

## 2. 특집기사

### 지열 히트펌프 기술개발 동향

#### Technical Trend of Geothermal Heat Pump



윤 정 인

Jung-In Yoon

- 부경대학교 교수
- 본 학회 사업이사
- (사)대한냉동협회 편집이사
- Email : yoonji@pknu.ac.kr

#### 1. 지열 히트펌프 시스템의 배경

지중은 방대한 열용량을 가지고 있으며, 장소적·시간적으로 이용하기 편리하고, 온도 레벨이 안정되어 있어 히트펌프의 열원으로 옛부터 그 가능성이 예견되어 왔었다. 이미 1912년에 스위스의 H. Zoely가 그 방법을 생각하고 특허 신청을 하였다. 이론 및 실증에 관한 본격적인 연구가 이루어진 것은 제 2차 세계대전 이후이다. 먼저 1946년에 영국의 Carslaw & Jaeger가 열전도이론에 관한 명서 「Conduction of heat in Solid」를 발행하였는데, 여기서 그는 대지를 열원으로 하여 사용하는 응용예를 보여주고 있다.<sup>(1)</sup>

같은해, 미국의 Kelmer는 「Heat for the Heat Pump」라는 해설기사에서 「이용가능성이 있는 열원중에서 가장 보편성이 있는 풍부한 것은 대지이다.」라고 하였다. 채열형태로서는 부동액

순환방식에 의한 수직형(U튜브형), 수평형, 그리고 매설관을 히트펌프의 증발기로 하는 직팽방식에 관하여 해설하고 있다.<sup>(2)</sup>

1948년에 미국의 Ingersoll와 Kelvin은 무한고체중의 무한선원주위의 온도 변화에 관한 이론(이후 Kelvin의 이론)을 응용하여, 매설관주위의 땅속의 온도변화 및 매설관의 상호간섭에 대하여 응용 예를 보여주고 있다.<sup>(3)</sup> Kelvin의 선원이론은 간편할 뿐더러 열량과 온도의 선형성이 성립되기 때문에 특히 복잡한 매설관 배치계획에 유효하여 현재도 간단하고 쉬운 예측이나 설계지침의 계산에 이용되고 있다. 미국의 일련의 연구는 전력에너지 위원회의 지원에 의한 것이었으며, 이 위원회에서 1946년부터 12곳에 대규모적인 실험을 하여 땅속 물성치의 측정을 포함하여 결과를 발표하고 있다.<sup>(4)</sup>

일본에서는 1960년대 중반이후에 히트펌프에

관계된 연구가 시작되어 잠시 중단되었으나, 1973년과 1978년에 재차 이루어진다. 석유위기를 계기로 다시 한번 국제 에너지 기구(IEA) 및 유럽 각국이 중심이 되어 연구·개발이 시작되었다. 1978년에는 「개량형 히트펌프시스템」에 관한 연구개발 실시협정이 유럽 11개국에 의해 체결되었다. 19건의 Annex중의 3건은 지열원 히트펌프시스템에 관계하는 것이었다.

최근 미국의 큰 흐름은 1993년 4월에 미국환경보호국(EPA)가 출시한 보고서 중에 「미래에 등장 할 고효율 지열원 히트펌프시스템이 가장 연간 에너지 효율이 높고, 환경부하가 낮은 시스템이다」라고 결론짓고 있다. 이것이 발단이 되어 1995년에 기후변동행동계획의 하나로 DOE의 Action Plan No. 26에 지열원 히트펌프조합(GHPC, The Geothermal Heat Pump Consortium, Inc.)이 설립되어, 본격적인 보급 프로그램을 시작하였다. 당초 연간 40만대 설치 목표가 2005년까지로 연기되기는 하였으나, 미국에서의 이 시스템의 설치건수가 40만대 정도가 되고 있고, 신축이나 설비 갱신때에는 반드시 비교 검토되는 일반적인 시스템으로 성장하였다. 또, 오하이오 주립대학의 J. Bose교수가 1987년에 발족한 국제지열 히트펌프협회(IGSHPA, International Ground Source Heat Pump Association)는 다각적인 활동을 전개하고 계몽·보급에 앞장서고 있다.

본고에서는 최근 국내에서도 관심이 집중되고 있는 크린에너지중 지열 히트펌프에 관한 개발동향을 Nagano교수가 정리한 “지열 히트펌프”<sup>(5)</sup>를 중심으로 역사와 배경 및 기술적 분류와 실시예 등에 관하여 소개하고자 한다.

## 2. 지열 히트펌프시스템의 분류

지열원 히트펌프시스템은 일반적으로 지상부의 히트펌프 및 열교환기 유닛과 지중에 매설된 지중 열교환기로 구성된다. 그림 1에 지열원 히트펌프시스템의 열교환기에 의한 분류를 나타내었다. 시스템은 자연회복형의 수평매설(Horizontal Ground Closed Loops), 축열형의 수직매설(Standing

Column Well System, or Vertical Ground Closed Loops)로 크게 나뉜다. 한편 호수와 가까이 있는 경우는 코일을 수몰시키고 열교환 하는 방식(Pond Closed Loops)이나, 지하수가 풍부한 장소에는 그 물을 직접열원으로 순환시켜 사용하는 방식(Open Type)도 넓은 의미로 여기에 포함된다.

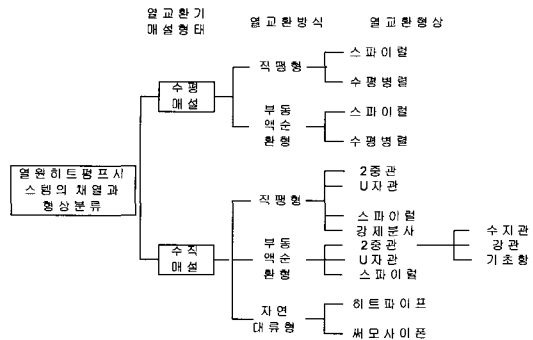


그림 1. 지열 히트펌프 시스템의 열교환기에 의한 분류

수평매설방식에서는 열교환기를 깊이 1~2 m에 평면적으로 매설한다. 큰 토지면적을 필요로 하지만 매설공사는 용이하기 때문에 일반적으로 소규모난방 중심의 시스템에 채용된다. 지중온도의 자연회복을 기대할 수 있지만 축열효과는 없다.

수직매설방식은 열교환기를 지중 깊게 수직 또는 방사상으로 설치하는 것이기 때문에 보링공사가 필요하지만, 필요한 토지면적은 수평방식에 비해 작다. 격자상으로 배치한 경우에는 축열효과를 기대할 수 있다. 단, 온도의 자연회복에 한계가 있기 때문에 일방적인 채열이나 방열을 하는 경우나 여름·겨울의 배런스가 무너진 운전을 하면 지중온도가 저하, 또는 상승하여, 히트펌프가 운전불능이 될 우려가 있다. 수직매설방식에서는 종래, 우물을 굴삭하여 강관을 매설하고, 여기에 열매순환용 배관을 하는 이중관방식(Standing Column Well System)이 일반적이었지만, 요즘은 유럽·미국에서는 긴 폴리에틸렌관을 U자 상태로 우물에 투입하는 U튜브방식(Vertical Ground Closed Loops)이 채용되고 있다. 그림 2는 수직매설방식과 수평매설방식의 비교를 나타낸 것이다.

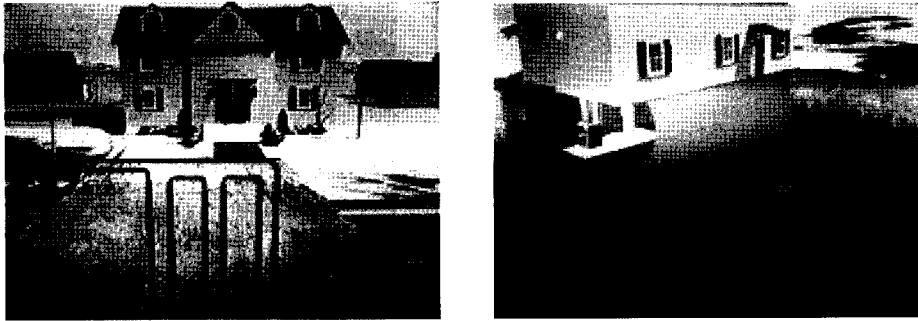


그림 2. 수직매설방식과 수평매설방식

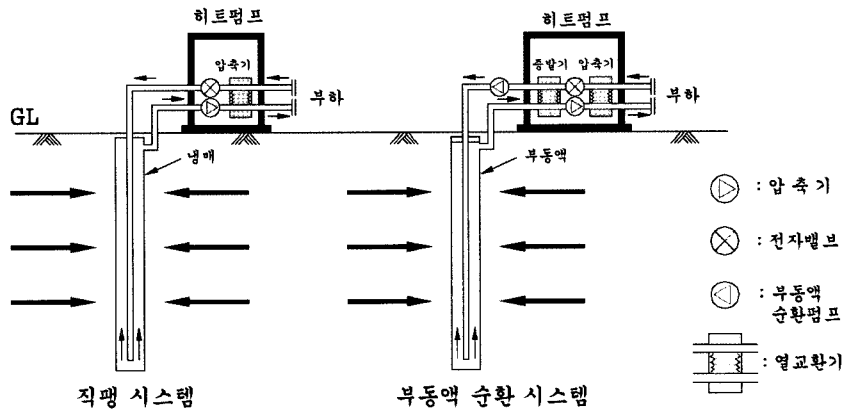


그림 3. 부동액순환시스템과 직팽시스템의 개요

지중과의 열교환방식으로 본다면 그림 3에 보여진 부동액등의 이차적인 열매를 개입시키는 부동액순환시스템과 냉매를 직접 지중열교환기내에 통과시켜는 직팽시스템으로 분류된다. 전자는 널리 범용 패키지 히트펌프를 이용할 수 있는 점과 보수나 점검이 용이하기 때문에 최신에는 대부분 이 방식을 채용하고 있다. 또, 지중열교환기와 열이용층을 직결함으로써 융설이나 바다 냉방과 같이 히트펌프를 이용하지 않고 지중 열을 직접 이용하거나, 태양열이나 배열을 축열에 활용할 수 있는 조합이 가능하다는 특징이 있다.

한편, 직팽 시스템은 난방전용으로 사용되는 경우가 많다. 이때 지중 열교환기는 증발기로서 작동한다. 부동액순환시스템에 비해 부동액순환 펌프나 열교환기가 불필요한 점, 냉매와 부동액과의 이

차적인 열교환기가 불필요하기 때문에 효율과 경제성 양면에서 우수하다고 할 수 있다. 그러나 냉방시의 냉매 회수 문제, 냉매보입량이 다량인 것 등때문에 사용에는 적다. 그 외 히트파이프나 써모사이폰을 이용하여 지중열을 퍼올리는 방식이 연구되어 왔으나 실용화되지는 않았다.

### 3. 지열 히트펌프의 실용예

일본에서 지열원 히트펌프시스템이 상업적으로 성공한 것은 1980년대 초, 홋카이도를 중심으로 소규모 호텔이나 병원, 맨션 등에 30건 정도 채용되었던 것이 시작이라 할 수 있다. 비교적 대규모 시설은 1984년 삿포로 시내의 분양맨션의 중앙냉난방 급탕시스템에 지열원 히트펌프가 적용되었

다. 설치된 히트펌프의 총용량은 약 30kW로 기존 제품을 이용하여 지열원용으로 개량했던 것이다. 지중열교환기로서 깊이 100m 의 이중관형 수직매설관 10본이 설치되었다. 채열에 의해 온도가 낮아진 지중은 여름철 냉방 배열을 방열함에 따라 회복하게 된다. 설치부터 현재까지 17년 이상 가동되고 있다.

또 1983년에 샛보로 시내의 노인병원(면적 2827m<sup>2</sup>)의 냉난방, 급탕시스템의 적용예가 있었다. 히트펌프의 용량은 심야전력 30kW, 상용전력 30kW에 달하고, 열교환기는 깊이 90m의 이중관형(직경 50A) 9본으로 되어있다. 채열량에 비해서 열교환기의 용량이 작아 운전개시부터 지중온도가 수년후에는 낮게 되어 히트펌프 운전이 곤란하게 되었다. 그러나 최근 휴양소 및 공공시설의 냉난방, 그리고 도로용설 및 동결방지방식이 대규모로 채용되고 있다. 또, 1997년에는 홋카이도 대학구내에 설치된 에너지 실험 주택의 난방으로 바닥난방과 조합된 지열원 히트펌프가 적용되었다. 실측에 따른 열수요에 대하여 공급에너지원 비율(일본 북해도대학 실험주택)을 그림 4에 나타내었다. 그림으로부터 지중열이 36% 차지하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 홋카이도와 같은 한랭지에 있어서 자연에너지를 이용하는 지열원 히트펌프에 의한 난방이 저에너지화에 큰 역할을 하고 있다는 것을 의미한다.

국내의 경우 지열원 히트펌프가 도입되고 있는 것이 극히 최근의 사례라 그리 많지는 않으나, 최근 대체에너지개발이라는 정부 시책에 발맞추어 관련 업체들이 많이 늘고 있는 실정이다. 그림 5에는 최근 한국의 J사에서 지열 히트펌프를 설치한

예를 나타내고 있다.

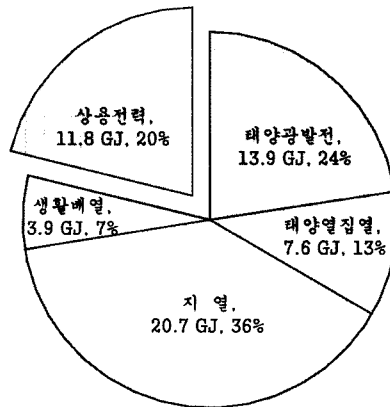


그림 4. 연간 에너지 공급원 비교예

#### 4. 지중 열교환기의 기본적 설계방법

지중열은 주로 전도에 의한 열이동으로 이용되기 때문에, 이용측에서 보면 다른 자연에너지 이상으로 저플럭스 에너지원이다. 따라서 지중열을 이용하기 위해서는 예상이상의 열교환기를 설치하는 것이 필요하게 된다. 따라서, 시스템의 도입에는 채·방열량에 적합한 지중열교환기의 규모를 정확하게 계산하여야 한다.

##### 4.1 토양 물성치의 측정과 추정

토양 물성치 측정을 위해서는 사전에 시굴하여 실측하는 것이 바람직하다. 열전도율 측정에는 비정상열선 프로브법이 유효하다. 그러나, 조사비용과 시간으로 인해 실측은 쉽지 않다. 따라서, 실제

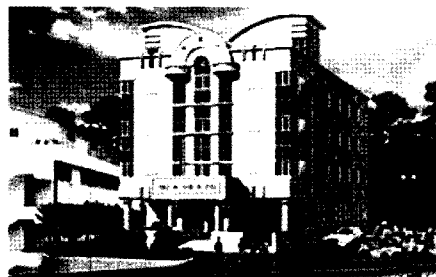
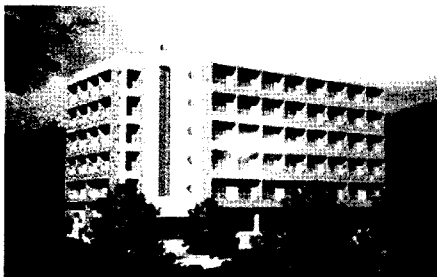


그림 5. 최근 지열 히트펌프 시공예

로는 공적기관 등이 가지고 있는 지역의 지층데이터를 취득하여, 토질이나 지하수위, 열전도율, 열용량을 추정하는 것이 필요하게 된다.

최근에는 사전에 1분의 지중열교환기를 사용하여 열응답시험(Thermal Response Test)을 행하는 일이 많아지고 있다. 시험방법은 외부 히터에 일정발열을 하여 수시간에서 수주간, 연속적으로 지중열교환기에 온수를 순환시켜, 그 때의 온수온도의 시간변화를 관측하는 것이다. 측정기간에 온수온도를 10~15℃ 상승시키는 것이 일반적이다. 얻어진 온도응답은 수분이동이나 열교환기와 지중과의 접촉저항 등을 포함한 것이나, Kelvin의 선원이론을 적용하면, 상기의 영향을 포함해서 열전도율을 구하는 것이 가능하다. 이 값을 기초로 현장에 적용하여 채·방열가능량을 견적할 수 있다.

4.2 체열·방열온도

지열원 히트펌프의 성능은 적어도 공기열원에 비해서는 고효율이어야 한다. 따라서, 난방 시즌의 체열온도는 기간 평균 외기온보다도 높고, 냉방 시즌의 방열온도는 기간 평균 외기온보다도 낮지 않으면 안된다. 일반적으로 변동폭은 평균온도±1.5℃이내일 필요가 있다.

4.3 지중열교환기의 부하 추정

평균체열온도와 평균방열온도가 결정되면, 사용하는 히트펌프의 능력선도에서 평균적인 COP가 구해진다. 건물의 열부하와의 밸런스로 부터 지중에서의 체열량과 지중에의 방열량이 구해진다. 이것을 지중열교환기에 입력하여, 기간종료시의 체열·방열온도가 예상 설정했던 온도진폭이내가 되는 열교환기의 관경, 길이, 분수를 구한다.

4.4 Kelvin의 이론과 그 응용

열부하가 주어진 경우의 관벽위치의 고체온도변화는 다음과 같은 Kelvin의 이론에서 구할 수 있다. 무차원 온도  $T^*$ 는

$$T^* = I(X), \quad T^* = \frac{2\pi\lambda T}{Q}$$

여기서,  $T$ 는 온도[℃],  $\lambda$ 는 열전도율[W/mK],  $Q$ 는 열량[W/m]을 나타낸다.

무차원시간  $X$ 는

$$X = r/2\sqrt{at}$$

여기서,  $r$ 은 직경방향거리[m],  $a$ 는 온도전도율 [ $m^2/s$ ],  $t$ 는 시간[s]을 나타낸다.

$$\text{무차원온도응답 } I(X) = \int_x^\infty \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta$$

이 이론식은 무한 고체중의 무한히 가늘고 긴 열선에서 일정열량  $Q$ 가 발열하고 있는 경우의 시각  $t$ , 선원에서 거리  $r$ 의 고체온도를 구하는 것이다. 열이동이 현열인 열전도만의 계산이기 때문에 지하수흐름의 영향 등에 대해서는 별도의 보정이 필요하다. 실제 지중열교환기는 지표면이나 하부 끝 부분의 영향을 받으나, 수직매설관을 이용한 수개월간 계속되는 열의 출입에 있어서는 끝부분의 영향은 작고, 유한길이의 열교환기 평균표면온도도 Kelvin의 이론에 있어 관벽위치의 고체온도와 동등하게 보아도 좋다.

무차원온도 응답을 나타내는 적분지수계수  $I(x)$ 는 프로그래밍하여 사용하는 것이 일반적이거나 여기서는 표계산 소프트로 간단하게 계산되도록  $X$ 의 구간을 세 개로 나뉘 이하의 근사식을 나타내었다.

$$X \leq 3.0, \quad I(X) = -0.995 \ln(X) - 0.252$$

$$0.3 < X \leq 1.0, \quad I(X) = 2.46 \exp(-3.10X)$$

$$1.0 < X, \quad I(X) = 7.00 \exp(-4.07X)$$

표계산 소프트 등에 이 조건식과 계산식을 넣으면, 어떤 열량을 연속적으로 채·방열한 경우의 관벽 위치나 떨어진 장소의 온도를 구할 수 있다.

Kelvin의 이론으로부터 일반적으로 다음과 같은 정량적 또는 정성적인 중요한 견해를 얻을 수 있다.

- (1) 채·방열을 반년마다 반복하는 주기운전으로 관벽위치의 온도변동폭을 ±15℃ 이하로 억제하기 위해서는 관경 100mm의 경우 채·방열량을 20W/m 이하로 하지않으면 안된다.
- (2) 열전도율이 2배로 되면, 허용 채·방열량도 2배로 된다.
- (3) 관경을 크게 하면 온도의 진폭을 작게 할 수 있으나, 그 효과는 작다. 예를 들어, 관경을

100mm에서 200mm로 2배로 하여도, 관벽위치의 온도의 진폭은 14%밖에 감소하지 않는다.

(4) 관의 재질, 두께, 열매의 관내부 열전달률 등의 열저항은 등가적으로 관경의 감소와 치환하여 생각할 수 있으나, 이런 영향은 그렇게 크지 않다. 재료는 그것의 열전도성보다도, 지중매설관과 주위지중과의 밀착성을 중시해야 한다.

(5) 30일 후의 온도는 180일 후의 온도의 82%이다. 따라서 사전의 열응답시험은 30일 정도 하면 충분하다.

다음으로, 매반년에 채·방열을 반복하는 계산 방법을 그림 6에 나타냈었다. 예로써, 매반년에 연속 20W/m를 방·채열하여, 2년째의 채열 종료시의 관벽온도를 구해보자. 2년째의 채열 종료시점에서 역으로 시간을 잡으면,  $-40\text{W/m} \times \text{반년간}$ ,  $40\text{W/m} \times 1\text{년간}$ ,  $-40\text{W/m} \times 1\text{년반}$ , 그리고  $20\text{W/m} \times 2\text{년간}$ 의 채열·방열량에 의한 온도응답을 가산함으로써, 2년째 채열 종료시의 관벽온도를 구할 수 있다.

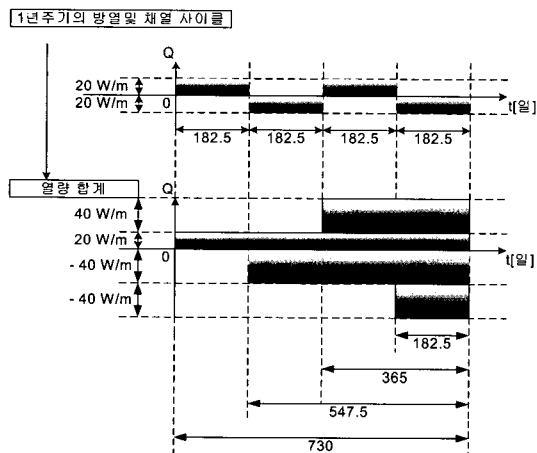


그림 6. 채열 및 방열시의 온도응답 계산방법

## 5. 앞으로의 전개

지열 히트펌프에 관한 최근 동향과 설계 및 시공에 등에 관하여 기술하였다. 앞으로는 기존의 벽걸이 에어컨 뿐만 아니라, 환기시스템과 조합된 센트럴 냉난방이 보다 일반화되리라 예상된다. 건강·안전·쾌적·에너지 절약을 고려해 설치된 시스템이 요구되는 시대에 있어, 지열원 히트펌프는 열원시스템의 주류의 하나로 위치될 것이다. 보급 대책은 미국의 방법이 참고가 되리라 생각한다. 설계방법은 지금은 인터넷에서 누구나 입수할 수 있게 되었다. 비용면에서도 굴삭비의 삭감과 동시에, 고효율이며 신뢰성이 높고 싼 지중열을 적절한 수-공기 히트펌프를 시장에 내어놓는 것이 가장 중요한 일이다. 지열 히트펌프에 관한 소개의 글이 최근 대체에너지 개발 촉진과 함께 이 분야에 대한 기업들의 참여가 활발해 지는 계기가 되기를 바란다.

## 참고문헌

- [1] H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, 1946, "Conduction of Heat in solid", Oxford University Press, Oxford
- [2] E. L. Kelmer, 1946, "Heating and Piping and Air Conditioning", December, 84
- [3] L. R. Ingersoll and H. J. Plass, 1948, "Heating and Piping and Air Conditioning", July, 119~122
- [4] C. H. Corgan, 1948, "Electric Power and Light", 26, 169~176
- [5] 長野, 2001, "地熱ヒートポンプ", 冷凍, 102 9~1034