

# 사무용건물의 지열 냉난방 시스템 실증연구

안형준, 백성권\*, 조정식, 손병후\*\*

\*코오롱건설(주) 기술연구소, \*\*한국건설기술연구원 화재설비부

## 요 약

우리나라 에너지소비의 25%이상을 차지하는 건물냉난방부문의 에너지절약을 위해 에너지효율이 높은 것으로 나타난 지열냉난방시스템의 보급이 필요하다. 이에 지열냉난방시스템 실증연구를 통해 사무용건물에 지열냉난방시스템을 설계 및 적용하고 냉난방운전을 실시하였다. 실증연구 결과 지열냉난방시스템은 우리나라의 기후 및 지질조건에 매우 적합하며 냉방운전의 경우 COP가 평균 4.23~5.49, 난방운전의 경우 COP가 평균 3.32~4.44를 나타내었다. 실증연구를 통해 사무용건물의 지열냉난방시스템의 설계 및 시공능력을 확보함에 따라 향후 보급에 기여하고자 한다.

## 1. 서 론

지열냉난방시스템은 히트펌프냉난방시스템의 일종으로 지중매체(토양, 암반, 지하수)를 열원으로 이용하는 시스템을 통칭한다. 지열냉난방시스템은 지중열원의 특성상 연중 온도가 13~17℃ 정도로 유지되어 대기온도에 영향을 받는 공기열원 히트펌프와 비교할 때 성능계수가 높고 안정적이다.

지열냉난방시스템은 1970년대 미국 오클라호마주립대학에서 폐쇄형 지중열교환기를 개발함에 따라 본격적으로 사용되기 시작하였고 1980년대 후반부터 지열냉난방시스템에 적합한 히트펌프가 본격 생산되면서 미국, 독일, 스위스 등에서 활발하게 보급되었다. 최근 한국, 일본, 중국 등의 동아시아지역에도 본격적으로 도입되고 있다.

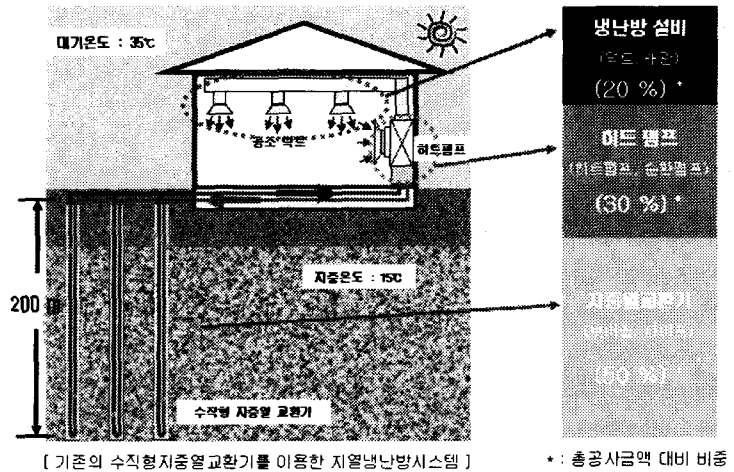
그런데 지열냉난방시스템은 지중열원을 활용한다는 점에서 매우 생소할 뿐만 아니라 각 지역의 지질과 기후 여건에 따라 적용성이 달라지므로 이를 정확히 평가할 필요가 있다. 따라서 지열냉난방시스템의 설계와 시공능력을 확보하고 운전 성능평가를 통해 적용성을 검증하는 작업을 수행하고자 이 연구를 수행하게 되었다. 특히 이 연구에서는 [공공기관 대체에너지무화제도]에 따라 우선 적용이 예상되는 사무용건물에 적합한 지열냉난방시스템을 설계, 시공하고 성능평가하는 것을 주 내용으로 실시되었다.

## 2. 본 론

### 가. 지열냉난방시스템의 특징

지열냉난방시스템은 일반적인 냉각탑+냉동기 시스템과 거의 유사하다. 다만 냉각탑 대신 땅속에 지중열교환기가 설치되어 있다는 점과 히트펌프를 이용해 냉난방이 모두 가능하다는 점에서 차이가 있다.

지열냉난방시스템은 에너지효율이 기존의 공기식 히트펌프나 보일러시스템에 비해 높다는 점이 가장 큰 장점이며 반면 지중열교환기의 설치에 높은 투자비용이 필요하다는 것이 단점이다.



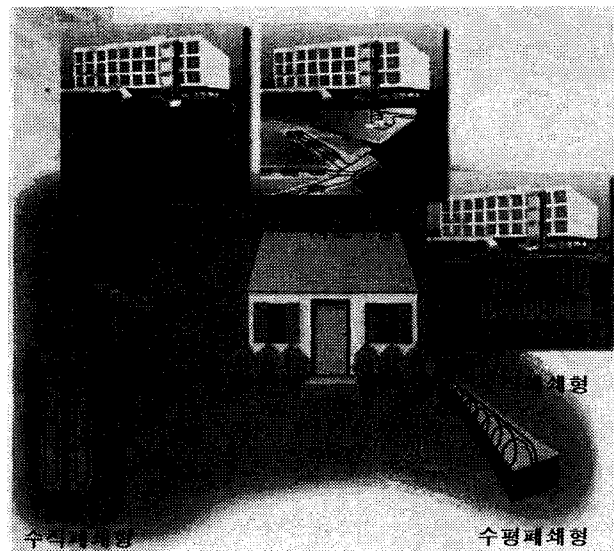
[그림 1 : 지열냉난방시스템의 구성]

지열냉난방시스템에서 가장 중요한 요소는 지중열교환기인데 지중열을 이용하는 방식에 따라 그림 2와 같이 파이프를 묻어 지중열을 직접 이용하는 수평폐쇄루프형과 수직폐쇄루프형, 지하수형, 지표수형 등으로 분류할 수 있다.

일반적으로 가장 많이 사용되는 방식은 수직폐쇄형인데 이 방식은 좁은 부지에서 많은 열원을 얻을 수 있고 성능도 안정적인 장점이 있다. 반면 설치비용은 가장 높다.

다음으로 많이 사용되는 방식은 수평폐쇄형으로 운동장이나 주차장 등 넓은 여유부지가 있는 경우에 적합하며 설치비용이 비교적 낮고 특히 냉방성능이 우수하다.

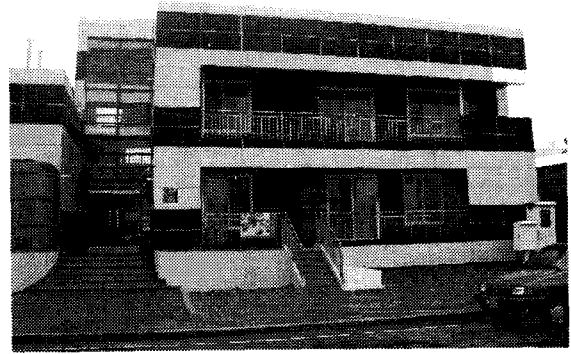
마지막으로 지하수형의 경우 지질조건이 매우 중요한 요소인데 만약 충분한 지하수를 이용할 수 있다면 가장 경제적인 방법이라 할 수 있다. 이 연구에서는 가장 일반적으로 사용되는 수직폐쇄형 지중열교환기를 이용하여 설계 및 시공을 실시하였다.



[그림 2 : 지중열교환기종류(DOE,2001)]

## 나. 소규모 시험적용 및 평가

지열냉난방시스템 실증연구는 크게 두단계로 나누어 진행하였다. 먼저 기본적인 적용성 평가를 위해 그림 3과 같이 약 25평의 소규모 건물에 4.5RT의 지열냉난방시스템을 설계/적용하여 냉난방성능을 평가하였다. 이 결과를 600평 규모의 실증적용 설계와 시공에 반영하였다.



[그림 3 : 표준화·부품화 주택의 외관]

적용된 지열냉난방시스템의 설계도면은 그림 4와 같다.

지중열교환기는 그림 5와 같이 수직폐쇄형지중열교환기로 160m깊이의 2공을 설치하였고 히트펌프는 그림 6와 같은 콘솔형을 3대 사용하였다.

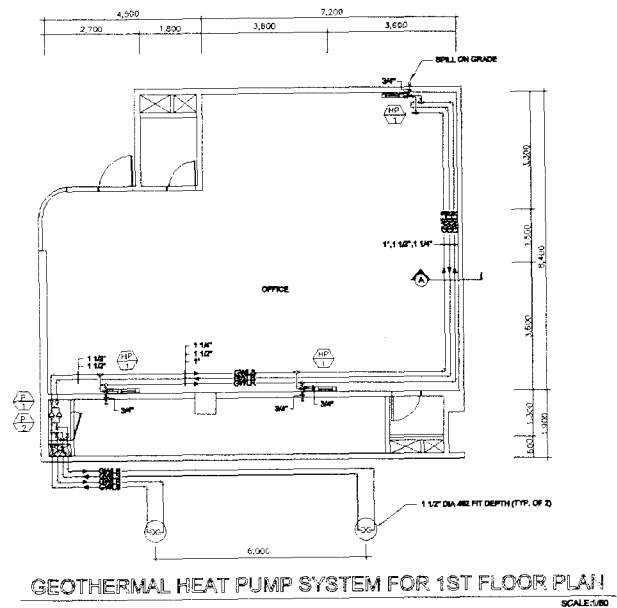
지열냉난방시스템의 설계 및 시공과정은 다음과 같다.

### - 설계 과정

- ① 건물의 냉난방부하 설계
- ② 부하에 따른 히트펌프 용량 설계
- ③ 조건에 따른 지중열교환기 설계

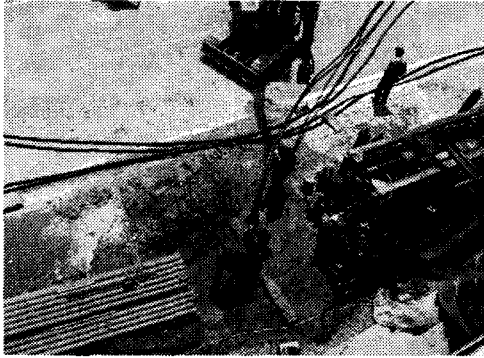
### - 시공 과정

- ① 지중열교환기 위치 선정
- ② 지중열교환기 천공
- ③ 지중열교환기 설치
- ④ 그라우팅 실시
- ⑤ 지중열교환기 성능 실험
- ⑥ 헤더 및 순환펌프 설치
- ⑦ 히트펌프 설치

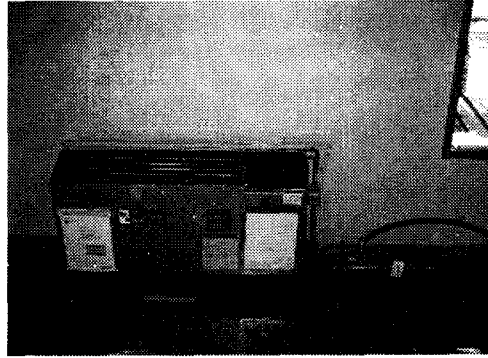


[그림 4 : 시험적용 설계도면]

위에서 살펴볼 수 있듯이 지열냉난방시스템의 설계 및 시공과정의 대부분은 일반적인 냉난방시스템과 유사하다. 다만 지열냉난방의 핵심이라 할 수 있는 지중열교환기의 설계와 설치과정에 주된 차이가 있다. 지중열교환기는 고가의 시설물일 뿐만 아니라 한번 설치되고 나면 수정보완이 어렵기 때문에 정확한 용량설계가 필요하며 또한 향후 수정보완이 필요없도록 엄격한 시공이 이루어져야 한다. 마지막으로 지중열교환기를 설치한 후에는 반드시 지중열교환기 성능실험을 통해 설계가 적합한지 설치가 잘되었는지를 검증하는 것이 필요하다.



[그림 5 : 지중열교환기 설치장면]

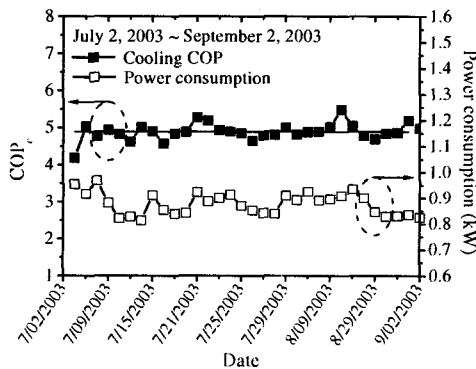


[그림 6 : 히트펌프 설치장면]

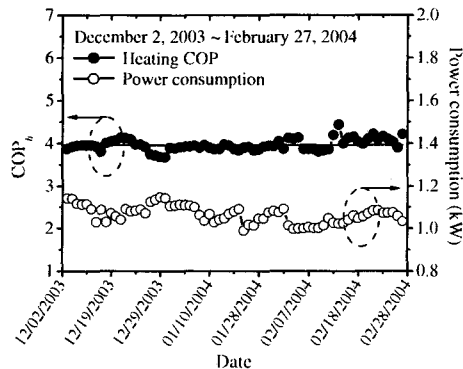
시험적용에서 지중열교환기 성능시험을 두차례 실시하였는데 시험결과 지중열 전도도가 3.56~3.63W/mk로 나타났으며 해외문헌상 2.0~3.0W/mk으로 나타나는 것과 비교하면 국내 지반조건이 매우 양호하며 시공도 적합하게 이루어진 것을 확인할 수 있다. 지열냉난방시스템의 설치가 완료된 후 이 건물은 4~5인이 상주하는 사무용 건물로 이용되었으며 2003년 6월부터 2004년 3월까지 운전성능평가를 실시하였다. 성능평가는 크게 냉난방시의 성적계수(COP)와 지중열교환기성능으로 나누어 살펴본다.

### 1) 냉난방 성능평가

냉방성능평가는 2003년 6월부터 9월까지 약 3개월에 걸쳐 실시되었다. 전력사용량, 냉방공급열량 등을 분석하여 얻은 냉방성적계수(COP)는 그림 7과 같이 나타났으며 대체로 4.19~5.49의 범위를 나타내며 평균값은 4.90이었다.



[그림 7 : 냉방기간의 성적계수]

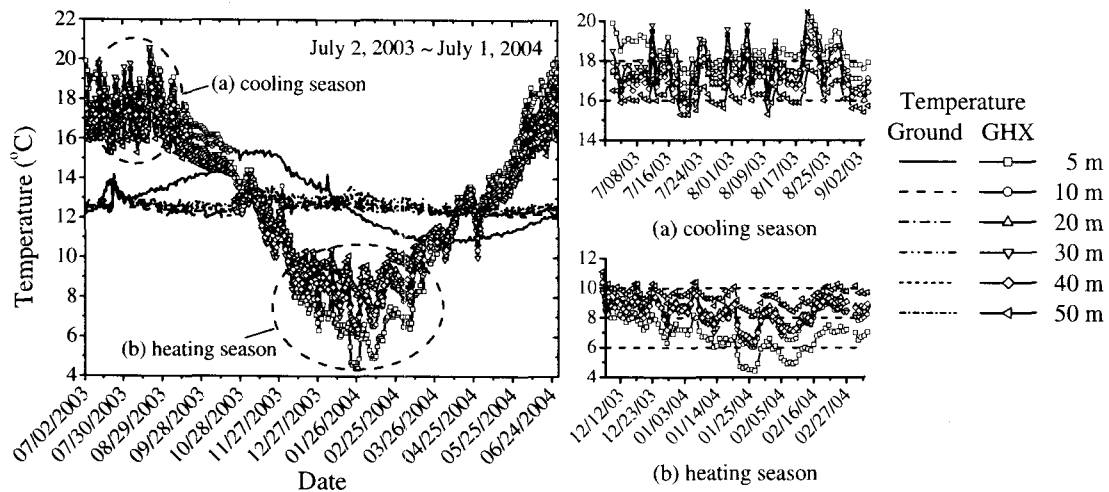


[그림 8 : 난방기간의 성적계수]

다음으로 난방성능평가는 2003년 12월부터 2004년 2월까지 3개월에 걸쳐 실시되었으며, 난방성적계수는 그림8과 같이 3.67~4.44의 범위로 평균 3.96을 나타내었다.

## 2) 지중열교환기 성능

냉난방운전을 하면 지중열교환기를 통해 지중에 열이 축적되고 이로 인해 성능 변화가 일어난다. 지중열교환기의 안정적인 운전범위는  $-5^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$  정도이다. 따라서 지중열교환기의 안정성과 성능은 연중 운전온도의 변화를 살펴보면 파악할 수 있다. 그림 9는 2003년 7월부터 2004년 6월까지 1년동안 지중열교환기 작동온도의 변화를 나타낸 그래프로 대체로  $4 \sim 21^{\circ}\text{C}$ 의 작동온도를 나타내어 매우 안정적인 운전이 이루어지는 것을 알 수 있다.



[그림 9 : 지중열교환기의 작동온도의 변화

이처럼 소규모 건물에 지열냉난방시스템을 시험 적용하여 성능평가를 실시한 결과 냉난방운전이 안정적으로 이루어지며 냉난방성적계수(COP)가 설계기준인 난방성적계수 3.5, 냉방성적계수 4.5보다 높고 지중열교환기도 안정적으로 운전되는 것을 알 수 있었다.

## 4. 사무용 건물의 실증적용 및 평가

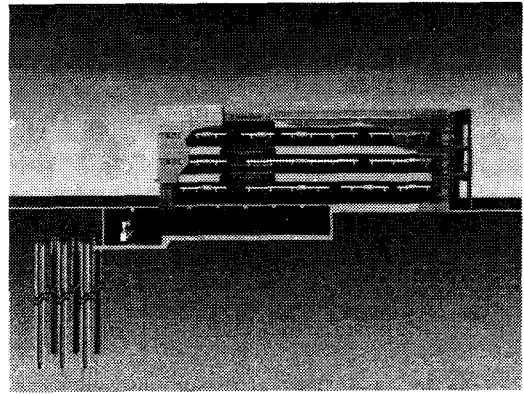
앞장의 시험적용을 통해 얻은 결과를 바탕으로 사무용건물에 50RT급의 지열냉난방시스템을 설치하였다. 설치된 건물 및 지열냉난방시스템의 구성은 그림 10과 같다. 적용건물은 약 620명 규모의 3층 건물로 냉방용량 40RT, 난방용량 32RT로 설계된 에너지 절약형 건물이다. 설치된 지열냉난방시스템의 개요는 다음과 같다.

- 히트펌프 : 덕트연결용 천정매립형 히트펌프(11대, 총용량 50RT)
- 지중열교환기 : 수직폐쇄형 지중열교환기(200m급 \* 6공, 총용량 30RT)
- 보조열원 : 냉방보조열원 냉각탑(10RT급 1대)

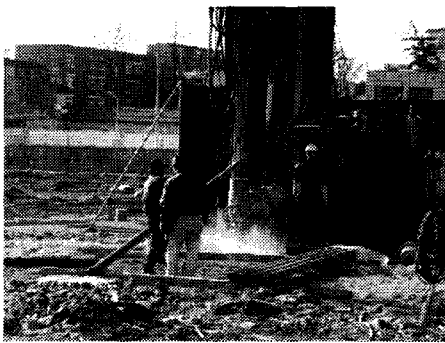
이 시스템의 가장 큰 특징은 지중열교환기의 용량을 난방부하에 맞추어 작게 설계하고 냉방부하에 필요한 부족열원을 냉각탑을 이용하도록 복합열원으로 설계

하였다는 점이다. 이를 통해 고가의 지중 열교환기 용량을 줄일 수 있는 장점이 있으므로 냉방부하가 큰 국내 사무용 건물에 적합할 것으로 판단된다.

사무용건물의 시공과정은 그림 11~16과 같다.



[그림 10 : 실증적용건물 개요도]



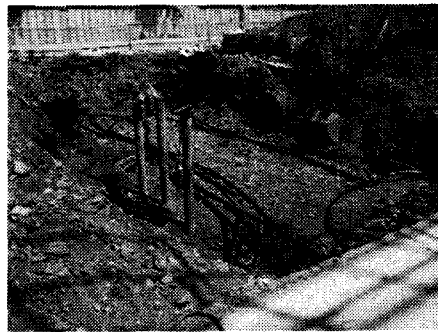
[그림 11 : 설치공 천공작업]



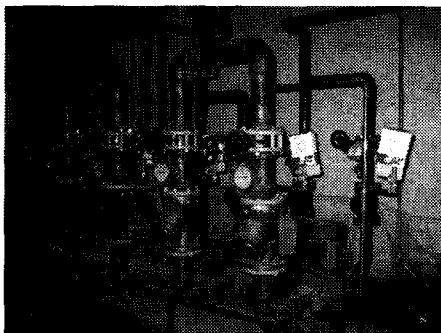
[그림 12 : 파이프 설치작업]



[그림 13 : 그라우팅작업]



[그림 14 : 헤더배관 작업]



[그림 15 : 기계실 설치작업]



[그림 16 : 히트펌프 설치작업]

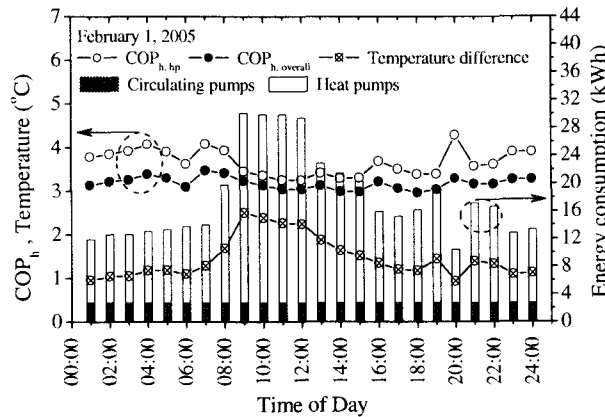
설치된 시스템은 DDC제어에 의한 자동운전을 실시하였으며 성능계측항목은 다음과 같다.

- ① 온도 : 실내외온도, 덕트 입출 온도, 수배관 입출 온도, 지중심도별 온도
- ② 전력 : 전체히트펌프 사용전력, 순환펌프 전력, 개별히트펌프 전력
- ③ 기본데이터 : 히트펌프 작동시간, 풍량, 순환유량 등

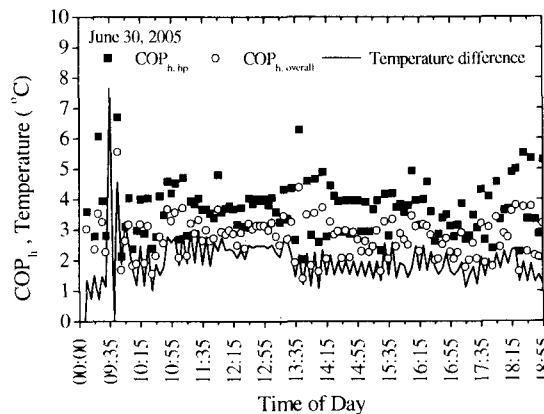
성능계측항목 중 온도나 전력은 자동제어 및 개별 측정장비를 이용하여 자동 측정하였으며 기본데이터는 T.A.B를 실시하여 초기치를 측정하여 사용하였다.

이러한 데이터를 이용한 성능분석결과는 다양하지만 가장 중요한 냉난방성능계수만을 살펴본다.

우선 난방성능계수는 2004년 12월부터 2005년 2월까지 3개월간 측정하였으며 대표적으로 2월 1일의 성능곡선을 그림 17에서 나타내었다. 난방의 경우 성적계수는 3.17~3.75로 평균 3.46을 나타내었다. 다음으로 냉방성능계수는 2005년 6월부터 2005년 8월까지 3개월간 측정하였으며 대표적인 6월 30일의 성능계수는 그림 18과 같다. 냉방의 경우 성적계수는 평균 3.96~4.53으로 평균 4.23을 나타내었다.



[그림 17 : 난방 성능계수와 전력사용량]



[그림 18 : 냉방 성능계수와 온도분포]

시험적용 결과와 실증적용결과를 비교하면 실증적용의 히트펌프 성적계수가 낮게 나타나는데 이는 그림 16의 히트펌프가 덕트급배기를 위해 팬동력이 크기 때문이다. 즉, 히트펌프내부에 공조기 팬이 포함된 것으로 보아야 한다. 히트펌프의 제원표에 의하면 히트펌프의 소모전력에서 팬이 차지하는 비율은 약 16%로 이를 감안하면 실증적용시스템의 히트펌프 성적계수는 난방 4.1, 냉방 5.0에 근접하는 높은 성적을 나타내는 것으로 판단된다.

또한 냉각탑 복합열원의 성능평가는 실시되지 않았는데 이는 개별공조방식으로 운전함에 따라 사무용건물에 비상주공간인 회의실, 자료실 등의 공조부하가 크게 발생하지 않아 냉각탑 운전이 이루어지지 않았기 때문이다. 즉, 운전초기의 특성상 지중열교환기로 충분한 냉방부하를 감당할 수 있었으며 향후 지속적인 운전을 통해 지중 온도분포가 변화하면 냉각탑이 보조열원으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 지중온도분포의 경우 지중열교환기와의 거리에 따른 온도변화는 크지 않았다. 단지 10m이하의 얕은 심도에서 대기온도에 따른 온도변화가 크게 나타났다. 따라서 아직까지는 지중에 축열효과가 본격적으로 발생하지 않는 것으로 판단된다. 이러한 축열효과는 10년 이상의 장기평가가 필요하므로 향후 지속적인 평가를 수행할 계획이다.

### 3. 결 론

이상과 같이 사무용건물에 적합한 냉각탑 보조열원형 지열냉난방시스템을 실증 적용하여 설계 및 시공기술을 확보하고 1년 이상의 냉난방운전을 통해 성능을 평가하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 냉난방부하가 균형을 이루는 국내 기후환경은 지열냉난방시스템에 적합하며 현장실험결과 지반 열전도도는 3.45~3.63W/mk로 높아 지질조건도 적합하다.
2. 소형건물에 시험적용한 결과 냉방성적계수는 4.19~5.49로 평균 4.90을 나타내었고 난방성적계수는 3.67~4.44로 평균 4.02를 나타내었다.
3. 사무용건물에 실증적용한 결과 냉방성적계수는 3.96~4.53으로 평균 4.23을 나타내었고 난방성적계수는 3.17~3.75로 평균 3.46을 나타내었다.
4. 지열냉난방시스템의 실증적용결과 안정적인 냉난방운전이 가능하고 에너지효율이 높게 나타나 국내 적용성이 높은 것으로 판단된다.



## 참 고 문 헌

ASHRAE, 1995, Commercial/institutional ground-source heat pump engineering manual, ASHRAE, Atlanta.

Bose, J. E., Parker, J. D. and McQuiston, F. C., 1985, Design/data manual for closed -loop ground-coupled heat pump systems, ASHRAE, Atlanta.

Carlslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1947, Conduction of Heat in Solids, Oxford, Clare- more Press.

DOE, 2001, Ground-source heat pumps applied to federal facilities-second edition, Federal Energy Management Program, DOE/EE-0245(PNNL-13534), US Department of Energy.