

저온지열을 이용한 지열히트펌프시스템

안형준¹⁾

Introduction on The Geothermal Heat Pump System

Hyung-Jun An

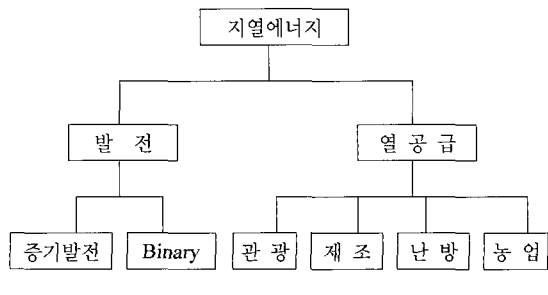
1. 서 론

암반공학에서 지하공간의 에너지저장에 대한 연구는 활발히 이루어져 원유 비축기지, 농수산물 저장창고 등이 실용화된 반면, 지열이용분야는 상대적으로 기술 개발이 저조하다. 이는 지열에너지의 이용이 가능한 이상고온대가 국내에 별로 존재하지 않기 때문이다. 따라서 지열에너지는 우리나라에서 실용성이 없는 것으로 치부되어 왔다.

그런데 최근 미국, 유럽에서는 10-20℃의 저온 지열을 이용한 냉난방기술을 개발하여 급속히 보급되고 있다. 지열히트펌프시스템(Geothermal Heat Pump System, or Ground Source Heat Pump System; GSHP)이라 불리는 이 기술은 지열을 히트펌프의 열원으로 활용하는 것으로 높은 에너지효율로 경제성이 높아 활발하게 보급되고 있다.

지열히트펌프기술은 최근 국내에도 도입되어 소규모 건물을 대상으로 적용되고 있는데 주요 기술을 해외에 의존하고 있어 국내 여건에 알맞은 기술 개발이 필요한 상태이다.

표 1. 지열에너지의 이용방법.



¹⁾코오롱건설(주) 기술연구소
접수일: 2002년 10월 30일
심사 완료일: 2002년 12월 13일

특히 국내 지질특성의 파악, 적합한 지열교환기 개발이 핵심적인 기술과제로 암반공학적인 접근이 요구된다. 이에 따라 지열히트펌프시스템의 현황에 대해 소개하고 국내 적용을 위한 주요 기술과제를 제시하고자 한다.

2. 지열에너지 개요

지열에너지의 활용방법은 표 1과 같이 지열발전(100℃ 이상), 직접 열이용(30℃이상), 간접 열이용(30℃이하)으로 나눌 수 있다. 고온지열과 저온지열의 에너지 기원이나 장단점 등의 차이점은 표 2와 같다.

표 2에서 볼 수 있듯이 저온지열은 어디에나 존재하고 고갈되지 않는 장점이 있으므로 적절한 활용기술을 개발하면 유용한 에너지원이 될 수 있다. 이러한 저온지열 활용의 대표적인 방법이 바로 지열히트펌프 시스템이다.

3. 지열히트펌프시스템 소개

지열히트펌프시스템은 지열원을 히트펌프의 열원으로 이용하는 시스템이다. 따라서 정확한 이해를 위해서는 지열원을 이용하는 방법, 히트펌프의 개념, 전체 시스템의 작동원리를 알아야 전체 기술에 대해 파악할 수 있다.

표 2. 지열의 종류별 차이점.

	고온지열	저온지열
기원	지각이동	태양에너지
지역	제한	무제한
특성	고갈성	재생성
장점	경제성 높음	일반적용 가능

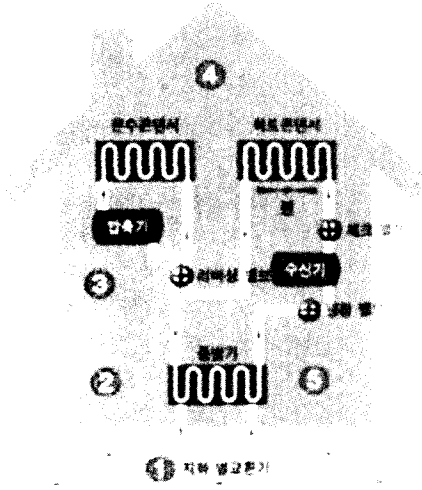


그림 1. 지열히트펌프시스템의 개요도.

3.1 지열히트펌프시스템의 개요

건물의 냉난방에 이용하는 지열히트펌프시스템은 크게 지열교환기, 히트펌프, 난방설비의 세부분으로 나누어 진다(그림 1).

전체시스템의 작동원리는 냉방의 경우를 예로 들어보면 다음과 같다. 1)지열교환기를 통해 10-20℃사이의 지열을 흡수하여 히트펌프로 전달한다. 2)히트펌프는 에어컨과 동일한 원리이며 온도를 높이거나 낮추어 냉온수 혹은 냉온기를 생산한다. 3)생산된 냉온수 혹은 냉온기를 공기덕트나 팬코일과 같은 난방설비로 공급한다.

위와 같은 작동원리에서 보듯이 지열히트펌프기술의 핵심요소는 히트펌프와 지열교환기이므로 보다 자세히 소개한다.

3.2 히트펌프의 소개

히트펌프란 열을 옮기는 도구로 물펌프가 물을 이동시키는 것처럼 열을 이동시키는 역할을 한다. 히트펌프라는 용어가 낯설지만 히트펌프는 이미 우리 생활에서 다양하게 사용되고 있으며 대표적인 것이 에어컨이나 냉장고이다.

히트펌프의 원리

히트펌프가 열을 이동시키는 원리는 기화 및 액화현상을 이용한 것이다. 알코올을 손에 바르면 시원함을 느끼게 되는 데 이는 알코올이 증발하면서 열을 빼앗아가기 때문이다. 이것이 기화열이며 반대로 기체가 액체

가 될 때는 액화열을 발생시킨다. 즉, 어떤 매질(에어컨의 경우 냉매)이 기화될 때는 열을 흡수하고 액화될 때는 열을 배출하게 되는 것이다.

이탈 그림1에서 열의 이동경로를 따라 살펴보면 히트펌프의 증발기에서 기화현상이 일어나면서 냉매가 열을 흡수하게 된다. 이렇게 흡수된 열은 압축기를 거치면서 고압기체상태가 된다. 이것이 응축기에서 액화되면서 열을 배출하게 된다. 따라서 응축기에 팬을 설치하여 온풍을 얻거나 혹은 온수콘덴서를 통해 온수를 얻게 된다.

에어컨을 예로 들면, 실내에서 냉매가 기화되며 열을 흡수한 후 실외기로 이동하여 액화되면서 그 열을 공기 중으로 배출하게 되는 것이다.

히트펌프의 장점

히트펌프는 가장 큰 장점은 에너지 효율이 매우 높다는 것이다. 만약 1Kwh의 전력으로 전기히터에서 열을 생산하면 에너지 보존법칙에 의해 1Kwh 이하의 열만 발생하지만 히트펌프에 적용하면 3-4Kwh의 열을 얻을 수 있다. 이는 히트펌프가 열을 생성시키는 것이 아니라 이동시키는 것이기 때문에 가능하다.

히트펌프의 효율은 주로 열공급원과 열배출처의 온도 조건에 따라 좌우된다.

지열이용의 장점

지열원은 항상 15-20℃로 유지되어 히트펌프의 열원으로 가장 적합하다.

공기중에 열을 배출하는 에어컨과 지열을 이용하는 히트펌프를 서로 비교해보면, 여름 냉방의 경우 에어컨은 30℃이상인 공기 중으로 열을 배출하고 지열히트펌프는 20℃ 이하인 지중으로 열을 배출하는데 당연히 후자의 열배출이 훨씬 용이하다. 반대로 난방의 경우 에어컨은 영하의 공기중에서 열을 흡수하고 지열히트펌프는 15℃이상인 지중에서 열을 흡수하므로 높은 열효율을 가진다.

이처럼 지열원은 냉방, 난방에 모두 높은 효율을 가진다. 다음으로 지열원은 에너지저장효과가 있다.

즉, 여름에 냉방열을 100만큼 지중에 배출하면 이 냉방열의 약 70%정도가 난방이 필요한 때까지 저장된다. 따라서 이 저장된 열을 난방에 활용하여 효율은 더욱 높아지게 된다.

3.3 지열교환기의 소개

지열교환기란 땅속의 지열을 흡수하거나 혹은 땅속으로 열을 배출하는 장치를 의미한다. 지열을 이용하는

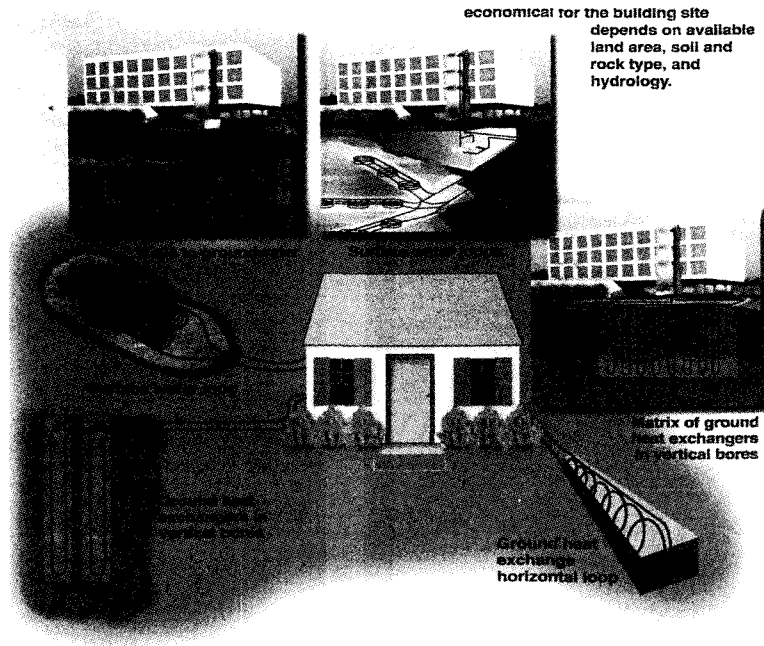


그림 2. 다양한 지열교환기의 종류.

방법은 그림 2와 같이 지하수 이용법, 지표수 이용법, 파이프 매설법 등이 있다.

각각의 방법은 장단점이 있으나 지하수나 지표수는 존재여부에 따라 적용이 제한되는 문제가 있다. 따라서 제약조건이 적은 파이프매설법이 가장 일반적으로 사용되고 있다.

파이프매설(폐쇄형) 지열교환기

파이프매설 지열교환기는 미국 오클라호마 주립대학에서 1970년대에 개발된 것으로 땅속에 파이프를 묻고

그 파이프 내에 부동액을 순환시켜 지열을 흡수하거나 열을 땅속으로 배출시키는 장치를 말한다.

파이프매설 지열교환기는 파이프를 설치하는 방식에 따라서 수직형과 수평형으로 나뉘며 설치면적이 적은 수직형이 많이 사용된다.

수직형은 50~350 m 깊이로 보어홀을 뚫은 후 2.5~5.0 cm 직경의 HDPE 파이프를 넣어 땅속의 지열을 흡수할 수 있도록 구성되어 있다(그림 3). 파이프를 묻은 후에는 그라우팅을 실시하여 외부 오염물질이 지하로 침투하거나 지열이 외부로 배출되는 것은 막는다.

수직형 지열교환기는 40~60 m당 1RT급의 냉난방 부하를 감당하는데 이는 대략 일반건물 10평 정도의 냉난방용량이다.

수평형 지열 교환기는 땅속 1.2~2.0 m 깊이에 도랑을 파서 파이프를 묻은 후 지열을 흡수할 수 있도록 개발되었다.

수평형의 경우 시공이 쉽고 비용이 적지만 넓은 대지가 필요하여 사용이 제한된다. 대체로 도랑길이 70~90 m당 1RT급의 냉난방부하를 감당한다.

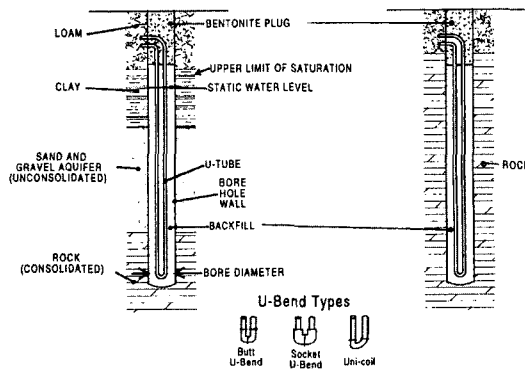


그림 3. 수직형 지열교환기의 설치형태.

지하수형 지열교환기

지하수는 지열을 활용하는 가장 일반적인 방법으로 지하수를 끌어올려 열교환을 한 후 다시 지하로 주입하거나 하천으로 배출하는 방법이다.

지하수형 지열교환기는 지하수여건에 따라 제약을 받지만 지하수가 많은 경우 대형건물에 경제적으로 적용할 수 있다. 최근 중국에서는 지하수형 지열교환기를 이용하여 33층의 대형고급아파트와 4만평규모의 대형 사무용 빌딩에 지열히트펌프시스템을 적용하고 있다.

지표수형 지열교환기

하천, 호수 등은 태양열, 지열을 흡수하여 대기온도에 비해 안정적이다. 따라서 대규모 하천, 호수, 바다에 인접한 경우에 지표수를 이용하여 경제적으로 지열히트펌프시스템을 구축할 수 있다. 미국에서 강물을 이용하여 4만평 이상의 규모를 가진 대형빌딩에 적용되었다.

3.4 지열히트펌프시스템의 장단점

지열히트펌프시스템의 장점은 다음과 같다.

- 보일러, 에어컨에 비해 에너지 효율이 30-70%이상 높다.
- COx, NOx 등의 대기오염의 오염물질 배출이 없다.
- 난방열, 냉방열의 대기중 배출이 없다.
- 냉난방 조절이 편리하며 쾌적하다.
- 내구성이 높아 관리비가 절감된다.
- 여름철의 냉방 피크부하를 줄여준다.

반면 시스템의 단점은 다음과 같다.

- 대지여건, 지질여건에 제한을 받는다.
- 지열교환기 설치로 인해 초기투자비가 증가한다.

지열히트펌프시스템은 단점에 비해 장점이 많고 에너지효율성, 쾌적성이 높아 미래 냉난방수요에 적합하다.

따라서 기술개발을 통해 부지조건 제약, 초기투자비 증가 등의 문제가 해결되면서 보급이 크게 증가하고 있다.

3.5 지열냉난방시스템 보급 현황

지열히트펌프시스템은 미국을 위주로 현재 약 80만대가 보급되었고 매년 10만대 이상이 여러 건축물에 적용되고 있다.

유럽은 겨울철 기온이 낮은 북유럽이나 독일, 스위스 등지에서 주로 사용되며 약 8만대 이상이 보급되어 있다.

최근 중국에서 지하수 방식의 지열히트펌프시스템이 대형건물에 적용되고 있다.

주요 적용사례는 다음과 같다.

Empire State building

- 개요 : 미국 뉴욕 102층 빌딩



그림 4. Galt House Hotel.

- 방식 : 지하수 지열교환기 방식
- 용량 : 약 2,000평 적용
- 특징 : 리모델링을 통해 지열히트펌프시스템을 일부 적용중

Galt House Hotel

- 개요 : 미국 루이즈빌 3개 복합건물 (25층 2동, 15층 1동)
- 방식 : 지하수(강물) 지열교환기 방식
- 용량 : 총 48,000평 적용
- 특징 : 세계 최대의 지열히트펌프시스템으로 설치비 및 유지비 절감

Antiqua Condo

- 개요 : 미국 마리랜드 14층 콘도
- 방식 : 수직형 지열교환기 방식
- 용량 : 총 2,000평 적용
- 특징 : 바닷가에서 부식되기 쉬운 실외기를 제거 (유지관리비 절감)

Fort Polk Village

- 개요 : 미국 루이지애나 군기지 (오피스, 주택 총 4000채)
- 방식 : 수직형 지열교환기 방식
- 용량 : 약 6만평
- 특징 : 세계 최대의 주거단지 지열히트펌프시스템 적용사례

Concordia building

- 개요 : 중국 33층 고급아파트
- 방식 : 지하수 지열교환기 방식
- 용량 : 약 1만평 규모

- 특징 : 중국자체기술로 지하수형 지열교환기 개발

3.6 지열히트펌프시스템의 국내적용성

국내에는 미군 용산기지를 비롯해 약 160여 건의 적용실적이 있다.

지금까지의 적용사례를 통해 살펴보면 국내 지질여건이나 기후여건은 지열히트펌프기술의 적용에 매우 적합하다.

우선 국내 지질여건을 살펴보면 주요 암종이 화강암이나 화강편마암으로 열전도도가 높고 대부분의 지역에 지하수가 분포하여 지열교환에 유리하다. 다만 굴착비용이 증가하는 단점이 있다.

다음으로 우리나라의 기후조건을 살펴보면 냉난방이 모두 필요한 온대기후로 활용성이 높다.

마지막으로 경제수준의 향상에 따라 냉난방수요가 급증하고 에너지자원이 빈약하여 대체에너지 및 에너지 절약이 절실한 에너지조건도 지열히트펌프시스템의 적용에 유리하다.

이러한 우수한 적용환경을 갖고 있음에도 불구하고 보급이 미진한 이유는 지열히트펌프기술의 특성상 해당지역의 특성에 맞는 지열관련 기술개발이 필수적인데 국내에서는 아직 체계적인 기술개발이 이루어지지 않고 있기 때문이다.

4. 지열히트펌프시스템의 기술사항

지열히트펌프시스템은 앞서 살펴본 바와 같이 지열교환기, 히트펌프, 냉난방 설비로 구성된다. 지열히트펌프시스템은 냉난방부하, 대지여건, 지질여건 등을 종합적으로 고려하여 적용되어야 하며, 특히 적합한 지열교환기의 설계 및 시공이 가장 중요한 요소이다.

4.1 지열히트펌프시스템의 설계

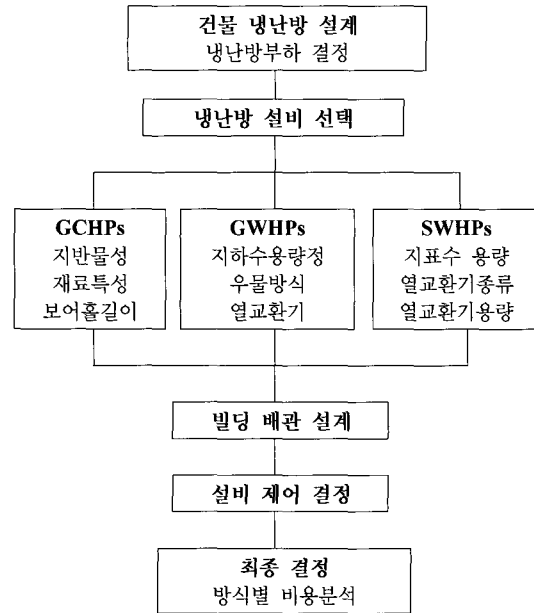
지열히트펌프시스템의 설계과정을 표3과 같다.

히트펌프시스템은 일반 보일러와는 달리 부분가동이 어려워 적절한 용량으로 설계되지 않으면 성능이 급격히 저하된다. 따라서 건물의 냉난방부하를 정확하게 예측하여 적합한 용량의 히트펌프와 지열교환기를 설계해야 한다.

4.2 지열교환기 설계를 위한 필요기술

지열교환기는 한번 설치하면 교체나 수정이 어렵기 때문에 정확한 설계를 하지 않으면 실패를 가져올 수 있다. 만약 지열교환기가 너무 작아서 충분한 열원을 공급하지 못하면 전체 시스템의 정상적인 작동이 불가

표 3. 지열냉난방시스템의 전체 설계 순서.



능하고 지열교환기가 너무 커지면 초기투자비가 많이 들어 경제성을 확보할 수 없게 된다.

따라서 정확한 설계를 위해 다양한 시험과 분석이 필요한데, 주로 사용되는 수직형 지열교환기에 대한 기본 이론, 지질시험, 수치해석 등의 각종 기술적 사항에 대해 소개한다.

수직형 지열교환기의 이론

수직형 지열교환기의 열전달과정은 line source theory로 설명된다. line source theory는 선열원으로 인한 매질의 열전달을 나타내는 이론으로 수직형지열교환기를 잘 설명한다.

이론에 의하면 정상상태의 단위길이당 열전달률 Q_s 는 다음과 같다.

$$Q_s = k_s S_s (T_1 - T_2)$$

여기서, Q_s = 열전달율 (W/m)

k_s = 열전도도 (W/mK)

S_s = 전도형상계수

T_1 = 경계 온도($^{\circ}C$)

T_2 = 열원 온도($^{\circ}C$)

열전달률 Q_s 는 $k_s \cdot S_s$ 에 따라 결정된다. 또한

$k_s \cdot S_s$ 는 매질의 열전도도와 열원의 형태에 따라 결정된다. 일반적으로 복합매질인 경우 $k_s \cdot S_s$ 를 구하기 위해 $k_s \cdot S_s$ 의 역수인 열저항 R 를 이용한다.

지열교환기의 경우 주요 매질은 지반과 파이프를 구성되며 열전달을 Q_s 는 아래식과 같다.

$$Q_s = \frac{1}{R_p + R_s}(T_1 - T_2)$$

R_s = 지반의 열저항 (W/mK)
 R_p = 파이프의 열저항

위 식에 따라 단위길이당 열전달율을 구하면 냉난방 부하와 비교하여 필요한 보어홀 길이를 구할 수 있다.

난방열 공급에 필요한 길이 :

$$L_H = \frac{(C_h) \left(\frac{COP_H - 1}{COP_H} \right) (R_p + R_s \cdot RF_h)}{T_{min, annual} - T_{min}}$$

냉방열 배출에 필요한 길이 :

$$L_H = \frac{(C_c) \left(\frac{COP_C - 1}{COP_C} \right) (R_p + R_s \cdot RF_c)}{T_{max} - T_{max, annual}}$$

지열원 파악을 위한 현장시험법

지반 열물성을 파악하는 방법은 문헌조사, 실내시험, 현장시험 등으로 나눌 수 있다. 본고에서는 수직형 지열교환기의 현장시험법에 대해 소개한다.

이 시험법은 실제 지열교환기가 가동될 때 열교환 성능을 측정하기 위해 개발된 것으로 시험방법은 다음과 같다.

- ① 수직형 지열교환기를 설치한다.
- ② 지열교환기에 일정 온도의 부동액을 순환시킨다.
- ③ 지열교환을 거치면서 변화된 온도를 측정한다.

시험의 실시결과는 그림 5와 같다. 그래프에서 시간별로 지열교환에 따른 부동액의 온도변화를 분석하여 지반의 정확한 열전달률을 구하게 된다.

수직형 지열교환기의 수치해석

지열교환기로 인해 지중에는 열이 축적되거나 혹은 열이 배출된다. 따라서 장기적으로 지중온도가 변화하여 지열교환기의 성능이 변하고 지중 환경에 악영향을 끼칠 수 있다.

이러한 지중온도 변화를 파악하기 위해 수치해석을 실시한다. 수치해석방법은 다음과 같다.

- ① 초기의 지중온도, 지반물성 등 모델을 구성한다.
- ② 냉난방부하, 운전시간 등의 입력자료를 작성한다.
- ③ 시스템 작동에 따라 시뮬레이션하여 장기간의 지중의 온도변화를 계산한다.

수치해석을 통해 지열교환기의 주변의 온도 변화양상을 시간별로 볼 수 있다. 또한 이에 따른 지열교환기의 성능변화, 지중환경 변화를 분석할 수 있다.

그림 6은 2년간에 걸친 해석결과이다. 그래프를 살펴보면 시작지점은 겨울로 난방을 위해 지열을 흡수하여 지중온도가 낮아진다. 점차 여름이 다가오면 냉방열을 지중에 배출하여 다시 지중온도가 증가한다. 이러한 온도변화 패턴은 해마다 반복된다. 이때 지중의 최고, 최저온도가 히트펌프의 정상가동을 위한 온도범위 내에 존재해야 시스템이 원활하게 가동된다.

Yongsan Embassy Housing Project, Seoul, South Korea
 July 27 - 29, 2000

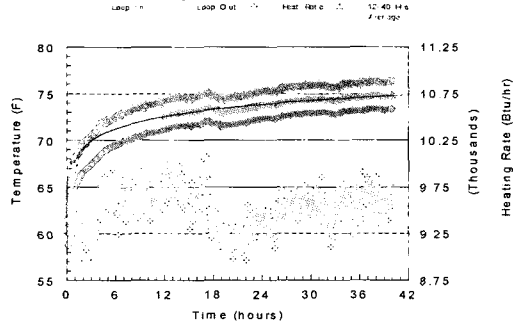


그림 5. 지열교환기의 현장시험결과.

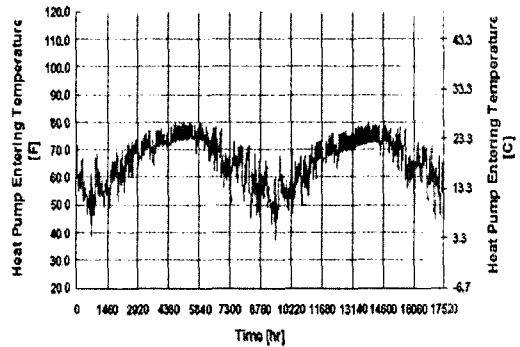


그림 6. 순환수의 시간별 온도변화.

4.3 지열교환기의 실제 설계과정

IGSHPA(International Ground Source Heat Pump Association)에서 제시하는 수직형 지열교환기의 설계 과정은 다음과 같다.

- 1단계 : 지반 열전도도 등 기초자료 확보
- 2단계 : 설치 예정지역의 지중온도 파악
- 3단계 : 히트펌프의 허용 지중온도 파악
- 4단계 : 부동액의 순환온도 결정
- 5단계 : 파이프의 열저항 계산
- 6단계 : 지반의 열저항 계산
- 7단계 : 가동시간 및 용량 계산
- 8단계 : 지열교환기의 규모 계산
- 9단계 : 지열교환기 배열방법 결정

4.4 수직형 지열교환기 설치방법

지열교환기의 설치는 보어홀 굴착 - 파이프 삽입 - 그라우팅의 순서로 이루어진다.

5. 국내 적용을 위한 기술적 과제

지열히트펌프시스템을 활발히 이용하기 위해서는 지열교환기의 설계기술과 경제적인 설치기술을 개발해야 한다.

이를 위한 기술개발항목은 다음과 같다.

지중 열특성 파악(열물성, 지중온도)

지중 열특성 자료는 지열원을 정확히 파악하기 위한 기초자료로 토양, 암석의 열전도도, 지하수 상태, 지중온도분포 등이 포함된다. 정확한 지중 열특성 파악을 위한 다음과 같은 기술개발이 필요하다.

- 지하수 상태 및 대수특성 시험평가
- 열물성 시험기법 및 데이터베이스구축
- 지역별 지온분포 데이터베이스구축

지반굴착(보어홀 굴착, 그라우팅)

지열교환기의 설치비에서 지반굴착비용이 큰 비중을 차지하므로 적합한 지반굴착 기술이 요구된다. 주요 기술과제는 다음과 같다.

- 굴착기술 별 경제성 평가
- 화강암질에 적합한 굴착기술 개발
- 적합한 굴착깊이 분석

재료개발(매설 파이프, 그라우팅재료)

수직형 지열교환기의 주요 재료는 파이프와 그라우팅

재이다. 열교환이 용이하고 경제적인 재료의 개발이 필요하다. 주요과제는 다음과 같다.

- HDPE 이외의 파이프재료 개발
- 파이프 형상 및 직경 등의 변경
- 열전도 그라우팅 국산화

지열교환기 개발

경제성을 높이고 현지 여건에 맞는 지열교환기 개발이 필요하다. 대표적인 개발과제는 다음과 같다.

- 말뚝형 지열교환기 : 말뚝에 지열교환기를 넣어 설치비용과 부지면적을 줄인다.
- 복합형 지열교환기 : 태양열, 하수열을 보조열원으로 하여 지열교환기의 설치비용을 줄이고 효율을 높인다.
- 지하공간 활용 : 지하철, 지하상가 등의 지열발생을 이용한 지열교환기 개발

이러한 지열교환기 개발은 적용대상, 지역특성, 지질 특성 등에 따라 다양한 개발가능성을 가지고 있으므로 지속적인 개발이 필요하다.

적용대상 개발

건물냉난방뿐만 아니라 도로 용설, 농업, 양식, 지역냉난방 등 적용범위를 확대할 수 있는 기술개발이 필요하다.

6. 결 론

지열히트펌프시스템은 에너지 효율이 높고 쾌적한 냉난방을 제공하며 국내 지질여건과 기후여건에 적합하다. 따라서 기술개발을 통해 보다 활발히 보급될 수 있도록 암반공학자들의 많은 관심과 참여가 필요하다.

참고문헌

1. IGSPHA, 1988, Closed Loop/Ground Source HeatPump Systems - Installation Guide, OSU.
2. S.P.Kavanaugh, 1997, Ground Source Heat Pumps - Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings, ASHRAE.
3. C.Yavuzturk, 1988, Modeling of Vertical Ground Loop Heat Exchangers for Ground Source Heat Pump Systems, Thesis, OSU.
4. P.J.Hughes, 1998, The Evaluation of a 4000-Home Geothermal Heat Pump Retrofit at Fort Polk, Louisiana : Final Report, ORNL.
5. P.J.Lienau, 1995, Ground-Source Heat Pump Case Studies and Utility Programs, Geo-Heat Center.



안 형 준

1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과
학사

1996년 서울대학교 대학원 자원공학과
석사

Tel: 031-280-8714

E-mail: hjan@kolon.com

코오롱건설(주) 기술연구소 근무
