

# 지열히트펌프시스템의 적용 활성화를 위한 기술

전 종 욱

(주)노지오테크놀로지 시스템개발부장, 고려대학교 건축공학과 겸임교수

## 1. 지열히트펌프의 장기운전 성능변화

지열히트펌프의 성능변화는 지중으로의 방출열량이나 흡입열량의 시간에 따른 변화와 밀접한 관계를 갖는다. 일정온도구배 하에서 단위시간당 단위면적을 통과하는 열량으로 정의되는 Fourier의 열전도 방정식은 지열히트펌프의 성능에 크게 영향 줄 수 있는 지중열전도도를 나타내는데 주로 사용된다. 지중 열전도도는 지중의 흙이나 암석 등 구성 물질의 종류, 층의 두께, 밀도, 수분함량, 공극율, 수분전도율 등의 지중토양 인자들과 설계 시 고려되는 혼합유체, 파이프의 종류 및 두께, 보어홀의 지름, 그라우팅 재료, 지중열교환기의 길이, 설계유량, U-튜브 간 거리 등의 설계인자들에 의해 좌우된다. 다양한 인들이 지중열도도에 영향을 미치게 되고 결과적으로는 히트펌프로 유입되는 지열교환수의 온도인 EWT (Entering Water Temperature)를 좌우하게 된다.

지열히트펌프의 운전성능을 확인하기 위해 국내의 9개 지열히트펌프가 설치된 사이트를 방문하여 지열히트펌프의 시스템 용량 및 설계자료, 운전데이터, 등을 분석해 본 결과 냉방과 난방부하가 일치하게 설계된 곳은 없으며 운전모드에 따른 지중열환경 악화가 나타나지 않은 곳도 없었

다. 다시 말해 지열히트펌프는 EWT에 의해 시스템 성능이 크게 좌우되고 연간 냉난방 부하차이에 의해 발생할 수 있는 장기적인 지중열환경변화는 EWT를 설계범위에서 벗어나게 할 수 있다. 9개의 사이트 중 하루에 3번의 간헐운전만 이루어지는 사이트가 가장 운전율이 낮았으며, 운전율이 가장 낮은 사이트에서도 3개월 지속 운전시 지중열환경 악화가 측정되었다(표 1).

## 2. 지열히트펌프시스템 적용에 필요한 기술

지열히트펌프의 적극적인 활용과 설치확산을 위해서는 지중열환경변화를 예측하여 성능을 보상할 수 있는 히트펌프의 기술적인 면도 중요하나 더욱 중요한 것은 전체 지열히트펌프 시스템의 매칭기술과 지중열교환기 설치기술이다.

### 2.1 시스템 매칭기술

우선 시스템 매칭기술로써는 유동저항을 고려한 시스템의 각 컴포넌트들의 배치와 적절한 펌프선정, 싸이클링 로스를 최소화할 수 있으면서 경제적인 수 있는 범퍼탱크 설계, 부분부하운전을 고려한 히트펌프의 용량별 대수설정, 부하 측에 열공급을 원활히 할 수 있는 열교환기 선정, 연간 냉난방 부하가 크게 차이 날 경우 하이브리드 시스

<표 1> 방문 조사된 지열히트펌프 설치 사이트 정보

| 번호 | 위치   | 건물용도  | 히트펌프 용량 | 지중열 교환기용량      | 보조열원        | 축열조 | 운전 데이터 |
|----|------|-------|---------|----------------|-------------|-----|--------|
| 1  | 서울   | 직업훈련원 | 200 RT  | 현장데이터 미확보      | 보일러         | 사용  | 저장     |
| 2  | 경기도  | 콘도미니엄 | 200 RT  | 200 m * 48     | 폐열/공기, 히트펌프 | 사용  | 저장안함   |
| 3  | 경기도  | 요양원   | 120 RT  | 150 m * 40     | 없음          | 없음  | 저장     |
| 4  | 충청북도 | 사무실   | 200 RT  | 150 m * 46     | 없음          | 없음  | 저장     |
| 5  | 충청남도 | 교육원   | 100 RT  | 현장 비공개         | 존별 보조설비     | 사용  | 저장     |
| 6  | 전라북도 | 요양원   | 120 RT  | 150 m * 40     | 태양열, 급탕보일러  | 사용  | 저장     |
| 7  | 경상북도 | 전시관   | 120 RT  | 150 m * 40     | 태양열         | 사용  | 저장     |
| 8  | 경상남도 | 기숙사   | 200 RT  | 500 m * 8(SCW) | 급탕보일러       | 없음  | 저장     |
| 9  | 경상남도 | 박물관   | 180 RT  | 500 m * 6(SCW) | 없음          | 없음  | 저장     |

템 적용 등이 있을 수 있다. 본 원고에서는 펌프 시스템과 하이브리드 시스템 적용에 대한 내용을 간략히 다루도록 하겠다.

2.1.1 펌프 시스템

냉난방 부하불균형이 큰 건물일수록 히트펌프의 부분부하 특성을 고려해야 하고, 냉난방 부하 중 최대부하 기준설계는 과도한 지중열교환기를 설계하게 될 것이고 이로 인한 펌핑동력 손실 또한 커진다. 지열히트펌프 시스템의 효율을 향상시키기 위해 순환펌프용량의 설계기준을 제시하고 있다(표 2).

대부분의 기계설비들의 설계에 있어서 안전율을 고려하여 보수적인 값을 선택하는 경우가 많다. 특히 지열히트펌프에서도 펌프의 과도한 설계가 전체 시스템 효율을 크게 떨어뜨리는 경우도 적지 않게 발견할 수 있다.

추후 확장을 고려하였던 성능저하를 우려하여 보수적인 설계가 적용되었던 간에 이같은 펌프들은 적정효율을 보일 수 있는 운전점에서 벗어나서 운전된다. 보통의 경우 유량은 커지고 펌프의 헤드압력은 더 떨어진다. 펌프의 운전점을 적절히 맞추고 에너지를 절약할 수 있는 방법 중에 임펠러의 지름을 줄이는 방법도 있다. 물론 임펠러와 케이싱 사이에 재순환 등의 문제를 야기 시키지

않도록 전체 지름의 75%를 허용한도로 정하고 있다.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{D_2}{D_1} \tag{식 (1)}$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \tag{식 (2)}$$

$$\frac{bhp_2}{bhp_1} = \left(\frac{H_2 Q_2}{H_1 Q_1}\right) = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3 \tag{식 (3)}$$

D : 임펠러 지름 (inch)

Q : 펌핑유량 (gpm)

H : 양정 (feet)

bhp : 항주마력

식 (3)에서 유량을 동일하게 유지시킨 후 설치된 펌프의 양정과 유체순환에 필요한 양정을 비교하여 여분의 양정만큼을 임펠러지름으로 환산하여 임펠러지름을 줄일 수 있다. 줄어든 임펠러 펌프는 동력을 줄일 수 있어 지열히트펌프 시스템 전체효율을 향상시킬 수 있다.

2.1.2 하이브리드 시스템

지열냉난방 부하가 크게 차이를 보일수록 지중열환경은 열이 증가되거나 열이 감소하는 현상으로 나타난다. 지중열환경의 악화는 EWT를 비효

〈표 2〉 냉방시 순환펌프의 효율적인 설계기준과 순환펌프의 등급

| Pump power(W)/<br>Cooling load(W/ton) | Pump power(HP)/<br>Cooling load 100 RT | Rank            |
|---------------------------------------|--|-----------------|
| 50 (below)                            | 5 (below)                              | A : (excellent) |
| 50 ~ 75                               | 5 ~ 7.5                                | B : (good)      |
| 75 ~ 100                              | 7.5 ~ 10                               | C : (moderate)  |
| 100 ~ 150                             | 10 ~ 15                                | D : (poor)      |
| 150 (above)                           | 15 (above)                             | F : (bad)       |

울적인 운전범위로 이끌게 되고 지열히트펌프 시스템은 설계 성능을 보장할 수 없게 된다.

냉각탑은 하절기 냉방부하 과대 시 지중 열교환기가 담당하는 냉방부하의 일부 혹은 전부를 일정기간 담당하여, 지속 냉방 시 야기되는 지중 열환경을 회복시키고 하이브리드 지열히트펌프 시스템 성능을 유지시킨다. 보일러는 동절기 난방부하 과대 시 지중 열교환기가 담당하는 난방부하의 일부 혹은 전부를 일정기간 담당하여, 지속 난방 시 야기되는 지중 열환경 악화를 회복시키고 시스템 성능을 유지시킨다. 지중 열교환기와 보조열원 기기는 운전배열에 따라 병렬과 직렬로 나뉜다. 지중열교환기의 사용을 유지하되 보조열원을 동시에 사용할 수 있는 직렬배열과 지중열환경 회복을 위해 지중열교환기를 사용하지 않고 보조열원만을 이용해 냉난방을 하는 병렬배열이 있을 수 있다. 그림 1은 직렬배열 하이브리드 지열히트펌프 시스템이고, 그림 2는 병렬배열 하이브리드 지열히트펌프 시스템이다

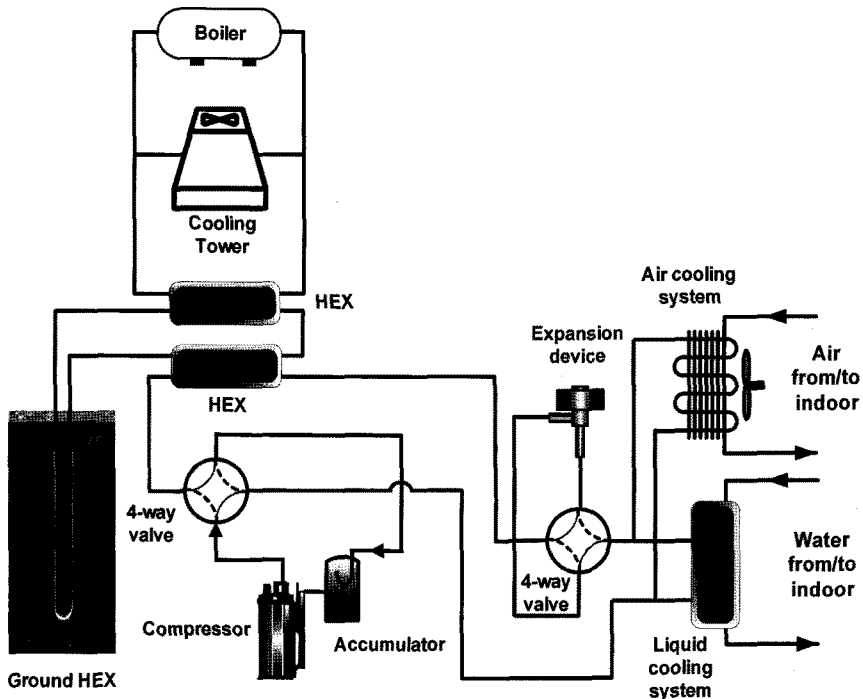
그림 3은 하이브리드 지열히트펌프를 운전하였을 경우 보조열원기기의 배열에 따라 EWT가 변할 수 있는 예상 범위를 그래프화 한 것으로 지열히트펌프가 고효율로 운전될 수 있는 EWT의 범위가 상한과 하한 사이에 존재하며 이를 유지시킬 수 있는 제어원리를 설명하고 있다. 이 같은 하이브리드 지열히트펌프 시스템은 미국 해변가 호텔에 이미 설치되어 그 성능을 입증한 바가 있으나 배열을 어떻게 구성하느냐에 따라 초기투자비가 많이 차이날 수 있으므로 설치 후 효율상승에

대한 면밀한 검토가 필요하다. 예를 들어 직렬배열의 경우 연간 냉난방부하가 차이 날 경우 적은 부하를 기준으로 지중열교환기를 설치하고 많은 부하의 계절에 맞는 보조열원기기를 부하차이만큼만 설치해주면 된다. 반면에 병렬배열을 이용할 경우에는 지열히트펌프가 사용되지 않을 경우에도 보조열원기기로 냉방이나 난방이 가능하도록 설계되어야 한다. 이론적으로 접근한 배열을 다양하게 만들어 낼 수는 있으나 실제적용이 가능한 효율적인 하이브리드 지열히트펌프 시스템이 좀 더 연구가 필요할 것으로 예상된다.

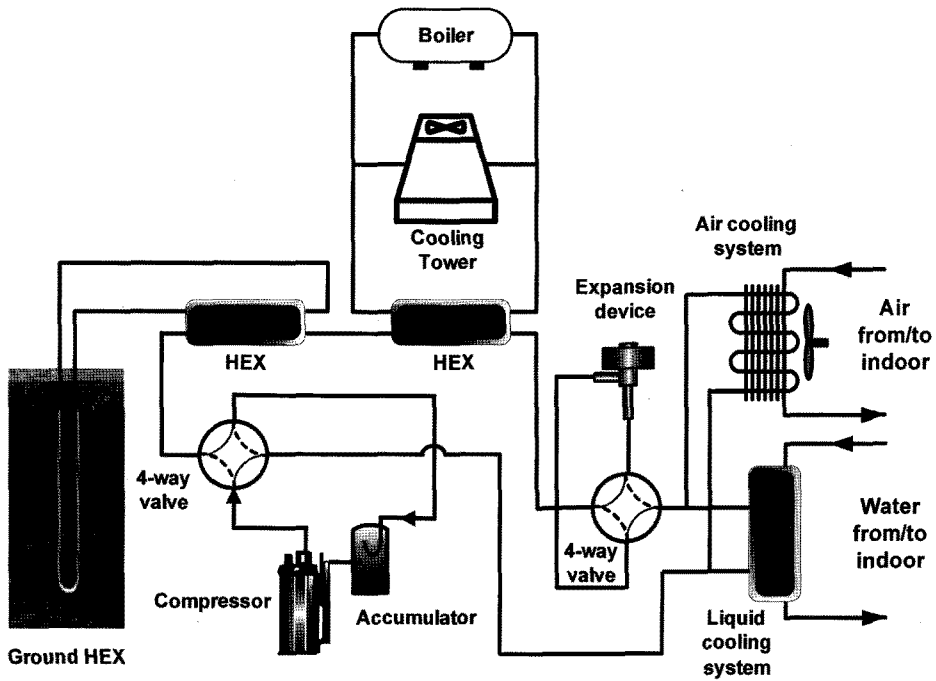
## 2.2 지중열교환기 설치기술

지중열교환기 설치기술을 두 번째로 설명한다고 해서 그 영향력이 낮은 것은 결코 아니다. 지중열교환기 설치하는 시스템의 장기운전성능 확보에 가장 큰 영향을 미칠 수도 있다. 지중열교환기 설치 기술에는 시추기술도 포함되며, 지열히트펌프 시스템 적용이 가능한 지중 토양조건인지 확인하는 단계인 지중 열전도도 테스트 기술도 포함된다.

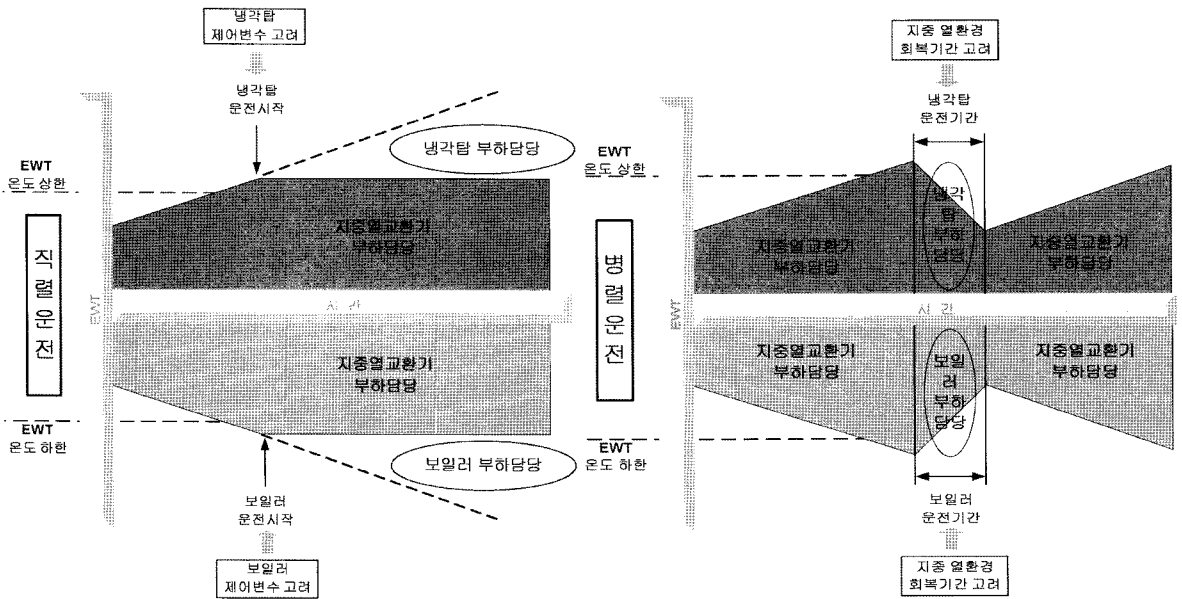
많은 경우 지중 열전도도 테스트과정은 적용가능성을 확인하는 것이 아니라 설치를 사실화 한 후 확인 단계로 여겨지게 된다. 지중열전도도가 지열히트펌프를 설치하기에 부적합하다고 리포트하여 사업을 중단하는 사례는 거의 없고, 실제 지중열전도도가 많이 떨어지는 경우 지열히트펌프를 사용하는 사용자가 시스템의 장기 저효율 운전에 대한 리스크를 떠맡고 진행된다. 기존의 공기열원 히트펌프에 비해 초기투자비가 많이 들



[그림 1] 보조열원설비를 직렬배열한 지열히트펌프 시스템 개략도



[그림 2] 보조열원설비를 병렬배열한 지열히트펌프 시스템 개략도



[그림 3] 하이브리드 지열히트펌프 시스템의 운전방법에 따른 EWT 변화

어가는 지열히트펌프가 저효율로 운전되고 있다는 것을 사용자가 확인하는 순간 세계에서 가장 고효율 냉난방설비로 알려진 지열히트펌프 시스템은 누구에게도 추천해 줄 수 없는 불확실한 시스템으로 전락할 수 있다.

이 같은 문제를 극복하고 가장 높은 효율을 자랑하는 지열히트펌프의 장기적이고 안정적인 설치확산을 위해서 정부는 초기 사이트 지중열전도도 측정에 대한 지원제도를 만들어주는 것도 한 방법이라 생각한다.

지중열전도도는 지열히트펌프의 운전성능확보를 위해 필요한 지중열교환기의 길이를 산정해주는 중요한 데이터이다. 이 데이터를 얻기 위한 과정을 우리는 좀 더 관심을 가져야 한다고 생각한다. 왜냐하면 지열히트펌프 시스템의 설치가 얼마나 경제적인지 있는가에 대한 답은 지중열전도도에서 나오기 때문이다.

열전도도 테스트를 위해 시추한 깊이와 테스트를 위해 삽입된 열교환기 파이프 길이 및 재질, 정확한 열량생성과 열유량 모니터링, 테스트 장비의

전체 단일조건, 그라우팅 재료의 선택 및 채움방법, 등이 측정되는 열전도도 값에 영향을 미치게 되는데 공학적으로 이해될 수 있는 많은 요소들이 현장에서 얼마나 제대로 적용되고 있는지 우리는 면밀히 확인해야 할 것이다. 단적인 예로 거의 유사한 지중환경을 가진 사이트의 지중열전도도 테스트 값이 계절의 변화에 따라 다르게 조사된 사례도 확인되었다. 예상하기로는 단일상의 문제가 아니었을까? 생각해 본다.

정확한 지중열전도도가 확보되었다면 대상건물에 필요한 부하에 맞추어 지중열교환기의 길이를 산정할 수 있다. 동일한 열교환기의 총길이를 가지고도 보어홀이 배열을 어떻게 하느냐에 따라 장기운전에 따른 지중열환경 변화가 달라질 수 있다. 이는 이미 많은 경험적 데이터와 해석적 방법으로 입증된 바 있으므로 지중열교환기가 설치 가능한 면적에서 보어홀의 배열 또한 열교환수의 유동저항 및 시스템 장비들의 배치를 포함하여 고려되어야 한다.

### 3. 결론

세계적으로 가장 고효율 냉난방설비로 알려진 지열히트펌프의 성능에 영향을 미치는 인자를 분석하고 국내에 설치된 지열히트펌프 설비들의 운전데이터 및 설계데이터를 분석해 보았다. 지열히트펌프의 안정적인 성능확보를 위해서는 시스템 매칭기술과 지중열교환기 설치기술이 온전히 갖춰져야 한다.

시스템 매칭기술은 각 컴포넌트들의 배치와 유동저항 설계에 따른 적절한 펌프선정, 싸이클링 로스를 최소화할 수 있으면서 경제적인 범퍼탱크 설계, 부분부하운전을 고려한 히트펌프의 용량별 대수설정, 부하 측에 열공급을 원활히 할 수 있는 열교환기 선정, 연간 냉난방 부하가 크게 차이 날 경우 하이브리드 시스템적용 등으로 말할 수 있고 이들 중 펌프 시스템과 하이브리드 시스템적용에 대한 내용을 고찰해 보았다.

지중열교환기 설치기술은 시추기술을 포함한 지중열전도도 테스트 기술을 포함하며 넓은 의미에서 지중열전도도 테스트 기술은 열교환기를 지중으로 삽입하는 기술을 포함한다. 지열히트펌프의 경제성을 사전 검토할 수 있는 지중열전도도는 신뢰성을 높일 수 있는 과정을 통하여 측정되어야 한다.

### 참고문헌

1. 전중욱 외, 2008, 지열 열펌프가 적용된 복합 냉방설비의 연계운전특성 및 운전비용 분석,

대한설비공학회 2008 하계학술발표대회 논문집 pp. 0042 ~ 0047.

2. 전중욱 외, 2010, 지열복합 열원기기 최적운전제어에 관한 해석적 연구, 한국지열에너지학회논문집, Vol. 6, No. 2, pp. 1 ~ 7.

3. 박홍희 외, 반응표면법을 이용한 하이브리드 지열히트펌프 냉방운전 최적화 연구, 대한설비공학회 2010 하계 학술발표대회 논문집, 10-S-106.

4. Albert R. et. al, 2008, Hybrid geothermal for hotel, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. June, pp. 48-50.

5. Jongug, J., et. al, 2010, Performance evaluation and modeling of a hybrid cooling system combining a screw water chiller with a ground source heat pump in a building, Energy, Vol. 35, pp. 2006-2012.

6. Jongug, J., et. al, 2008, Cooling performance of a hybrid plant combining a conventional chiller with a geothermal heat pump, RENEWABLE ENERGY 2008.

7. Editor, 2006, Energy Tips-Pumping Systems, U.S. Department of Energy Pumping Systems Tip sheet #7.

8. Scott H., et. al, 2008, Optimization of hybrid geothermal heat pump systems, 9th international IEA Heat Pump Conference, pp. 20-22.