환경적인 청정에너지 및 위생적인 에너지 냉난방 시설이다.
- 지역에 따라 냉난방에너지 비용을 40~70% 이상 절감시킬 수 있는 경제적이며 에너지 절약형 냉난방시스템이다.
- 잡음이 없고 쾌적하고 안전한 시설로서 운영관리비가 저렴하고 화석연료를 사용하지 않아 화재의 위험성이 없다.
- 내구년수가 길고(약 25년) 에너지 절감으로 인해 초기투자비를 3~4년 이내에 상환가능하다.
- 천부지열과 지하수를 이용하기 때문에 에너지원이 무한대이다.

- 타 대체에너지에 비해 기후, 장소에 제약을 받지 않고 언제, 어디서나 개발 가능한 차세대 프론티어 시설이다.
- Peak 전력을 감소시킬 수 있다.

또한 지열펌프의 적용가능 분야는 다음과 같다.

- 개인주택, 학교, 교회, 아파트단지, 사무실용 B/D의 냉난방용 및 군부대 막사
- 수영장의 온수 및 목욕탕의 온수공급, 3C-store
- 개인주택 및 아파트의 바닥난방
- 창고의 냉난방
- 온실을 이용한 원예사업과 양어장의 양식업
- 야외 주차장이나 도로 밑에 설치하여 도로의 동결방지

### 3.3. 지열시스템과 지중열교환 회로의 종류

지열펌프시스템은 지열을 추출하거나 실내에서 추출한 열을 지중으로 방열시키기 위해 여러 가지 형식으로 지하에 순환회로(Ground Heat Exchanger, 또는 Loop)를 설치한다.

일반적으로 지열펌프시스템은 지중이나 수체(호소, 연못)내에 부설한 순환회로(loop)내에서 순환하는 순환수를 이용하여 지열을 추출하거나 폐열을 방열하는데 통상 순환회로는 수평 또는 수직으로 설치한다. 지열펌프시스템은 지열을 추출하는 순환회로의 방식에 따라 표 2와 같이 분류한다.

표 2. 순환회로의 종류

회로형식	종류	열원
1.개회로형 (Open loop system)	①개회로·2정 시스템 (Open loop 2 well system) ②개회로·1정 개회로형 시스템 (Open loop 1 well system) ③개회로·수직심정형 시스템 (Standing column well system)	지하수, 지열 이용 " "
2.폐회로형 (Closed loop system)	①수평폐회로 시스템 (Horizontal closed ground loop) ②수직폐회로 시스템 (Vertical closed ground loop) ③수정폐회로 또는 폐회로 수체 시스템	지하수 또는 지열 " "
3.혼합형 (Hybrid geothermal heat pump)	① 좌동	지하수, 지열과 기존의 냉난방시설

또한 지열펌프는 그 크기에 따라 가정주택용 지열펌프(residential geothermal heat pump)와 상업용 지열펌프(commercial geothermal heat pump)로 구분하기도 한다. 여기서 상업용이라 함은 모든 상업용 빌딩, 학교, 기숙사, 호텔, 모텔, 사무실B/D, 병원, 다층 대규모 빌딩 및 온실 등을 뜻하며, 가정주택용이라 함은 주택용 및 자동차 세차장 등 소규모로 지열을 이용하는 시설을 뜻한다. 이들 시스템을 약술하면 다음과 같다.

#### 가) 개회로형 지열시스템(open loop system)

개회로형 지열펌프시스템에서 사용하는 첫 번째 우물은 공급정, 2번째 우물은 주입(배출)정으로 이용하는 2정 시스템과 공급정 1개만 이용하고 순환회로에서 사용한 지하수는 인근 수체로 방류하는 1정 시스템과 1개 심정 저면에 부존된 비교적 고온의 지하수열은 추출하여 사용한 후 사용한 지하수는 다시 심정의 상부구간으로 재순환시키는 수직심정형 시스템(standing columnwell system) 등 3가지가 있다.

**나) 폐회로형 또는 지중연결 지열시스템(Closed loop or Earth Coupled system)**

지하수는 열 에너지를 가장 잘 저장·운반하는 매체이기 때문에 과거에 지열펌프시스템은 주로 지하수를 이용하였다. 그러나 모든 곳에서 필요한 수량이나 양호한 수질을 가진 지하수가 산출되지 않는 다. 지하수가 전혀 없는 곳도 있고, 수질이 부적절한 곳도 있으며, 지하수자원의 보호를 위해서 개회로형 시스템 설치를 금지하는 곳도 있을 수도 있다. 따라서 지하수의 수질이 불량하고 지하수가 전혀 산출되지 않는 곳이나 또는 개회로형 시스템 설치가 곤란한 곳에서는 폐쇄회로형 지열펌프시스템을 설치하여 냉·난방용으로 이용한다.

이 시스템은 지하수가 부존되어 있지 않은 지역에서는 열에너지원으로 지하수 대신에 지중에 저장되어 있는 천부 지중열을 이용하는 시스템이다. 본 기법은 열 에너지원으로 지하수를 사용하는 대신 지열을 보유하고 있는 지중에 주로 PE pipe나 PB pipe로 이루어진 폐쇄회로를 설치하고 이들 폐쇄회로내에서 물이나 또는 부동액을 혼합한 순환수가 순환토록 하여 이들 순환수가 지중의 지열(지중열)을 흡수, 추출·방열토록하는 방법이다.

이 방식에는 수평폐회로, 수직폐회로 및 호소형-폐회로가 있다.

① 수평 폐회로 지열시스템(horizontal closed ground loop system, HCGL)

이 형식은 통상 폐회로를 부설할 수 있는 적절한 공간이 가용하며 굴착대상 토양이 일반 포크레인이거나 trencher로 굴착할 수 있는 지역에서 가장 경제적으로 설치할 수 있는 방법이다. 이 방법은 대체적으로 소량의 냉난방 에너지가 필요한 상업용 빌딩이나 가정용 주택에 주로 사용하는 방법이다.

굴착깊이는 최소 1m~3m 규모이며, 굴착부위 저면에 평행한 방향으로 PE관을 부설한다. 1 냉동톤(RT) 당 필요한 PE관의 부설깊이는 통상 120m~180m이고, 제한된 굴착공간내에 PE관을 보다 많이 설치하기 위해서 PE loop을 여러 층 또는 원형(Slinky형)의 코일형태로 감아서 부설하기도 한다.

수평폐회로형 지열펌프의 1RT 당 필요한 수평 PE pipe의 규격별 설치형식별 소요깊이는 대개 표 3과 같다.

표 3. 수평 폐회로형 지열펌프의 ton당 소요 loop pipe 장

loop pipe 설치형식	설치심도 (m)	ton당 소요 loop pipe 길이(m)	비고
1½~2" 구경의 단일 pipe	1.2~1.8	107~152	물순환
1½~2" 구경의 평행 pipe	1.2~1.8	ton 당 굴토장 : 64~92 ton당 소요 pipe장 : 128~184	물순환
1½~1" 구경의 4층 loop pipe	1.8m 이상	ton 당 굴토장 : 38~61 ton 당 소요 pipe장 : 153~244	pipe 간격은 최소 0.3m

그러나 정확한 GHEX(loop)의 길이는 필요한 냉난방 부하를 소화할 수 있는 지열 펌프를 선정하고, 선정한 지열펌프의 냉·난방 부하능이나 PE관 설치형식과 PE관 설치 구간에 분포된 토양과 암석의 열전도성에 따라서 지중으로부터 동절기에 추출해야 할 열량과 하절기에 지중으로 방열해야 할 열량에 따라서 전산프로그램을 이용하여 구한다.

② 수직 폐회로형 지열시스템(vertical closed ground loop system)

이 방식은 굴착대상지가 암반으로 구성되어 있고 주변의 미관 유지를 위해 최소한의 교란만 허용하는 지역이거나 대용량의 냉난방에너지를 필요로 하는 수요처(예, 대규모 빌딩, 학교, 양식장, 원예단지) 또는 수평 폐회로를 설치할 공간이 없는 도시지역에 가장 적합한 방식이다.

IRT 당 천공깊이는 대상 암종의 열전도도나 PE loop의 열저항, 배열형식에 따라 좌우되나 포화결정질 암반 분포구간에서는 통상 IRT 당 평균 46m~140m 심도의 천공(Bored hole)을 수요처나 그 인근지에 굴착한다. 그런 다음 두 개의 PE관을 U bend로 연결한후 굴착천공 내에 설치한다. 폐회로를 설치한 공은 열전도성이 양호한 적절한 물질로 되메움을 하거나 bentonite 그라우팅을 실시한다. 이와 같이 수직으로 설치한 PE관을 지표하 1.8~2.5m에 매설한 상부 연결관(header)과 서로 연결한다. 이들 PE관의 수직·수평 폐회로는 순환수로 충전시키고 이들 순환수가 지열을 열교환기에 운반·전달될 수 있도록 한다.

일반적으로 수직폐회로는 설치비가 수평 폐회로에 비해 고가이긴 하나 설치심도가 깊기 때문에 동절기에는 따뜻하고 하절기에는 비교적 차기 때문에 폐회로의 설치깊이가 수평 폐회로 형식보다 짧다. 수직 loop형 지열펌프의 ton당 필요한 수직 굴착공의 길이와 소요 loop pipe장은 대개 표 4와 같다.

표 4. 수직폐회로형 지열펌프의 ton 당 수직굴착공의 길이와 loop pipe의 소요길이

수직 PE pipe의 규격	상부 연결관의 규격(인치)	소요 수직공의 길이(m)	loop pipe 길이 (m)	비고
경 0.7~1" 규격의 단일 U bend loop	1 1/4 - 2	46~85	92~152 (300~500)	loop pipe의 길이는 수직공 심도의 2배
경 1~2" 규격의 단일 U bend loop	1 1/4 - 2	38~68	76~69 (250~450)	loop pipe의 규격 1, 1 1/4, 1 1/2, 2"에 적용

수직폐회로로 사용하는 PE loop의 정확한 길이는 건물의 냉난방 부하, 지열펌프의 능력, 수직 PE loop의 설치형식, PE관 설치지점에 분포된 토양과 암석의 열전도도, 열저항 및 Grout재인 bentonite의 특성 등에 따라 GLHEPRO, Gchpcal V-4 나 CLGS와 같은 전산 프로그램으로 전산처리하여 구하여야 한다.

③ 호소형 폐회로 시스템(Pond or lake closed loop system)

지열펌프의 냉난방용수로서 호수와 저수지, 해수 및 하천수를 이용할 수도 있다. 이 경우에 물을 여과시키지 않고 사용하면 조류나 탁도 때문에 열교환기에 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 해당 수체로부터 4.6~6m 떨어진 곳에 백호를 이용하여 수굴정을 굴착한 다음 스크린 파이프를 설치하고 공벽구간에 충전력을 부설하면 충전력이 충분한 여과능을 발휘한다.

다) 혼합형 지열펌프 시스템(Hybrid system)

빌딩의 냉난방 요구조건이 현저히 다른 경우에는 운영비를 절감시키기 위해서 기존의 보일러에 의한 난방시설과 기타 냉각탑을 이용한 냉방시설을 지열펌프시스템과 연계시켜 운영할 수 있다. 이를 혼합형 시스템이라 한다. 이 경우 지하에 설치한 순환폐회로의 크기는 빌딩이 필요로하는 냉난방 부하 중에서 적은 쪽에 부합되도록 설계한다.

필요에 따라서는 지열펌프 시스템의 규모에 무관하게 빌딩의 난방부하율이 큰 경우에는 기존의 보일러를 이용하여 추가 열에너지를 공급받고 냉방부하율이 큰 경우에는 냉각탑을 이용해서 추가 냉방을 할 수도 있다.

일반적으로 혼합형 지열펌프 시스템에서는 초기시설 투자비를 줄이기 위해서 가능한한 지중에 부설하는 순환회로를 적게 설치한다. 지열펌프시스템은 낮에 집중적으로 사용하기 때문에 순환폐회로에 과잉 열이 집적된다. 따라서 낮 동안에 과잉 집적된 열을 밤에 방열시키기 위해서 냉각탑을 사용하는데 혼합

형식의 지열시스템은 야간의 증발시스템의 변환에 달려 있다. 그렇게 하면 열배출원으로서 작용하는 폐회로내에 들어 있는 순환수의 온도가 지열펌프시스템의 효율저하를 방지해 준다. 특히 이 시스템은 낮 온도가 높고 밤 온도가 낮은 기후 조건에서 가장 이상적이다.

#### 라) 대규모 상업용 지열펌프의 설치방식

전술한 바와 같이 상업용 지열펌프시스템은 지중에서 열을 교환하기 위해 설치한 순환회로(loop)와 1개 이상의 지열펌프(열교환기)로 이루어져 있다. 지열펌프는 작동시 소음이 전혀 없고 공기에서 열을 추출하는 시설이 아니기 때문에 주로 실내에 설치한다.

즉 지열펌프시스템은 실내에 있는 창고나 천장에 걸거나 콘솔 형태로 설치할 수 있다. 상업용 지열펌프는 빌딩의 크기나 소요 냉난방 용량에 따라서 그 규격과 크기가 다양하다. 현재 이용되고 있는 지열펌프의 규격은 약 88종 이상이 있으며, 특히 고속도로의 톨게이트나 경비실과 같은 소규모 냉난방용으로 사용되는 지열펌프의 규격은 0.5 ton이 대종을 이루고 있다. 이에 비해 초고층 건물은 수백개의 지열펌프를 이용하는데 그 규모는 수천 ton의 냉난방 시스템을 종합해서 배열하기도 한다.

상업용 지열펌프의 종류에 따라서 빌딩내에서 냉난방을 하는 방법도 서로 상이하다. 어떤 빌딩은 따뜻한 공기를 덕트시설을 통해 덕트 송풍기로 순환시키는가 하면 다른 빌딩은 온수를 순환시켜 바닥 및 벽 난방을 하기도 하며, 두 시스템을 동시에 사용하는 경우도 있다.

### 4. 지중열교환기의 지중 loop(GHEX)의 설계

지중연결 냉·난방 시스템을 설치하는 이유는 열에너지비용을 절감하고 환경적으로 깨끗한 지열에너지를 사용하는데 있다.

따라서 에너지 소요량은 여러 가지 방법으로 산정해 볼 필요가 있다. 일반적으로 냉·난방에너지를 계산하는데는 다음과 같은 5가지 방법이 있다.

- 난방일수(degree) 방법 : 가장 간단한 방법이지만 결과의 신뢰성이 높지 않으며 운영효율이 외기 환경에 영향을 많이 받는 지열펌프시스템의 경우에는 잘 맞지 않는다.
- J-manual방법(최대부하계산법) : 최대부하계산 순서는 사무실이나 주택이나 모두 동일하다. J-manual에 수록된 내용을 충실하게 따르면 주어진 기상조건이나 건물조건에 무관하게 냉난방 부하를 구할 수 있다.
- Bin 방법 : 비교적 간단한 방법으로서 외기온도와 부분부하를 고려할 수 있는 장점이 있다. 따라서 이 방법은 특성 시스템의 필요성에 부합되게끔 조정이 가능하다.
- 시간대 시간방법(hour-by hour methods) : 상당히 정밀을 요하는 대규모 상업용 시스템은 이 방법을 이용한다.
- 그 외 간이계산법으로 주택이나 소규모 건물의 냉난방 부하를 간헐운전을 하는 일반 집합주택설비(사무실 등)와 24시간 연속 운전을 하는 고기밀 집합주택의 설비 및 온수식 바닥난방설비의 부하계산법이 있다.

수직 PE loop을 설치할 시추굴착공(천공)의 규격결정을 위한 설계는 해당 지층의 종류와 열적 성능에 영향을 미치는 제반특성이 서로 다르기 때문에 매우 복잡하고 어려운 작업이다. 따라서 수직 loop 설치 지점의 구성암석, 함수비 및 지하수의 이동특성을 사전에 파악해야 하므로 대상지하매체와 각 케이스별로 그 경제성은 다를 수밖에 없다.



복잡한 분석에 필요한 정보가 모두 가용한 경우는 극히 드물다. 따라서 보다 현명한 설계방법은 지하에 부설한 지열 추출 또는 방열용 천공과 지중순환회로인 PE관에 대한 간단한 해에 경험적인 자료를 적용한다. 지중에 설치한 지중열교환기의 규격은 분류된 토양별 열전도도와 함수비 및 사용할 Grout재와 PE pipe의 열적 특성을 이용해서 구할 수 있다.

전통적인 지질조사에 비해 지중매체에 대한 현장 열저항 시험을 실시하면 훨씬 정확한 값을 얻을 수 있다. 초기 설계는 통상 보수적인 방법으로 실시하며 관측치가 가용한 경우에는 관측치를 이용하여 초기설계치를 수정한다.

지중열교환기인 PE loop를 너무 가까이 설치하는 경우 즉 천공설치가 가능 지역이 제한되어 있는 상업용 지열펌프시스템인 경우에 loop 설계는 더욱 정밀히 해야 한다. 30~50평 규모의 가정용 주택의 난방부하는 약 3ton(10.6kw) 규모이다. 이에 비해 사무실로 이용하는 건물부하는 가정용 주택보다 훨씬 큰 1,000평~10,000평에 이르며, 이때의 일반적인 난방부하는 냉방 부하보다 훨씬 크다(고위도 지역).

위에서 언급한 상업용 사무실의 난방 설비인 경우, 지중에 설치한 인접 수직 PE loop 사이에서 발생하는 장기적인 지중열 변화와 간섭현상들이 크게 발생되지 않도록 천공간격을 충분히 이격시켜야 한다. 천공 간격은 통상 6m 이상 이격시키는 것이 가장 좋은 방법이다. 지중에서 열이동 지배식은 지중에 부설한 1개 원통형(cylinder) 열원으로부터의 열이동 이론에 기초를 둔 Carslaw와 Jaeger의 선원[line source] 이론에 기초를 두고 있다. 그 후에 지중열 교환기의 규격을 결정하는 방법으로 Ingersoll은 선원지배식의 오류를 보완할 수 있는 방법을 개발 제시한바 있다.

선원식은 순환회로의 일간 이상의 평균온도를 구하는데는 매우 유효한 식이지만 고려대상 시간이 6시간 이하인 단기적인 경우에는 오차가 발생한다. 따라서 순환회로의 시간별 온도변화를 정확히 구하기 위해서는 원통형 열원식(cylindrical heat source)을 사용한다.

지중열 교환기의 열적 성능은 지중에서 추출하거나 방열되는 열량에 따라 변하는 함수이다. 지중열의 방열 및 추출로 인해 지중에서 최대, 최소온도가 발생하는 시간은 상당한 시간(수년)이 지나야 나타난다. 특히 근접거리에 여러개의 수직 PE관을 설치했을 때 이러한 현상은 두드러지게 발생한다.

최악의 설계조건은 지중순환회로를 설치한 후 수년 후에나 겨우 나타나기 때문에 지중순환회로는 장기간 동안의 성능을 충분히 고려하여 설계를 한다. 그렇다고 장기간 동안에 발생하는 영향만을 세부적으로 모의할 필요는 없다.

열이동의 다변성은 지중순환회로를 둘러싸고 있는 지중열 매체의 규모나 범위가 지중순환회로에 비해 훨씬 크기 때문에 시스템의 정확한 성능을 평가하는데는 연간 열에너지 변화량을 계산함으로써 충분한다. 그러나 지중에서 열에너지의 월간·일간 및 시간당 변화량은 반드시 정확히 계산해야 한다.

단기적인 지중 온도변화를 파악할 수 있는 방법으로는 Ingersoll 방법이 있다. Ingersoll 방법은 정류(st-st)의 열이동식으로서 (1)식과 같다. 즉 st-st 일 때 지중열 에너지 이동식을 이용하여 필요한 천공길이를 계산할 수 있다.

$$q = L(t_g - t_w) / R_g \quad \text{---(1)}$$

여기서  $t_g$  : 지중온도

$t_w$  : 순환회로 외부면온도(PE 파이프의 외부표면온도)

$R_g$  : 지중열 저항치 =  $1 / (S_b \cdot K_g)$

$S_b$  : Shape factor,

$K_g$  : 대상 토양/암석의 열전도도

일정한 열이동 펄스를 이용해서 지중열교환기의 가변적인 이동율(variable heat rate)의 형태로 (1)식을 변형시킬 수 있다. 순환회로의 단위길이당 지중매체의 열저항은 특정 열펄스가 발생하는 시간의 함수로 표현할 수 있다.

지금 ① 장기적인 즉 연간 열에너지의 불균형적인 이동량( $q_a$ )과 ② 설계월 동안의 월평균 열이동율 및 ③ Carslaw와 Jaeger의 열이동식을 근거로해서 단기간 동안의 최대열이동율을 고려하여 지중열교환기가 필요로 하는 천공심도를 냉방시와 난방시로 구분하여 표현하면 (2)식과 (3)식과 같다.

$$L_c = \frac{q_a R_{ga} + [q_{lc} - 3.412kw](R_b + PLF_m \cdot R_{gm} + R_{gd} \cdot F_{sc})}{t_g - \frac{t_{wi} + t_{wo}}{2} - t_p} \quad \text{---(2)}$$

$$L_h = \frac{q_a R_{ga} + [q_{lh} - 3.412kw](R_b + PLF_m \cdot R_{gm} + R_{gd} \cdot F_{sh})}{t_g - \frac{t_{wi} + t_{wo}}{2} - t_p} \quad \text{---(3)}$$

$F_{sc}$  : U-tube 부근에서 단기적으로 순환하는 열손실계수

(통상 1.01~1.06 사이)

$L_c$  : 냉방시 필요한 천공길이(ft)

$L_h$  : 난방시 필요한 천공길이(ft)

$PLF_m$  : 설계월(design month) 동안의 부분 부하계수

$q_a$  : 연간 지중에서 발생하는 열이동량(BTU/h)

$q_{lc}$  : 건물의 설계냉방 블록(block)부하(BTU/h)

$q_{lh}$  : 건물의 설계난방 블록부하(BTU/h)

$R_{ga}$  : 연간 지중의 유효열저항(h-ft·°F/BTU), 연간 열진동(펄스)

$R_{gm}$  : 월간 지중의 유효열저항(h-ft·°F/BTU), 월간 열펄스

$R_{gd}$  : 일간 지중의 유효열저항(h-ft·°F/BTU), 일간 열펄스

$R_b$  : 천공의 열저항치(천공+PE관)(h-ft·°F/BTU)

$t_g$  : 비교란 지중온도(°F) - 연중 일정한 지중(지하수) 온도

$t_p$  : 주변 천공의 영향으로 발생한 장기적인 온도변화(초기치로 -3°F를 사용한다)

$t_{wi}$  : 지열펌프 유입부에서의 순환수의 유입온도(°F)

$t_{wo}$  : 지열펌프 출구에서의 순환수의 온도(°F)

$W_c$  : 설계 냉방부하시 소요전력(W)

$W_h$  : 설계 난방부하시 소요전력(W)

만일 냉방시 필요한 천공길이( $L_c$ )가 난방시 필요한 길이( $L_h$ )보다 길면, 난방 기간동안에는 과다 설계(길이가 긴)된 loop 코일의 혜택을 받을 수 있다.

두 번째 옵션으로는 난방시 필요한 짧은 천공길이( $L_h$ )를 사용하고 냉방시에 과소 설계된  $L_c$ 를 보충하기 위해 냉각탑을 사용할 수도 있다.

만일  $L_h$ 가  $L_c$ 보다 크면, 설계자는  $L_h$ 를 선택하여 냉방기간동안 과다 설치된 지중코일의 효율적인 이점을 이용하므로 초기과다 투자비용을 보상받을 수 있다.

## 5. 결 론

우리나라의 연간 총에너지 및 석유수입액은 각각 375억불(49조원)과 314억불(41조원)로서 에너지 수입의존도는 97.4%에 이르며, 이로인해 우리경제는 국제유가 변동에 아주 취약한 경제구조를 지니고 있다. 또한 국내 연평균 경제성장률은 6% 내외인데 반해 연간 에너지 소비증가율은 9.2%에 달해 우리보다 GDP가 3.5배 높은 선진외국의 에너지 소비량과 유사하여 국내 경제발전에 큰 장애요인이 되고 있다. 이는 소득에 비해 저효율에너지를 과다하게 이용하기 때문이다. 따라서 지금부터 에너지 절약형 및 대체에너지 신기술 개발이 시급한 국가적인 과제로 떠오르고 있다.

특히 연평균 16% 이상 수요가 급증하고 있는 기존의 냉난방 시설을 지하에 무진장 부존되어 있는 천부지열과 지하수자원을 이용하는 지열냉난방시스템으로 대체하면 하절기의 peak 전력을 완화할 수 있고, 에너지 이용시설자에게 원가절감과 환경질 개선의 기회 제공과 아울러 범국가적인 에너지 수입 대체효과를 통한 국제 수지개선에 크게 기여할 수 있을 것이다. 따라서 현재와 같은 저효율 화석연료에너지 이용으로 인한 심각한 대기 오염과 국내 경제의 불안정을 해소할 수 있는 신기술은 바로 친환경적이고 에너지 절약형이며 전천후형 대체에너지인 지하수가 포함된 천부지열 개발 기술의 보급이다.

본 기술은 기존 냉난방 시설에 비해 연간 50~70% 이상의 에너지 비용을 절감시킬 수 있는 에너지 절약형 기술이며, 화석연료를 사용하지 않기 때문에 Green house gas 배출량을 획기적으로 감축시킬 수 있는 청정에너지 기술이다.

냉난방용 에너지원으로서 국내 천부지열은 타 대체에너지에 비해 일조일, 기후, 바람 및 조력과 같은 외인적인 요인에 영향을 받지 않으며, 국내 어디서나 개발가능한 대체 에너지로서 근래 선진외국들은 범 정부 차원의 제정적 및 기술지원하에 급성장되고 있는 기술 집약형 신기술이다. 따라서 본 기술은 우리 정부의 에너지 및 환경정책에 부합되는 신기술일 뿐만 아니라 동남아 시장 개척 잠재성이 매우 높은 차세대 프론티어형 기술이다.

특히 본 기술 가운데 지열을 추출하는 지중열교환 시스템 기술은 지질학적인 지식이 반드시 접목되어야 할 종합적인 신규기술로서 정부는 때늦은 감이 있긴 하나 이제부터라도 이 분야 인재양성과 기술개발에 주력해야 할 것이다.

## 참고문헌

- 지하수환경과 오염, 한정상, 박영사, 1999.
- 지하수 및 천부지열을 이용한 대체에너지 자원, 한정상, 2003, draft.
- "Ground Source Heat Pumps", "Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings", S.P Kavanaugh & K. Rafferty, ASHRAE, 1997.
- "Heat Conduction", L. R Ingersoll, et al, McGraw-Hill, 1954,
- "GLHEPRO 3.0, "School of Mechanical and Aerospace Engineering", Oklahoma State Univ.(OSU), IGSHPA, 1999.
- "Designing Vertical Ground Coupled Heat Pump with GchpCalc V.4", S.P.Kavanaugh, 1998.
- "Closed-loop/Ground Source Heat Pump System(Installation Guide)", NRECA, OSU, IGSHPA, 1988.
- "Certification Training Program for Geexchange Designers-Book 1 and 2", IGSHPA, OSU, 2002.
- "Closed-Loop / Geothermal Heat Pump System 2000", IGSHPA, OSU, 2000.
- "Closed-Loop / Geothermal System(Slinky Installation Guide)", NRECA, OSU, IGSHPA, 1995.
- Soil and Rock Classification for Design of GCHP System, EPRI, NRECA, OSU, IGSHPA, 1989.
- "Grouting Procedures for GSHP System", IGSHPA, OSU, 1991.

- “Grouting for Vertical Geothermal Heat Pump Systems”, IGSHPA, OSU, 2000.
- “2002 ASHRAE Handbook - HVAC applications”, Atlanta, ASHRAE, 2002.
- “Alabama Streams, Lakes Springs, and Groundwater for Using Heating and Cooling”, Geological survey of Alabama, 1987.
- “Conduction of Heat in Soild”, H.S Carslaw and J.C Jeger, Oxford, 1947.
- “Heat Conduction with Engineering and Geological Application”, L.R.Ingeroll et, al., MacGraw-Hill, Newyork, 1954.
- “Thermal Analysis of Heat Extraction Bore Holes”, Lund, Sweden, LIT, 1987.