수직밀폐형 지중열교환기의 온도분포 특성

선종철*, 김병철**, 고영하***

*조선대학교 대학원 기계공학과(suntops@naver.com), **조선대학교 기계공학과(bckim@chosun.ac.kr),
***조선이공대학 하이테크CAD/CAM학과(yhgo@cst.ac.kr)

The Characteristics of Thermal Diffusion With the Vertical-Closed Loop Type Geothermal Heat Exchanger

Sun, Jong-Cheol* Kim, Byung-Chul** Koh, Young-Ha***

*Dept. of Mechanical Eng., Graduate School, Chosun University(suntops@naver.com),
**Dept. of Mechanical Eng, Chosun University(bckim@chosun.ac.kr),
***Dept. of Science & Technology Chosun College University(yhgo@cst.ac.kr)

Abstract

The temperatures with the ground depth, the positions of circulation water in ground heat exchanger were measured and thermal diffusion characteristics with the distances of the direction normal to the borehole was analysed. The deeper the depth of ground, the less the influences of outdoor temperature, but below 10m of ground, there was no influences of ground temperature. When the depth of trench pipe was below the depth of 2m, there was no influence. In the ground of 10m when the distances between the pipe and the other places were above 0.5m, the variations of temperature were less than 1.6℃ and above 2.5m they were less than 0.1℃. When the distances of bore hole were above 5m, there were no influences of the nearest ground heat exchanger

Keywords : 지중열교환기(Ground heat exchanger), 보어홀(Borehole), 냉방모드(Cooling condition), 열확산(Thermal diffusion), 히트펌프시스템(Heat pump system)

기 호 설 명

GHEX : 지중열교환기
GSHP : 지열원 히트펌프
OT : 외기 온도
G-0 : 지표면 온도

1. 서 론

최근 기후변화협약 시행과 화석연료의 고갈 등으로 재생가능 에너지의 중요성과 비중은 점차 증가하고 있다. 신·재생에너지 이용에 대한 관심이 증가하며 지열원 히트펌프

시스템(GSHP, ground source heat pump system)은 친환경적인 신·재생에너지 활용 기술로서 많은 관심의 대상이 되고 있다.

히트펌프의 히트싱크(heat sink) 및 열원(heat source)인 지중의 온도는 외기온도와 달리 연간변화가 작기 때문에 GSHP는 높은 효율과 우수한 성능을 가진다.

히트펌프의 냉방 사이클은 실내에서 흡수한 열을 지중열교환기를 통해 지중으로 방출하며 난방 사이클은 지중에서 열을 흡수하여 실내로 공급하므로 지열 에너지를 활용하여 건물의 냉방과 난방을 동시에 구현한다. 반면 열교환기의 매설에 따라 초기설치비는 증가하나 가동 에너지비용이 적어 장기간 사용할 때는 경제적이고 친환경적이므로 건물의 냉·난방 시스템에 적용하는 사례가 증가하고 있다.

지중열교환기는 지중에 설치하여 순환 유체를 파이프 내부로 순환시키는 밀폐형 시스템과 지표수와 지하수를 이용하는 개방형 시스템으로 구분되며, 국내에서는 수직형 열교환기(vertical ground loop heat exchanger)를 이용하는 밀폐형 시스템을 주로 설치하고 있다. 수직형 열교환기는 수직으로 천공된 보어홀(borehole)에 고밀도 폴리에틸렌(HD PE) 재질의 U자형 파이프를 삽입한 후, 파이프와 벽면 사이의 빈 공간에 그라우팅 재료(grouting materials)를 채워 시공한다.

GSHP의 핵심 요소인 지중열교환기의 효율성과 신뢰성의 향상을 위해서는 건물의 냉·난방부하를 정확하게 계산해야 하며, 매설 지역의 토질과 이에 대한 열전달특성을 고려하여야 초기투자비를 줄일 수 있다.

황광일¹⁾ 등은 CFD해석에 의한 수직형 지열교환기의 성능예측에 대하여, 이재근²⁻³⁾ 등은 지열원 히트펌프시스템의 난방성능과 열확산 특성에 대하여 연구하였으며, 임효재⁴⁻⁸⁾ 등은 지중열교환기의 설치조건과 동절기 난방성능과 냉방성능 그리고 보어홀 열저항과 유효 열전도도에 대하여 연구하였다. 그러

나 지중열교환기는 지중으로부터 열을 흡수하거나 지중으로 열을 방출하는 과정에서 열확산 특성에 따라 성능에 영향을 받으므로 보어홀 간 이격거리는 지중열교환기를 설치할 때 중요하나 이에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 실험적 장치를 통해 지중열교환기의 보어홀 반경방향으로 이격거리에 따른 열확산 특성 및 순환수의 위치에 따른 온도변화를 분석하여 지중열교환기설계의 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험대상 건물 개요

실험대상은 광주광역시에 소재하는 복지관으로 연면적 1,500m², 지하1층, 지상4층의 건물로서 냉·난방을 지열원 히트펌프시스템으로 공급하도록 설계되어있다. Fig. 1은 실험대상 건물의 전경을 나타낸다.

Fig. 1 Site view of the building.

2.2 실험장치 및 방법

대상건물의 냉·난방부하는 외기와 내기의 조건을 고려하여 부하계산결과 Table 1과 같으며 지열원 히트펌프 유닛은 냉방 42.1kW/난방 44.3kW 6대를 설치하였다.

실험대상지역의 지질분포는 화강암질이며 열응답 시험결과 열전도값은 2.65W/m·℃ 이

었다. Table 2와 같은 설계조건(input parameter)를 지중열교환기 프로그램인 GLD에 적용하여 보어홀 1홀당 10.16kW로 설계되어 있고 이에 대한 보어홀의 천공개요는 Table 3과 같다.

Table 1 Loads of the building

Floor	Cooling load(kcal/hr)	Heating load(kcal/hr)
1F	9,214	6,656
2F	55,507	34,970
3F	66,084	34,551
4F	49,822	27,060
Total	180,627	103,237

Table 2 Design Input parameter

Flow rate	16.7(L/min)/3.5kW
Specific heat(Cp)	4.156kJ/(K·kg)
Density	999.6kg/m ³
Ground temperature	16.7℃
Thermal conductivity	2.65w/(m·K)
Thermal diffusivity	0.103m ² /day

Table 3 Schematic of boreholes

Borehole diameter	150 mm
Depth of borehole	156.5 m
Distance between boreholes	5.0 m
Quantity of borehole	24 hole
U-tube	32 mm
Grouting materials	bentonite(20%)+water(60%)+superplasticizer(20%)

Fig. 2는 대상건물의 옥외 보어홀의 배치도로서 건물을 중심으로 전·후면에 설치하였으며 22번 홀의 U-tube 표면에 K-type 열전대를 설치하여 온도를 측정하였으며 정확도는 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 이다.

난방부하와 냉방부하가 가장 큰 경우의 순환수 및 지중열교환기에서 이격거리별, 지중 위치에 따른 온도변화를 측정하고 분석하였으며 연중 측정치와 비교분석하였다.

Fig. 2 Location of building and boreholes

또한 Fig. 3은 지열시스템의 계통도를 나타내는데, 1층에서 4층까지의 실내기 위치와 지하 기계실의 히트펌프 그리고 지중열교환기를 나타낸다.

Fig. 3 Schematic diagram of ground source heat pump system

Fig. 4는 히트펌프와 22번홀 지중열교환기의 순환수 위치별, 지표면아래 각 위치별, 지중열교환기에서 이격거리별 열전대의 위치

를 나타낸다.

(1) 지중깊이에 따른 온도분포

열전대는 그 지중의 수직 깊이에 따라 외기(지상1.5m), 지표면, 지표면 아래 1m부터 10m까지는 1m 간격으로 그리고 12m, 15m,

Fig. 4 System diagram of ground source heat pump and the location of thermocouples for measuring the ground temperature.

20m지점의 각 15개소에 열전대를 설치하여 외기온도 변화와 지표면 아래 각각 지점의 온도 변화를 1분 간격으로 측정하여 분석하였다.

(2) 지중열교환기 이격거리별 온도분포

지열히트펌프가 작동할 때 지중 10m지점 지중열교환기에서 수평으로 0.5m 간격으로 2.5m까지 6개소에 열전대를 설치하여 이격거리에 따른 온도변화를 측정하여 계절별 지중 열교환기 주위의 이격거리별 열확산에 의한 온도변화를 수집하여 분석하였다.

(3) 순환수의 위치별 온도분포

지열히트펌프 가동에 따른 순환수의 위치에 따른 온도를 측정하기위하여 히트펌프 입·출구, 건물 입·출구, 트렌치 입·출구(지중·

1.5m), 지중 10m, 60m, 150m 위치의 지중열교환기에 열전대를 설치하여 히트펌프 가동에 따른 온도변화는 DA-100 Data acquisition system을 사용하여 측정한 후 분석하였었다

3. 실험결과 및 고찰

본 실험은 2010년 4월 12일부터 2011년 8월 8일까지 수행되었으며, 설치완료하고 시운전을 마친 후부터 가동을 시작하였다. 하절기는 냉방에만 사용되었으며 동절기에는 바닥 복사 난방과 지열히트펌프가 겸용으로 사용되었다.

3.1 지중깊이별 온도분포

Fig. 5와 Fig. 6은 외기온도에 따른 지표면 아래 20m까지 각 지점의 연간 온도변화를 나타낸다.

Fig. 5 Yearly relations of date and temperature of outdoor and ground with the ground depth

지표면에 가까울수록 외기온도의 영향을 많이 받아 온도의 변화가 컸으며, 깊을수록 외기온도의 영향을 적게 받는 현상을 보였는데 연중 기온에 따른 온도 차이는 지표면 아래 1m에서 14.6℃, 2m에서 6.9℃를, 나타내어 지표면 아래 2 m이하에서는 계절이나 날씨에

따른 온도변화율이 적어짐을 볼 수 있었다. 지표면 아래 5m이하에서는 2.6℃의 차이를 나타내었고, 6m지표면 아래에서 2.1℃, 7m에서 1.6℃, 8m에서 1.1℃, 10m아래에서는 1℃ 이하를 나타내어 거의 지표의 온도변화에 대한 영향이 없음을 나타내었다.

Fig. 6 Yearly relations of ground depth and temperature of outdoor and ground

외기온도는 8월 초순이 가장 높았으나 지표면 아래 2m지점(G-2)에서 최고온도는 10월 하순으로 측정되었으며 지표면 아래 5m지점(G-5)에서는 12월 초순의 온도가 가장 높게 나타났다. 지표면 아래 10m이하에서는 외기온도변화에 따라 영향을 적게 받아 온도변화가 1℃차 이하로 안정적이었고, 지표면 아래 20m 지점의 연간 평균온도는 16.4℃를 나타내었다.

3.2 이격거리에 따른 온도분포

Fig. 7과 Fig. 8은 냉방시(2011.08.03) 하루 중 지표면 아래 10m 깊이에서 지중열교환기 순환수온도와 지중열교환기에서 수평으로 이격거리에 따른 온도변화를 나타낸다.

하루 중 최대부하를 받는 경우와 부분부하를 받는 경우 지중열교환기의 순환수온도가 3.1℃ 변화할 때 이격거리 0.5m지점부터 급격히 줄어들어 0.5m지점부터 2.5m지점까지 각 지점에서 하루 동안 온도변화는 각각 0.1℃차

이를 나타내었으며 각 지점사이의 온도 차이는 0m지점과 0.5m지점사이에는 4.4℃ 차이이며 0.5m지점부터 급격히 적어져 0.5m지점 과 1m지점

Fig. 7 Relations of temperature and time with the distances from the ground heat exchanger under cooling conditions(2011.8.3.)

Fig. 8 Relations of temperature and distances from the ground heat exchanger under cooling conditions with time (2011 8.3.)

사이에서 0.6℃차이, 1m지점과 1.5m지점 사이에서 0.1℃차이, 1.5m지점과 2m지점 사이에서 0.2℃차이, 2m지점과 2.5m지점 사이에서 0.1℃차이를 나타내었으며 보어홀 반경거리 2.5m 지점에서 온도변화가 0.1℃이므로 그 이상의 이격거리는 온도변화가 작으므로 보

어홀사이의 거리가 5m의 경우 지중온도의 변화에 의한 영향이 적을것으로 추정된다.

Fig. 9와 Fig. 10은 난방시(2011.01.18) 지표면아래 10m 깊이에서 지중열교환기 순환수의 온도와 지중열교환기에서 수평으로 이격 거리에 따른 하루의 온도변화를 나타낸다.

Fig. 9 Relations of temperature and time with the distances from the ground heat exchanger under heating conditions(2011.1.18)

Fig. 10 Relations of temperature and distances with the time from the ground heat exchanger under heating conditions(2011.1.18)

순환수의 온도는 최대부하가 걸리는 경우와 부분부하가 걸리는 경우 1°C차이가 날 때 이격거리 0.5m지점부터 급격히 적어져 0.5m 지점부터 2.5m지점까지 각각 지점에서 온도

차이는 각각 0.1°C를 나타내었으며 각 지점사이의 온도 차이는 0m지점과 0.5m지점 사이에서 1.1°C차이며 0.5m 지점부터 급격히 적어져 0.5m지점과 1m지점 사이에서 0.1°C차이, 1m지점과 1.5m지점 사이에서 0.1°C차이, 1.5m지점과 2m지점 사이에서 0.1°C차이, 2m지점과 2.5m지점 사이에서 0.3°C차이를 나타내었으며 보어홀 반경거리 2.5m 지점에서 거의 영향을 미치지 않았다.

Fig. 11과 Fig. 12는 냉·난방시 연간 지표면아래 10m 깊이에서 수평방향으로 이격거리별 온도변화를 나타낸다.

Fig. 11 Yearly relations of date and outdoor temperature with distances from the ground heat exchanger

냉방시와 난방시의 지중열교환기 순환수 온도(GHE-0)의 연중 가장 추운날과 더운날의 지표면아래 10m지점에서 순환수의 온도차는 7.1°C를 나타내었으며 이격거리 0.5m지점에서 1.6°C차이며 1m지점에서 1°C, 1.5m지점에서 0.8°C, 2m지점에서 0.6°C, 2.5m지점에서 0.1°C차이로 나타났다.

냉·난방을 하지 않는 4월, 5월, 10월, 11월에는 이격거리 각 지점의 온도차는 0.2°C이. 하로 거의 없었다.

위와 같이 냉·난방시 지중열교환기 순환수 온도가 변화함에 따라 이격거리 0.5m에서

Fig. 12 Yearly relations of temperature and distances from the ground heat exchanger

2.5m까지의 하루 중 온도변화는 0.1°C 차이로 미세하였으며 연중 온도변화는 0.5m 지점에서 1.6°C 차로 급격히 줄어들어 2.5m 지점에서는 0.1°C 차이를 나타내었으며 보어홀 반경거리 2.5m 지점에서 거의 영향을 미치지 않았다.

이와 같은 결과 지중열교환기 보어홀의 간격이 5m 이상이면 근접 지중열교환기의 영향이 미치지 않아⁹⁾ 열간섭(temperature penalty)이 없음을 나타내었다.

3.3 순환수 위치에 따른 온도분포

Fig. 13과 Fig. 14는 냉방시 순환수의 위치에 따른 온도를 시간에 따라 나타낸다.

냉방운전시 히트펌프의 응축기에서 냉매가 응축되며 발생한 열을 지열순환수와 열교환하여 온도가 높아진 지열 순환수는 히트펌프의 응축기를 나와 순환하며 지중으로 열을 방출한다.

순환수는 지중열교환기 내부를 지하 10m, 60m, 150m까지 순환하며 열교환하여 순환수의 온도는 낮아진다. 지중열교환기의 깊이가 깊어질수록 온도가 낮아지는 것을 알 수 있다. 지중 10m에서 21.7°C 를 나타내었으며 지중 150m에서는 21.5°C 로 구배가 완만해졌다. 이는 지온구배에 의한 지온상승율⁸⁾ 때문으로 추정된다. 따라서 지중 60m에서는 20.8°C 를

Fig. 13 Daily temperature circulating water, surface of the ground heat exchanger under cooling conditions (2011.8.3.)

Fig. 14 Relations of positions and temperature of circulating water from the ground heat exchanger under cooling conditions (2011.8.3. 14:36)

나타내었다. 낮아진 순환수는 트랜치 배관(GHE-S~B-S)을 지나면서 온도는 0.5°C 상승하였으며, 히트펌프 입·출구 온도차는 4°C 이었다.

Fig. 15와 Fig. 16은 난방운전시 순환수 위치별 지중열교환기 표면의 온도변화를 시간에 따라 나타낸다.

Fig. 15 Daily temperature circulating water, surface of the ground heat exchanger under heating conditions (2011.1.18.)

Fig. 16 Relations of positions and temperature of circulating water from the ground heat exchanger under heating conditions (2011.1.18. 15:16)

난방운전에서 히트펌프의 증발기에서 냉매가 증발하는 과정을 거치며 냉각된 지열순환수는 히트펌프의 증발기를 나와 지중열교환기를 순환하면서 지중에서 열을 흡수하여 회복되었다.

지열순환수는 지중열교환기 내부를 순환하면서 열교환작용을 하여 순환수의 온도는 상승한다. 지중열교환기의 온도는 150m에서 15.4°C까지 증가하다가 지중 60m에서 15.2°C로 내려가며 깊이가 낮아질수록 온도가 내려간다. 실내로 들어가며 0.5°C상승하였다. 온도가 상승된 순환수는 트랜치 배관(GHE-S

~B-S)에서 히트펌프 입구까지 지나면서 온도가 하강하였다. 이는 트랜치 배관의 깊이가 1.5m이므로 외기온도의 영향을 받아 열손실이 발생하는 것으로 추정되었다. 히트펌프 입·출구 온도차는 1.8°C이었다.

따라서 트랜치 배관은 지표면아래 2m이상 에 설치하거나 단열 처리하는 것이 타당하다고 생각된다.

4. 결 론

최적의 수직밀폐형 지중열교환기를 설계하기 위하여 운전시 이들의 온도분포를 측정하고 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 지중깊이 1m와 2m사이에서 지중온도에 대한 외기의 영향은 크게 감소하였으며 지중10m이하에서는 영향을 거의 받지 않았다.
- (2) 트랜치 배관의 깊이는 지표면아래 2m이상에서 외기에 의한 영향을 거의 받지 않으며 그 이하에서는 단열처리가 필요하다.
- (3) 지중 10m에서 이격거리가 0.5m이상일 때 연중 온도변화는 1.6°C 이하이며 2.5m 지점에서의 온도변화는 0.1°C이었다
- (4) 지중열교환기 보어홀의 간격이 5m 이상이면 근접 지중열교환기의 영향이 미치지 않는다.

후 기

본 논문은 2012학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

1. Woo. W, "A Performance Prediction of a Vertical-type Geothermal Heat Exchanger by CFD Analysis", Journal of the Korean Solar Energy Society Vol. 27 ,No 3, pp. 117-125, 2007

2. Koo, K. M., Jeong, Y. M., Hoang, Y. J., Lee, J. K., Jang, S. Y., Kim, I. K., Jin, S. W., Lee, D. H., Heating Performance of a Ground Source Heat Pump System through Actual Operation, Proceedings of the SAREK, Summer Annual Conference. pp. 0788-0793, 2008.
3. Choi, J. H., Lim, H. J., Kong, H. J., Sohn, B. H., Effect of Some Parameters on Ground Effective Thermal Conductivity, Proceedings of the SAREK, Winter Annual Conference. pp. 033-038, 2008.
4. Jeong, Y. M., Koo, K. M., Hwang, Y. J., Jang, S. Y., Lee, Y. H., Lee, D. H., Lee, J. K., Measurement of Ground Thermal Conductivity and Characteristics of Thermal Diffusion by the Ground Heat Exchanger, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 20, No. 11, pp. 739-745, 2008.
5. Choi, J. M., Lim, H. J., Kang, S. H., Choi, J. H., Moon, J. Y., Kwon, Y. S., Kwon, H. J., Kim, R. H., Verification experiment of a ground source multi-heat pump at heating season, Proceedings of the SAREK Summer Annual Conference. pp. 052-057, 2009.
6. Choi, J..M., Lim, Kang, H..S., Daily Heating Performance of a Ground Source Multi-heat Pump at Heating Mode, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 21, No. 9, pp. 527-535, 2009
7. Choi, J. M., Kang, S. H., Choi, J. H., Lim, H. J., Moon, J. Y., Kwon, Y. S., Kwon, H. J., Kim, R. H., Verification Experiment of a Ground Source Multi-heat Pump at Cooling Mode, Korean Journal of air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 21, No. 5, pp. 297-304, 2009.
8. Lim, H. J., Kong, H. J., Kang, S. J., Choi, J. H., The effects of the installation conditions of ground loop heat exchanger to the thermal conductivity and borehole resistance, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 23, No. 2, pp. 95-102, 2011.
9. Han, J S., Han, G. S., Han, H. S., Han, C., Geothermal Pump Heating and Cooling System Han Lim Won Pub. Seoul pp 4-13, 2005.