



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2013년 8월
박사학위논문

수직형 지중열교환기의
열확산 특성에 관한 연구

조선대학교 대학원

기계공학과

선종철

수직형 지중열교환기의
열확산 특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Thermal Diffusion
with the Vertical-type Geothermal Heat Exchanger

2013년 8월 23일

조선대학교 대학원

기계공학과

선종철

수직형 지중열교환기의
열확산 특성에 관한 연구

지도교수 김 병 철

이 논문을 공학박사 학위 신청 논문으로 제출함.

2013년 4월

조선대학교 대학원

기 계 공 학 과

선 종 철

선종철의 박사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 윤성운



위원 조선대학교 교수 이규태



위원 중소기업청 연구사 장원택



위원 공병학교 교수 이춘기



위원 조선대학교 교수 김병철



2013년 6월 일

조선대학교 대학원

목 차

Nomenclatures	iii
List of tables	v
List of photos	vi
List of figures	vii
Abstract	xi
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경 및 동향	1
1.2 연구 목적	4
제 2 장 이론적 고찰	6
2.1 지열에너지	6
2.2 지열원 히트펌프 시스템의 원리	9
2.2.1 지열원 히트펌프 시스템의 난방모드	9
2.2.2 지열원 히트펌프 시스템의 냉방모드	11
2.3 지열원 히트펌프 시스템의 종류	13
2.3.1 토양 이용 히트펌프 시스템	14
2.3.2 지하수 이용 히트펌프 시스템	15
2.3.3 지표수 이용 히트펌프 시스템	16
2.3.4 복합 지열원 히트펌프 시스템	17
2.4 히트펌프 형식별 분류	18
2.4.1 물 대 물(Water to Water) 방식	18
2.4.2 물 대 냉매(Water to Gas) 방식	19
2.5 히트펌프의 성능	20
2.5.1 성능계수	20
2.5.2 지중 열전도도 해석 방법	22

제 3 장 실험장치 및 실험방법	28
3.1 실험장치	28
3.1.1 열응답 시험 장치	28
3.1.2 지열 히트펌프 실험 장치	32
3.1.3 지중열교환기의 구조	39
3.2 실험방법	41
3.2.1 열응답 시험 방법	41
3.2.2 지중깊이에 따른 온도측정	42
3.2.3 지중열교환기 이격거리별 온도측정	42
3.2.4 순환수의 위치별 온도측정	42
제 4 장 실험결과 및 고찰	44
4.1 설계변수에 대한 고찰	44
4.1.1 보어홀의 깊이와 지형에 따른 지질분석	44
4.1.2 그라우트(Grout)	50
4.1.3 지중 열전도도 분석	52
4.1.4 지중열교환기 설계변수에 대한 고찰	59
4.2 지중 깊이별 온도분포	61
4.3 이격거리에 따른 온도분포	65
4.3.1 냉방시	65
4.3.2 난방시	71
4.3.3 연간 이격거리별 온도분포	76
4.3.4 지중 온도회복	79
4.4 순환수 위치에 따른 온도분포	86
4.4.1 냉방운전시 순환수 온도	86
4.4.2 난방운전시 순환수 온도	91
제 5 장 결 론	96
References	98

Nomenclatures

- COP_{hp} : Heat pump coefficient of performance
- COP_{sys} : Heat pump system coefficient of performance
- Q : Heating capacity [kW]
- W_c : Power drawn compressor of heat pump [kW]
- W_p : Power drawn the pump [kW]
- W_f : Power drawn fan of indoor unit [kW]
- m_{air} : Air mass [kg/s]
- C_p : Specific heat at constant pressure [kJ/(kg · K)]
- $T_{o,air}$: Outlet air temperature [°C]
- $T_{i,air}$: Inlet air temperature [°C]
- V_{air} : Air volume [m³/s]
- L : Depth of borehole [m]
- r_b : Radius of Borehole [m]
- T_{fi} : Inlet water temperature [°C]
- T_{fo} : Outlet water temperature [°C]
- R_b : Thermal resistance [m · K/W]
- k : Thermal conductivity [W/(m · K)]
- T_f : Average temperature of the circulating fluid [°C]
- T_b : Temperature of borehole wall [°C]
- T_o : Initial ground temperature [°C]

a : Thermal diffusivity ($\kappa/\rho c$) [m^2/s]
 c : Specific heat [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]
 t : Operating time [sec]
 s : Slope
OT : Outdoor temperature [$^{\circ}\text{C}$]

Greek Symbols

k : Thermal conductivity [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
 ρ_{air} : Air density [kg/m^3]
 ρ : Density [kg/m^3]
 γ : Euler's constant (0.5772)

Subscripts

hp : Heat pump
 c : Compressor
 p : Pump
 f : Fan
 o : Outlet
 i : Inlet
 b : Borehole

List of tables

Table 1	Geothermal heat flow and thermal conductivity of rock types	7
Table 2	Comparison of ground heat exchanger type	13
Table 3	Specification of the in-situ thermal response tester	30
Table 4	Loads of the building	32
Table 5	Design Input parameter	34
Table 6	Schematic of boreholes	34
Table 7	Geological features of borehole depth	47
Table 8	Thermal properties of soil	49
Table 9	Thermal properties of the grout	51
Table 10	Specification of the in-situ thermal response tester and the ground thermal conductivity	58

List of photos

Photo 1. In-situ ground effective thermal conductivity test unit	28
Photo 2. Ground source heat pump outdoor unit	33
Photo 3. Data acquisition unit(DA100+, YOKOGAWHA)	36
Photo 4. Data acquisition unit(Computer)	36

List of figures

Fig 1. Schematic diagram of ground source heat pump system (Heating mode)	10
Fig 2. Schematic diagram of ground source heat pump system (Cooling mode)	12
Fig 3. Schematic diagram of surface water loop ground heat exchanger	16
Fig 4. Schematic diagram of ground source heat pump system (Water to Water)	18
Fig 5. Schematic diagram of ground source heat pump system (Water to Gas)	19
Fig 6. Schematic of ground heat exchanger & borehole section	22
Fig 7. Schematic of an in-situ thermal response test apparatus	29
Fig 8. Location of building and ground loop heat exchanger boreholes	35
Fig 9. Schematic diagram of ground source heat pump system	37
Fig 10. System diagram of ground source heat pump and the location of thermocouples for measuring the ground temperature	38
Fig 11. Schematic diagram of ground heat exchanger section	39
Fig 12. Schematic diagram of ground heat exchanger	40
Fig 13. Field geological map	45
Fig 14. Initial temperature of the inlet and the outlet	53
Fig 15. Temperature distribution of the inlet and the outlet of the ground heat exchanger for measuring the thermal conductivity of ground	54
Fig 16. Flow rate of circulating fluid and power input	55
Fig 17. Logarithmic time plot of the mean fluid temperature for calculating the thermal conductivity of ground	56

Fig 18. Logarithmic time plot of the mean fluid temperature for calculating the thermal conductivity of ground	57
Fig 19. Borehole design project report	59
Fig 20. Borehole design project report	60
Fig 21. Yearly relations of date and temperature of outdoor and ground with the ground depth	61
Fig 22. Yearly relations of ground depth and temperature of outdoor and ground	62
Fig 23. Yearly relations of ground depth and temperature difference	63
Fig 24. Relations of temperature and time with the distances from the ground heat exchanger under cooling conditions (2011.8.3.)	66
Fig 25. Relations of temperature and distances from the ground heat exchanger under cooling conditions with time (2011.8.3.)	67
Fig 26. Relations of temperature and distances from the ground heat exchanger under cooling conditions with season (Summer)	69
Fig 27. Relations of temperature and distances from the ground heat exchanger under cooling conditions with season (Summer)	70
Fig 28. Relations of temperature and time with the distances from the ground heat exchanger under heating conditions (2011.1.18)	71
Fig 29. Relations of temperature and distances with the time from the ground heat exchanger under heating conditions (2011.1.18)	72
Fig 30. Relations of temperature and distances from the ground heat exchanger under heating conditions with season (Winter)	74
Fig 31. Relations of temperature and distances from the ground heat exchanger under heating conditions with season (Winter)	75

Fig 32. Yearly relations of date and outdoor temperature with distances from the ground heat exchanger	76
Fig 33. Yearly relations of temperature and distances from the ground heat exchanger	77
Fig 34. Yearly relations of date and ground heat exchanger surface temperature with distances(2.5 m) from the ground heat exchanger	79
Fig 35. Yearly relations of date and ground heat exchanger surface temperature with distances(2.0 m) from the ground heat exchanger	80
Fig 36. Yearly relations of date and ground heat exchanger surface temperature with distances(1.5 m) from the ground heat exchanger	81
Fig 37. Yearly relations of date and ground heat exchanger surface temperature with distances(1.0 m) from the ground heat exchanger	82
Fig 38. Yearly relations of date and ground heat exchanger surface temperature with distances(0.5 m) from the ground heat exchanger	83
Fig 39. Yearly relations of date and ground heat exchanger surface temperature with distances from the ground heat exchanger	84
Fig 40. Relations of time and outlet temperature of GSHP under cooling conditions (2011.8.3.)	87
Fig 41. Daily temperature circulating water, surface of the ground heat exchanger under cooling conditions (2011.8.3.)	88
Fig 42. Relations of positions and temperature of circulating water from the ground heat exchanger under cooling conditions (2011.8.3. 14:36)	90

Fig 43. Relations of time and outlet temperature of GSHP
under heating conditions (2011.1.18.) 92

Fig 44. Daily temperature circulating water, surface of the ground heat
exchanger under heating conditions (2011.1.18.) 93

Fig 45. Relations of positions and temperature of circulating water
from the ground heat exchanger under heating conditions
(2011.1.18. 15:16) 95

ABSTRACT

A Study on the Characteristics of Thermal Diffusion with the Vertical-type Geothermal Heat Exchanger

Sun, Jong-Cheol

Advisor. Prof. Kim, Byung-Chul Ph.D.

Department of Mechanical Engineering,

Graduate School of Chosun University

Recently the whole world are looking for a wide variety of ways to solve the problem of global warming caused by greenhouse gases. As part of that, ground source heat pump system(GSHP) has received a lot of attention as renewable energy facilities keeping pace with government's low-carbon green growth paradigm. Research has shown that domestically supply and installation capacity of GSHP continues to grow more than 1.5 times each year, passing over a total installed capacity of 104,922 kW at the end of 2008 and 307,501 kW in 2011. This growth is expected to continue for the future because the combination of social awareness on renewable energy and economic value of GSHP creates the synergies.

GSHP is the heating and cooling system that largely consists of a heat exchanger and heat pump. It's the highly efficient system because it is not almost affected by the ambient temperature and takes advantage of the underground's constant temperature. It's environmentally friendly because it emits less the greenhouse gas such as carbon dioxide relatively compared to the existing air conditioning and heating equipment.

Up to now, as to GSHP, the research and demonstration on the development

mainly was carried out to improve the various underground heat exchanger applicability and thermal conductivity.

To the optimal design of the vertical ground loop heat exchanger that mostly installed in the country, the accurate calculation of the effective thermal conductivity should be applied to its design. If the underground heat exchanger's interval is too close, heat pump performance that bumped to the limits of the heat capacity by long time operation, does not fulfill the role of heat sink and heat source. If the gap is too large, it will be disadvantageous economically because the installation of underground heat exchanger takes up a lot in a limited land area. Therefore, the distance between the ground heat exchanger installations is very important for the performance of the system. To improve the performance and ensure the reliability of the underground heat exchanger as a key element of the geothermal source heat pump system, the heat transfer characteristics of the underground heat exchanger should be reflected in the design. The distance between the boreholes is so important that the effect on the performance of ground heat exchanger is taken according to the nature of the thermal conductivity and thermal diffusivity in the process of absorbing heat from the ground or dissipating heat to the underground.

Even now the analysis of heat transfer and thermal diffusivity in the direction of the radius of the bore hole is insufficient.

In this study, to analyze the thermal conductivity calculated by performing In-situ ground thermal conductivity test, depending on the depth of the underground through the experimental device operated at the actual building,

In first, by installing each 15 thermocouples according to a vertical depth of the Ground in the ambient (1.5 m), the surface, from 1 m below the surface to 10 m at the intervals of 1 m, and in 12 m, 15 m, 20 m places, the temperature variations of the each points are respectively measured at one-minute intervals.

Secondly, by installing each 6 thermocouples from a point 10 meters

underground to 2.5 m horizontally at intervals of 0.5 m in six places, the changes in temperature due to the thermal diffusivity by the distance and by the season are collected and analyzed to study the temperature distribution by distance between the operating underground geothermal heat pumps.

Finally, by installing K-type thermocouples on the Heat Pump entrance & exit, the building entry & exit, the underground trench entry & exit (underground 1.5 m), and on the surface of each 10 m, 60 m, 150 m underground geothermal heat pump, this paper presents the basic data for the optimization of the underground heat exchanger distance using a DA-100 Data acquisition system.

This paper shows the following results by measuring and analyzing the temperature distribution of the vertical ground heat exchanger.

- 1) On the in-situ thermal response test, the initial temperature of the soil in the ground for 50 minutes without heat with no difference between the Inlet and outlet of the circulation was 16.6°C regularly.
- 2) On the in-situ thermal response test, to the average temperature change curve, the equation of the slope (Logarithmic time) was $Y=1.8061X+16.6449$, and the slope value was 1.81.
- 3) Temperature changes of the ground heat exchanger inlet-outlet were measured and the Line-source model was applied to the calculation. The ground thermal conductivity value was 2.65 W/m·K at the target area of the experiments.
- 4) The influence of the ambient over the underground temperature is significantly reduced between 1 m and 2 m of underground depth, is least affected from 10 m or more.
- 5) The annual average temperature 20 m below the surface was 16.4°C. Time lag was shown for the deeper we went below the surface the less affected by outside temperature, the later the effect of temperature changes appeared.
- 6) The depth of the trench pipe at least over 2 m below the surface is little affected by the ambient and the insulation is needed more under that depth.

- 7) The annual temperature change value at the point 0.5 m distant from the underground heat exchanger of the underground 10 m is less than 1.6°C and at the point 2.5 m is 0.1°C.
- 8) If the interval between the bore holes of the underground heat exchangers is more than 5 m, the proximity has no influence.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 동향

최근 기후변화협약과 화석연료의 고갈에 따른 가격 상승으로 인하여 신·재생에너지의 중요성과 비중은 점차 증가하여 신·재생에너지의 활용 및 기술개발에 대한 관심이 증가하고 있다.^{1), 2)}

건물과 관련된 에너지소비량은 전 세계 에너지소비량의 약 40%를 차지하고 있으며 그중 절반 이상을 냉·난방 및 급탕에서 사용되는 에너지가 차지하고 있다.³⁾ 그리고 지열원을 이용한 에너지 사용량 중 미국, 중국 그리고 북유럽 국가가 전 세계 지열원 에너지 생산량의 60%를 담당하고 있으며, 세계적으로 2005년 이후 매년 10%이상의 시스템 설치 증가율을 보이고 있다. 특히 국내에서는 신·재생에너지 기술개발, 연구 및 적용이 활발하게 이루어진 결과 과거 5년간 지열원 냉·난방 시스템 설치 비율이 영국 스페인 등과 함께 크게 증가하였으며.⁴⁾ 신·재생에너지 활성화 보급 정책에 따라서 100만호의 주택에 신·재생에너지 설비 설치를 추진하는 그린홈 100만호 사업이 실시되고 있다.

따라서 획기적인 에너지절감을 위해서는 고효율 냉·난방시스템의 개발이 절실하다.

이에 따라 지열원 히트펌프 시스템(Ground source heat pump system, GSHP)은 친환경적인 신·재생에너지 활용 기술로서 많은 관심의 대상이 되고 있다.

히트펌프의 히트싱크(Heat sink) 및 열원(Heat source)인 지중의 온도는 외기온도와 달리 연간 온도변화가 작기 때문에 지열원 히트펌프 시스템(GSHP)은 높은 효율과 우수한 성능을 가진다.⁵⁾ 히트펌프의 냉방 사이클은 실내에서 흡수한 열을 지중열교환기를 통하여 지중으로 방출하며 난방 사이클은 지중에서 열을 흡수하여 실내로 공급하므로 지열 에너지를 이용하여 건물의 냉방과 난방에 활용한다. 반면 지중열교환기의 매설공사에 따른 초기설치비는 많이 들어가나 가동 에너지비용이 적어 장기간 사용할 경우에는 경제적이고 친환경적이므로 건물의 냉·난방시스템에 적용하는 사례가 증가하고 있다.

지중열교환기는 지중에 설치하여 순환유체를 파이프 내부로 순환시키는 밀폐형 시스템과 지표수와 지하수를 이용하는 개방형 시스템으로 구분되며, 국내에서는 수직형 열교환기(Vertical ground loop heat exchanger)를 이용하는 밀폐형 시스템이 주로 설치되고 있다. 수직형 지중열교환기는 수직으로 천공된 보어홀(Borehole)에 고밀도 폴리에틸렌(High density polyethylene, HDPE) 재질의 U자형 파이프(U-tube)를 삽입한 후, 파이프와 벽면 사이의 빈 공간에 그라우팅 재료(Grouting materials)를 채워 시공한다.

지열원 히트펌프 시스템(GSHP)의 핵심 요소인 지중열교환기의 효율성과 신뢰성의 향상을 위해서는 건물의 냉·난방부하를 정확하게 계산해야 하며, 매설 지역의 지질과 이에 대한 열전달특성을 고려하여 설계에 반영하여야 초기투자비를 줄일 수 있다.

본 연구를 진행하기 위해 선행된 연구와 연구동향을 살펴보았다. 황광일 등은 지중열교환기의 열전달 성능과 지중 온도변화를 예측하기 위한 3 차원 CFD 해석 모델을 제안하고 보어홀 간격의 변화에 따른 지중열교환기 입·출구의 온도변화와 지중열교환기 주변 지중 온도변화에 대하여 측정하고 지중열교환기의 성능을 예측하는 CFD 해석 기법을 제안하였다.⁶⁾

이재근 등은 물대 냉매 방식의 멀티 히트펌프에 지열원을 적용하여 건물에서의 실사용 시험을 통한 난방성능 변화와 시스템 운전에 따른 지중온도변화를 비교하기 위해 매설깊이에 따른 지중온도를 측정하여 지중열교환기의 열확산 특성을 분석하였으며,⁷⁾ 실험적 장치를 통해 지중 열물성치인 지중 열전도도를 측정하기 위해 열교환기의 입·출구 온도변화를 측정하여 열전도도를 계산하였고, 지중 깊이 및 지중열교환기의 보어홀 반경으로 열확산 특성을 분석하기 위하여 무 부하상태로 순환수를 순환시켜 지중열교환기에서 2.5 m 떨어진 지점에서 지중 깊이별로 5 m 마다 측정한 결과 지표면 아래 2.5 m 지점에서는 외기 온도에 따라 변화하지만 지표면 아래 10 m 이하 지점에는 온도변화가 안정적인 결과와 지표면 아래 10 m 지점에서 1.5 m, 2.5 m 떨어진 지점의 지중온도를 측정한 결과 지중열교환기의 표면온도와 관계없이 온도는 동일한 결과를 얻었다.⁸⁾

임효재 등은 현지 열응답 시험을 실시하여 지중 유효열전도도를 산정하고, 지중열교환기를 70 m, 60 m, 50 m로 길이의 변화에 대한 성능영향과 그라우팅 재료의 혼합비율

을 다르게 하여 그라우팅재료가 열전도도에 미치는 영향, 지중열교환기 파이프 스페이스 설치간격이 지중열교환기의 성능에 미치는 영향에 대하여 연구하였고,^{9, 10)} 최종민 등은 복수의 실내기를 갖고 가변속 압축기를 채용한 지열원 물 대 공기 멀티 히트펌프 시스템을 설치하여 제조사의 운전 제어 알고리즘에 따른 난방 실증 성능을 평가 분석하여 U-tube 시스템과 이중관 시스템의 난방 성능계수(Coefficient of performance, COP) 값을 측정하여 성능평가 및 분석하였다.¹¹⁻¹³⁾

손병후 등은 단독주택 적용 지열 히트펌프 시스템의 성능 분석과¹⁴⁾ 수평형 지열 히트펌프 시스템의 냉난방 성능 분석을 하였고,¹⁵⁾ 강신형 등은 수평형 지열원 열펌프 시스템의 지중온도 변화 특성에 대한 분석을 수행했으며,¹⁶⁾ 김용찬 등은 하이브리드 지열히트펌프의 동특성에 관한 실험적 연구를 실시하였으며,¹⁷⁾ 남유진 등은 지중열이동 해석 모델을 이용한 수평형 지열시스템의 채열량 예측에 관한 연구와¹⁸⁾ 토양 및 지하수 조건이 지열공조시스템의 성능에 미치는 영향에 관한 수치 해석적 연구를 수행하였다.¹⁹⁾

이와 같이 지열 히트펌프 시스템과 지중열교환기의 성능평가 및 분석을 통하여 지열 히트펌프 시스템의 성능을 향상시키기 위한 이론적이며 실험적인 연구가 꾸준히 진행되고 있다.

그러나 지중열교환기 성능의 중요한 영향을 미치는 보어홀 이격 거리에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

1.2 연구 목적

최근 전 세계는 온실가스에 의한 기후변화문제를 해결하기 위하여 다양한 방안을 모색하고 있다.¹⁴⁾ 그 일환으로 신·재생에너지 설비로 지열원 히트펌프 시스템은 많은 관심을 받고 있으며 정부의 저탄소 녹색성장의 기조에 발맞추어 국내 지열원 히트펌프 시스템의 보급 및 설치용량은 매년 1.5배 이상의 성장을 지속하고 있으며, 2008년 말 지열원 히트펌프 시스템의 총 설치용량은 104,922 kW를 돌파하여²⁰⁾ 2011년에 307,501 kW를 넘어선 것으로 나타나고 있다.²¹⁾ 이는 신·재생에너지에 대한 사회적인 인식 확대와 지열원 히트펌프 시스템의 경제적 가치가 결합되어 나타나는 시너지효과로 분석되며 향후 이러한 성장은 당분간 지속될 것으로 전망되고 있다.²²⁾

지열원 히트펌프 시스템은 크게 지중열교환기와 히트펌프로 구성되어 있는 냉·난방 겸용 시스템이다. 외기에 거의 영향을 받지 않는 지중의 항온성을 활용하기 때문에 효율이 높은 시스템이다.¹⁴⁾ 기존 냉·난방 설비와 비교하여 이산화탄소와 같은 온실가스를 상대적으로 적게 배출하기 때문에 친환경적이다.

현재까지 지열원 히트펌프 시스템에 대해서는 다양한 지중열교환기의 적용성과 열전도도 향상 방안에 대한 연구와 실증화에 관한 개발이 주로 진행되었다.²³⁾

국내에 설치되는 지열원 히트펌프 시스템 중 대부분을 차지하는 수직형 지중열교환기의 최적 설계를 위하여 지중 유효 열전도도를 정확하게 산정하여 지중열교환기 설계에 적용하여야 한다.²⁴⁾ 만약 지중열교환기의 간격이 너무 가까울 경우 지중열교환기의 장시간 가동으로 지중열교환기의 열용량의 한계에 부딪쳐 히트펌프의 히트싱크 및 열원의 역할을 다하지 못하여 히트펌프의 성능을 발휘하지 못하고, 반대로 지중열교환기의 간격이 너무 클 경우 한정된 대지면적에서 지중열교환기의 설치 소요면적이 많이 차지하여 경제적으로 불합리하게 된다. 그렇기 때문에 지중열교환기의 설치 이격간격의 결정이 지열원 히트펌프 시스템의 성능발휘를 위하여 매우 중요하다.

지열원 히트펌프 시스템의 핵심 요소인 지중열교환기의 성능을 향상시키고 신뢰성을 확보하기 위하여 지중열교환기의 열전달특성을 고려하여 설계에 반영하여야 한다. 지중열교환기는 지중으로부터 열을 흡수하거나 또는 지중으로 열을 방출하는 과정에서

열전도도나 열확산 특성에 따라 지중열교환기의 성능에 영향을 받으므로 지중열교환기를 설치할 때 보어홀간의 이격 거리가 중요하다. 그러나 지중열교환기의 보어홀 반경 방향으로 거리별 열전달이나 열확산에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 현지 지중열전도도를 측정하여 지중열원의 온도분포 및 지중열전도도를 계산하였으며, 지열원 히트펌프 시스템을 실제 건물에서 가동하는 실험적 장치를 통하여 순환수의 위치에 따른 온도변화를 분석하고, 지중열교환기의 지표면아래 지중에서 수평방향으로 열전대를 설치하여 지중열교환기의 보어홀 반경방향으로 이격 거리에 따른 열전도도와 열확산 특성을 분석하고 지중열교환기의 온도의 변화를 분석하여 지중열교환기 설계 시 지중열교환기 이격 거리의 최적화를 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

제 2 장 이론적 고찰

2.1 지열에너지

지열에너지란 지구가 가지고 있는 열에너지를 총칭하나 최근에 지열에너지는 인간에 의해 발견되고 개발된 또는 개발될 수 있는 지구의 열을 지칭하는 의미로 자주 쓰인다. 지열의 근원은 지각 및 맨틀을 구성하고 있는 물질 내부의 방사성 동위원소 즉, 우라늄(U238, U235), 토륨(Th232)과 칼륨(K40)의 붕괴에 의한 것이 약 83%, 맨틀 및 그 하부 열의 방출 즉, 지구가 서서히 식어가는 과정에 의한 원인이 약 17%로 알려져 있으며, 지표에서 느껴지는 지열의 약 40%가 지각에 의한 것으로 추정되고 있다.²⁵⁾

지구는 매년 5.5×10^{24} Joule의 태양열 에너지가 지구표면에 복사되며 이 가운데 34%는 먼지나 지표면에 직접 반사되어 단파장의 형태로 우주공간으로 되돌아가며, 19%는 대기에 흡수되고, 잔여 47%는 해면이나 육지표면에 흡수 저장된다.

지중에 흡수 저장되는 태양복사열 가운데 23%는 수증기의 잠열로, 잔여 24%는 전도, 대류 및 복사되어 대기로 이동한다. 지구표면은 태양으로부터 흡수되는 열과 방사되는 열이 균형을 이루어 일정한 온도를 유지한다.

특히 대기가 직접 흡수한 19%의 태양 복사열과 지중에서 전달된 47%의 합인 태양복사열 가운데 66%는 장파장의 형태로 우주 공간으로 되돌아간다. 따라서 대기 공간에서도 흡수된 열과 방사된 열량이 균형을 이루어 대기권은 일정한 온도를 유지하도록 해준다.⁵⁾

이러한 지열은 지표면으로 부터의 깊이에 따라 심부지열(Deep geothermal)과 천부지열(Shallow geothermal)로 구분 된다.²⁶⁾ 심부지열은 지하 200 m 이하부터 존재하는 에너지를 의미하며 40 ~ 150°C 이상의 온도를 유지한다. 천부지열은 지표면으로 부터 150 ~ 200 m까지 저장된 지열을 의미한다. 이때의 지중온도는 지형 및 지역에 따라 차이를 보이지만 대략 10 ~ 20°C 정도이다.²⁷⁾

지표면아래 특정심도 이하에서는 지중온도가 연중 거의 변하지 않는 일정한 온도를

유지하는데 이 심도 또는 지층을 항온대 혹은 항온층이라 한다. 항온층의 심도는 지표면온도의 변화폭이 적을수록 알아진다. 항온층이하 심도에서의 지중온도는 연간 일정하지만 심도가 깊어질수록 지중온도는 점차 증가하는데 이를 지온구배 또는 지온증가율(Geothermal gradient)라 한다.

일반적으로 국내에서 지열 이상대가 아닌 일반지역에서의 지온구배는 100 m당 약 1.6 ~ 3.0°C이며 지열 이상대에 속하는 강원도 속초시와 충남 예산에서는 7.61 ~ 8.35°C/100 m에 이르며, 국내의 평균 지온구배는 약 2.5°C/100 m이다. 이와 같이 지온구배가 지역마다 다른 이유는 지중에서 지표로 흐르는 지열유량이 서로 다르고 토양, 암석의 열전도율이 서로 다르기 때문이다. Table 1은 국내에 분포된 각종 암석의 지열유량과 열전도도를 나타낸다.²⁸⁾

Table 1 Geothermal heat flow and thermal conductivity of rock types

Rock type	Geothermal heat flow (W/m ²)	Thermal conductivity (W/m·K)
Granite	60.47 × 10 ⁻³ ~ 93.04 × 10 ⁻³	1.98 ~ 3.63
Granodiorite	39.54 × 10 ⁻³ ~ 69.78 × 10 ⁻³	2.21 ~ 3.02
Gabbro	46.52 × 10 ⁻³ ~ 58.15 × 10 ⁻³	1.63 ~ 2.33
Gneiss	50.00 × 10 ⁻³ ~ 68.61 × 10 ⁻³	2.67 ~ 4.40
Biotite schist	36.05 × 10 ⁻³	1.72
Limestone	55.82 × 10 ⁻³ ~ 125.60 × 10 ⁻³	2.50 ~ 5.21
Black sandstone	39.54 × 10 ⁻³ ~ 51.17 × 10 ⁻³	1.98 ~ 2.21
Felsite	137.23 × 10 ⁻³	5.58
Slate	51.17 × 10 ⁻³	2.19

지열에너지 자원의 활용 기술은 크게 150℃ 이상의 지열 유체를 이용한 발전 기술과 이보다 낮은 온도의 지열수를 지역난방 등에 이용하는 직접 이용기술로 나눌 수 있는데, 최근에는 깊이 300 m 이내 지하의 연중 일정한 온도를 이용하여 냉·난방 시스템을 구현하는 지열원 히트펌프 또는 지열 펌프(Ground source heat pump 또는 geothermal heat pump)로 분류 한다.

2.2 지열원 히트펌프 시스템의 원리

지열원 히트펌프 시스템은 지표면 아래로 5 m까지의 지중온도는 외기 온도변화에 영향을 받지만, 그 이하부터는 연중 일정한 값을 가진다. 연중 온도가 일정한 지중, 지하수 및 지표수를 냉방시에는 히트싱크(Heat sink)로, 난방 시에는 열원(Heat source)으로 이용하여²⁹⁾ 건축물의 냉·난방을 동시에 가능하도록 하는 복합형 시스템이다.

일반적인 지열원 히트펌프 시스템은 지중 300 m 이내로 천공된 보어홀에 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 재질의 U자형 파이프를 설치하고, 설치된 파이프에 유체를 순환시켜 지중과의 열교환을 통하여 냉·난방에 필요한 에너지를 공급하는 것이다.

2.2.1 지열원 히트펌프 시스템의 난방모드

히트펌프 내부의 증발기를 지나는 차가운 액체 냉매가 지중열교환기 내의 순환유체로부터 열을 흡수하여 증기로 상변화를 한다. 증발과정 후 온도가 하강된 순환유체는 지중열교환기를 순환하면서 다시 온도를 회복한다. 이런 원리로 지중은 열원(Heat Source)의 역할을 수행하며, 난방 사이클을 구성한다. 유입순환유체온도(Entering Water Temperature, EWT)는 일반적으로 약 9°C이며, 히트펌프 출구 온도는 약 5°C가 된다.

온도가 강하된 순환유체는 지중열교환기 파이프 내를 순환하면서 약 16°C 정도의 지중과 열교환을 하며, 적절한 유입온도(EWT : 약 9°C)로 회복되면서 시스템의 사이클이 구성된다. 경우에 따라서 순환유체의 온도가 0°C 이하로 내려가는 경우가 있지만 순환유체의 동결점은 약 -7 ~ -12°C이므로 동결되지 않는다. 순환유체가 지중으로부터 흡수한 열량은 지하의 열용량을 고려하여 산출하며, 이를 근거로 지중열교환기의 크기를 결정하게 된다. 지중열교환기는 냉·난방 모두의 경우에 지중열교환기의 역할을 하는 것이며, 보어홀의 열저항, 지중의 열용량, 순환유체의 유량 등에 지중 열교환기의 성능은 결정되게 된다.

Fig. 1은 지열원 히트펌프 시스템의 난방 사이클의 개략도를 나타낸다.

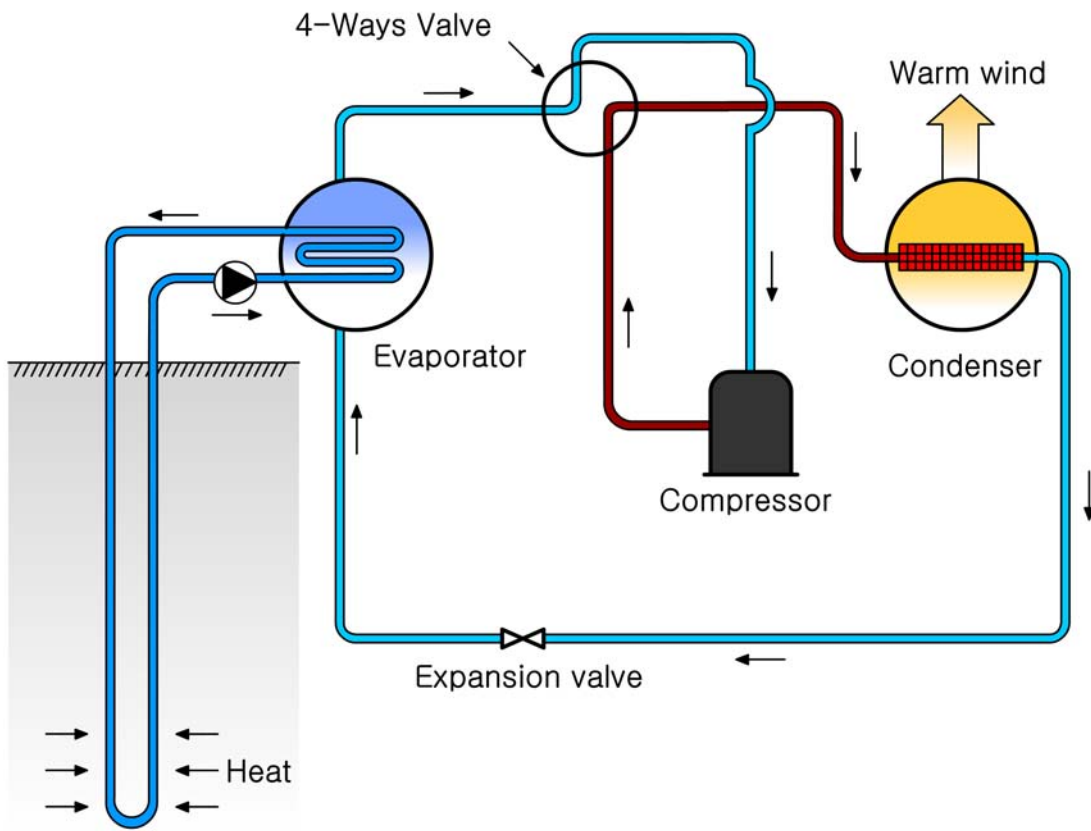


Fig. 1 Schematic diagram of ground source heat pump system(Heating mode)

2.2.2 지열원 히트펌프 시스템의 냉방모드

냉방모드의 경우는 난방모드와는 반대로, 히트펌프 내부의 응축기를 지나는 뜨거운 기체 냉매가 지중열교환기 내의 순환유체로 열을 방출하여 액체냉매로 상변화를 하게 된다. 응축과정 후 온도가 상승된 순환유체는 지중열교환기 파이프 내를 순환하면서 온도를 회복하며 구동된다. 이러한 원리로 지중은 열을 방출하는 히트싱크(Heat Sink)의 역할을 수행하고, 냉방 사이클을 구성한다.

일반적인 시스템에서 히트펌프로 유입되는 순환유체 온도(Entering Water Temperature, EWT)는 약 20℃이며, 냉매로부터 열을 받게 되어 약 3 ~ 5℃ 정도의 온도가 상승하게 된다. 상승된 순환유체의 온도는 지중열교환기 파이프 내를 순환하면서 약 16℃의 지중과 열교환을 하여 적절한 EWT(약 20℃)로 회복되어서 시스템의 사이클을 구성한다.

순환유체가 방출한 열량은 모두 지중으로 버려지게 되므로 열용량을 고려하여 지중 열교환기의 크기를 설계해야 한다. 지중열교환기는 열교환기 역할을 하며 보어홀의 열저항, 지중의 열용량, 부동액의 유량 등에 지중 열교환기의 성능이 결정된다.

Fig. 2는 지열원 히트펌프 시스템의 냉방 사이클의 개략도를 나타낸다.

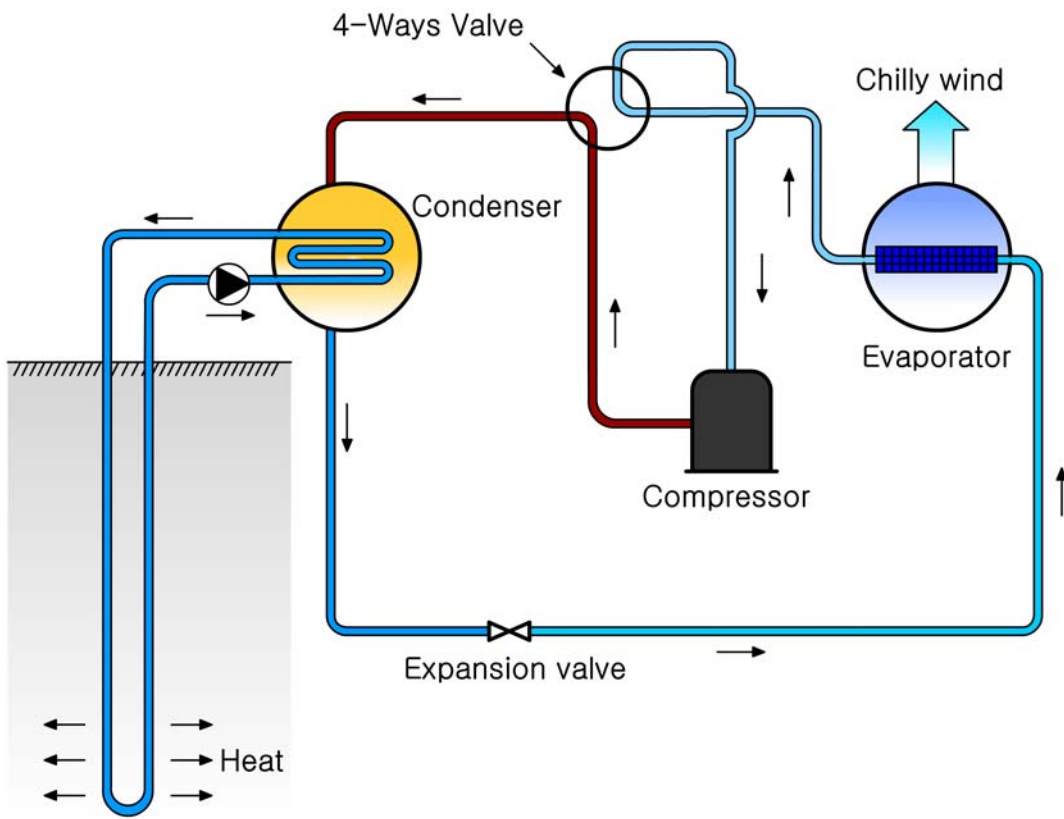


Fig. 2 Schematic diagram of ground source heat pump system(Cooling mode)

2.3 지열원 히트펌프 시스템의 종류

지열원 히트펌프 시스템은 열원에 따라 토양이용 히트펌프(Ground Couple Heat Pump), 지하수이용 히트펌프(Ground Water Heat Pump), 지표수이용 히트펌프(Surface Water Heat Pump) 그리고 복합 지열원 히트펌프(Hybrid Ground Source Heat Pump) 등으로 구분할 수 있다. Table 2는 각각 지중열교환기 방식을 비교하여 나타내었다.

Table 2 Comparison of ground heat exchanger type

Item	Vertical type	Horizontal type	Standing column well system(SCW)	Ground water heat pump system
Schematic diagram				
Depth of borehole(m)	100 ~ 200	1.5 ~ 2	350	100
Capacity per borehole(RT)	2 ~ 3	Proportional to Area	20 ~ 40	Proportional to flow
Quantity of borehole per 100 RT	33 ~ 50	length of trench	4	2
Area (m ²)	1,000 ~ 1,300	2,400	100	100
Heating EWT(℃)	3	1	15	13
Cooling EWT(℃)	23	25	25	13

2.3.1 토양 이용 히트펌프 시스템

토양이용 지열 냉·난방 시스템은 수직형과 수평형으로 구분된다. 수직형 지중열교환기는 토양 속에 수직으로 매설되며, 수평형 지중열교환기에 비해 지중열교환기 매설에 필요한 부지가 상대적으로 적다. 또한 지중열교환기를 냉난방 용량에 따라 다양한 깊이로 매설할 수 있으며, 배관 및 부동액 이송동력이 적게 소요되기 때문에 가장 효율이 높은 열교환기 형식이다. 일반적으로 수직형 지중열교환기는 직경 100 ~ 150 mm, 깊이 100 ~ 200 m의 보어홀을 지면에서 천공한 후 U-tube 고밀도 폴리에틸렌 파이프를 삽입한다.

지중열교환기가 지면에 수평으로 매설되는 수평형 지열 냉·난방 시스템의 시공비는 수직형에 비해 저렴하다. 하지만 설치공간의 제약이 많아 학교 또는 공공기관의 운동장이나 주차장 등과 같이 지중열교환기를 설치할 수 있는 부지가 충분한 경우 경제적이다. 반면 지중열교환기 파이프가 지면에서 0.5 ~ 2m의 깊이로 굴착한 트랜치(Trench)에 매설되기 때문에 매설 위치에서 지중 온도 및 지중 열물성치 등이 계절 및 강우 등에 영향을 많이 받아 효율이 수직형 시스템에 비해 낮다.

2.3.2 지하수 이용 히트펌프 시스템

지하수 이용 지열 냉난방 시스템은 지열 냉난방 시스템 중 가장 오래전부터 사용되어진 시스템 중 하나이다. 그러나 이 시스템은 외형적으로는 단순해 보이나 효율적이고 신뢰성 있는 시스템 구축을 위해 지하수정의 설계, 지하수 유량 및 지하수 처리 등에 대한 심도 있는 검토가 필요하다. 지하수 이용 지열냉난방 시스템은 양질의 지하수가 풍부할 때 이를 이용한 시스템이다. 지하수 이용 시스템은 효율이 우수하지만 물속의 슬러지나 오염물질로 인해 배관 및 열교환기에 스케일을 일으킬 수 있다. 이 스케일은 주기적인 세척에 의해 제거할 수 있으나, 유지보수 비용을 필요로 한다. 따라서 지하수의 수질과 수량이 우수하다고 판명되었을 때 이 시스템을 적용할 수 있다. 그러나 시스템 설계가 적절하지 못하거나 수원이 깊으면 펌프의 소비동력이 증가하여 운전효율이 하락한다.

단수정 지열 냉난방 시스템은 단일홀에 취수구와 입수구가 설치되어 있어 운전 중 유량변화가 적은 장점이 있지만, 열교환량을 확보하기 위해 보어홀 깊이를 깊게 해야 하는 단점이 있다.

복수정 지열 냉난방 시스템은 취수구와 입수구를 별도로 설치한 시스템으로 열교환 효율이 단수정 시스템보다 우수하나, 입수구에서 지하수 유입에 특별한 기술을 필요로 한다.

2.3.3 지표수 이용 히트펌프 시스템

지표수 이용 지열 냉·난방 시스템은 연못, 호수, 강 및 바다 등을 Heat source 또는 Heat Sink로 이용하는 것이다. 지표수 이용 지열 냉·난방 시스템은 크게 밀폐형과 개방형으로 나눌 수 있다.

밀폐형은 일반적으로 나선형의 수중 열교환기나 설치면적을 줄인 슬림짐(Slim Jim) 등을 물속에 넣어 순환유체를 통해 냉·난방을 하는 시스템이다. 수중 열교환기나 슬림짐은 물속에서 부력에 의해 뜰 수 있기 때문에 설치에 주의를 기울여야 한다.

개방형은 호수나 강 등의 지표수를 직접 이용하는 방식이다. 개방형은 지하 매설이 없으므로 설치비용이 저렴한 장점이 있는 반면, 수질이 나쁘거나 수원 규모가 작은 경우 열원의 온도 변화가 심하여 이용에 많은 문제점이 발생할 소지가 있다. Fig. 3은 지표수이용(연못형) 밀폐형 열교환기 시스템을 나타낸다.

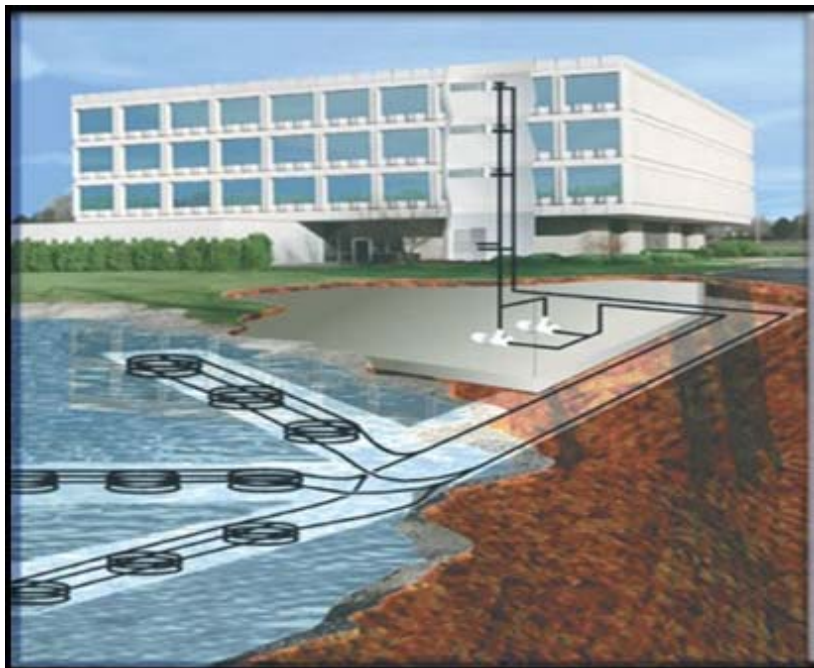


Fig. 3 Schematic diagram of surface water loop ground heat exchanger

2.3.4 복합 지열원 히트펌프 시스템

지중열교환기 설치를 위한 부지와 설치비용의 단점을 보완하기 위하여 복합(Hybrid) 지열 냉·난방 시스템이 도입되었다. 이 시스템은 피크부하 시 냉각탑이나 보조열원을 이용하기 때문에 지중열교환기의 길이 및 개수 등을 줄일 수 있다.

냉각탑 이용 시스템은 일정한 수준의 부하는 지중열교환기를 이용하고, 난방부하가 지중열교환기가 감당하는 부하를 초과하면 냉각탑을 이용하여 초과된 부하를 감당하는 시스템이다.

보조열원 이용 시스템은 난방부하가 지중열교환기가 감당하는 부하를 초과하면 난방 설비에 주로 사용되는 보일러 또는 태양열 집열판 등을 추가로 설치하여 초과된 부하를 감당하는 시스템이다.

2.4 히트펌프 형식별 분류

2.4.1 물 대 물(Water to Water) 방식

물 대 물 히트펌프방식은 지열 순환수 측의 지중 열교환기를 통하여 열을 흡수하거나 방출하여 2차 측 냉난방 기기까지 수배관에 의하여 열을 이송하여 공조기, 환코일 유니트 등의 열원을 공급하는 방식으로 2차측 열매체로 물을 이용하는 방식이다.

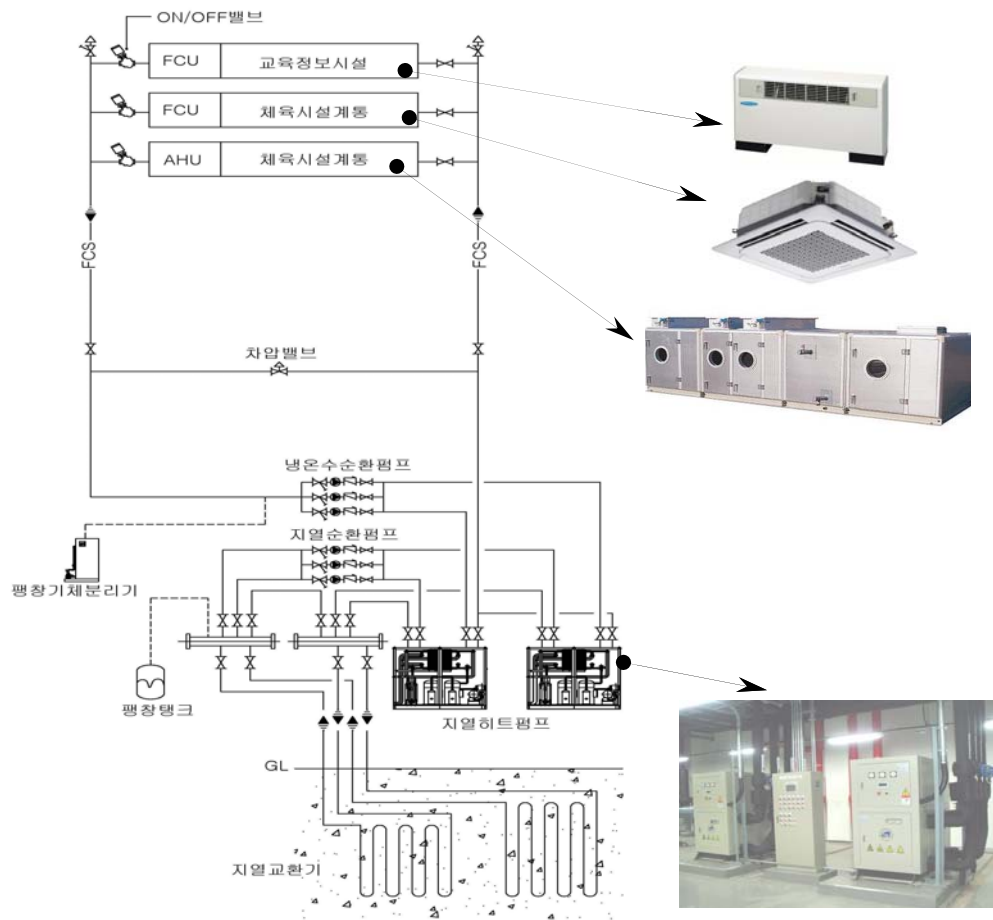


Fig. 4 Schematic diagram of ground source heat pump system(Water to Water)

2.4.2 물 대 냉매(Water to Gas) 방식

물 대 냉매 히트펌프방식은 지열 순환수 측의 지중 열교환기를 통하여 열을 흡수하거나 방출하여 2차 측 냉난방 기기까지 냉매배관에 의하여 열을 이송하여 실내기 등의 열원을 공급하는 방식으로 2차측 열매체로 냉매를 이용하는 방식으로 지중열교환기는 물 대 물방식과 동일하고 물 대 냉매(Water to Gas) 방식 또는 물 대 공기방식이라고 한다.

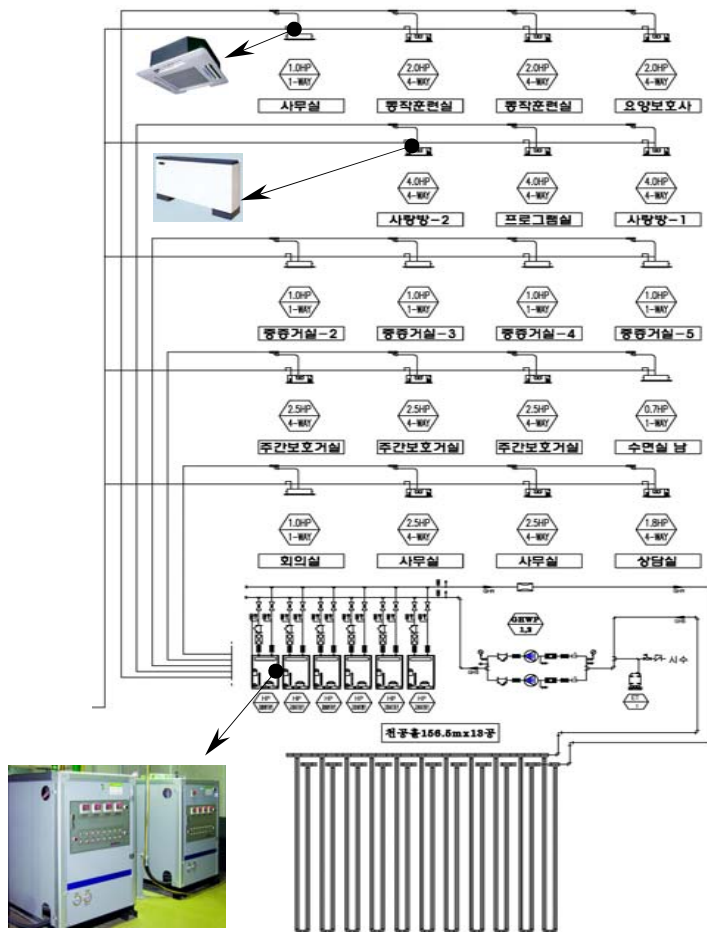


Fig. 5 Schematic diagram of ground source heat pump system(Water to Gas)

2.5 히트펌프의 성능

2.5.1 성능계수

지열원 히트펌프의 성능은 일반적으로 성능계수(Coefficient of performance, COP)로 나타내며 난방성능은 다음의 식 2-1과 같이 계산할 수 있다.⁷⁾

$$COP_{hp} = \frac{Q}{W_c} \quad (2-1)$$

여기서

- COP_{hp} : 지열원 히트펌프의 성능계수
- Q : 실내기의 실내에 방출하는 열량
- W_c : 히트펌프의 압축기에 소요되는 소비전력

전체 시스템의 성능계수는 다음의 식 2-2와 같이 구할 수 있다.

$$COP_{sys} = \frac{Q}{W_c + W_p + W_f} \quad (2-2)$$

여기서

- COP_{sys} : 전체시스템의 성능계수
- Q : 실내기의 실내에 방출하는 열량
- W_c : 히트펌프의 압축기에 소요되는 소비전력
- W_p : 지중열교환기의 순환펌프에서 소요되는 소비전력
- W_f : 실내기의 팬에서 소요되는 소비전력

실내기가 방출하는 열량 Q 은 다음의 식 2-3과 같이 구할 수 있다.

$$Q = m_{air} C_p (T_{o,air} - T_{i,air}) \quad (2-3)$$

$$m_{air} = \rho_{air} V_{air} \quad (2-4)$$

여기서

- Q : 실내기의 실내에 방출하는 열량
- m_{air} : 공기의 질량
- C_p : 공기의 정압비열
- $T_{o,air}$: 실내기의 출구온도
- $T_{i,air}$: 실내기의 입구온도
- ρ_{air} : 공기의 밀도
- V_{air} : 공기의 풍량

2.5.2 지중 열전도도 해석 방법

지중열교환기의 열교환에 필요한 열전도도를 유효 열전도도(Effective thermal conductivity) 라고 한다.

지열을 이용하는 지중열교환기의 설계에 적용이 유효한 지중열전도도는 일반적으로 있는 상태 그대로의 조건(in-situ)하에서의 유효 열전도도이어야 한다.

수직형 지중열교환기의 보어홀은 수직 깊이 L , 반경 r_b 로 이루어진다. 보어홀 유체는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 온도 T_{fi} 로 유입되어 U-tube을 통과하며 지중 토양과 열교환을 한 후 T_{fo} 로 유출되나 T_{fi} 와 T_{fo} 사이의 온도차가 크질 않아 보어홀 유체온도는 그 평균값인 $T_f = (T_{fi} + T_{fo})/2$ 로 나타낸다. 또한 이렇게 표현된 보어홀 유체온도는 보어홀의 전 길이에 걸쳐 일정한 것으로 가정한다. 지중 열성능을 지배하는 2가지 주요인자는 지중열전도도 k 와 보어홀 전열저항 R_b 이다.

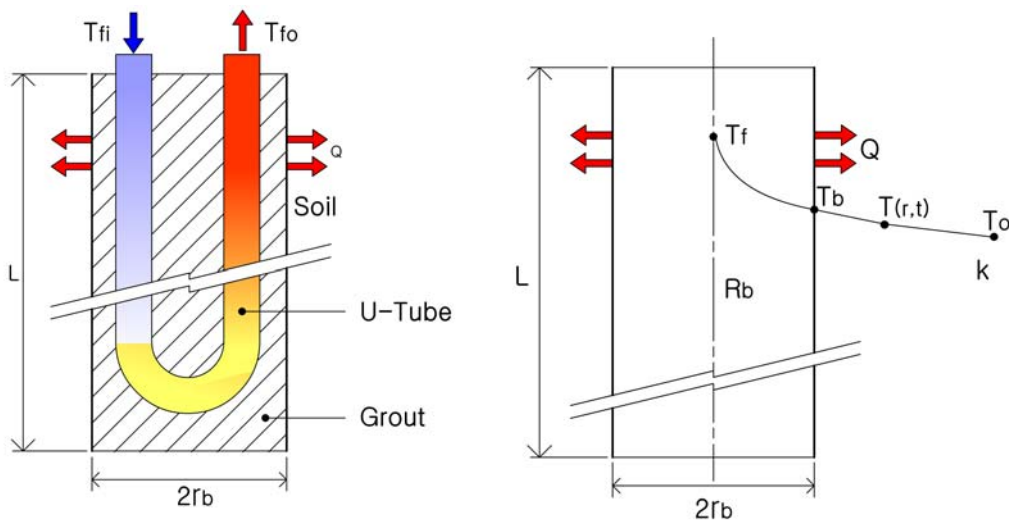


Fig. 6 Schematic of ground heat exchanger & borehole section

여기서 보어를 전열저항 R_b 는 다음 식과 같이 정의된다.

$$R_b = \frac{T_f - T_b}{Q/L} \quad (2-5)$$

열응답 시험은 이와 같이 k 및 R_b 값을 정확히 추정해 내는 것을 목표로 수행하는 작업이다.

지중열교환기의 열전도도는 지중열교환기로 열이 주입되거나 추출될 때 지중열교환기의 온도변화로부터 구해진다.

지중 열전도도를 산정하는 방법에는 원통열원모델(Cylinder source model)과 선형열원모델(line-source model)이 있다.³⁰⁾ 이 중에서 선형열원모델이 원통열원모델보다 상대적으로 적용하기 쉽기 때문에 장치에서 측정한 데이터를 이용하여 지중 열전도도를 산정할 때 주로 적용된다. 선형열원모델은 지중에 매설된 파이프와 토양사이의 열전달에 관한 이론 해는 Kelvin의 무한 선형열원 이론(Infinite line-source theory)에 기초를 두고 있다. 즉, 무한히 길고 열유속이 일정한 선형열원(line source)이 초기온도 T_o 로 균일한 무한 매질(지중 토양)속에 매설되어 있는 경우 토양온도에 관하여 정립된다. 본 해석 대상과 같이 직선 열원 주위의 열전달 매체가 그라우트와 토양(또는 암석) 등으로 구성된 복합매질인 경우, 이 열원 주위의 열저항을 모두 고려해야 한다. 따라서 직선열원으로부터 이 복합매질의 반경 방향으로 열이 전달될 때 과도 열전도 방정식의 해는 다음과 같다.³⁰⁾

$$T_o - T(r,t) = \frac{Q/L}{4\pi\kappa} \int_{r^2/4at}^{\infty} \frac{e^{-u} du}{u} \quad (2-6)$$

여기서

- T_o : 초기 지중온도
- $T(r,t)$: 열원으로 부터의 거리 r , 시간 t 에서의 온도
- Q : 토양으로 부터의 채열율(Heat extraction rate)

- L : 보어홀의 길이
 Q/L : 단위길이당 채열율 즉, 비채열율(Specific heat extraction rate)
 κ : 토양의 열전도율
 a : 열확산율($\kappa/\rho c$)

식 2-6의 Q 는 채열의 경우 양의 값이 되나 보어홀로부터 열을 방출하는 경우라면 음의 값을 갖는다. 또 이 식에서 a 는 $\kappa/\rho c$ 로 정의되는 토양의 열확산율(ρ 는 토양의 밀도, c 는 토양의 비열, 따라서 ρc 는 토양의 체적비열)이다. 여기서 열원은 무한히 긴 것으로 가정하였으므로 모든 열의 흐름은 열원에 직각 즉, 반경방향으로 이루어진다.

$r_b = 0.075$ m 수준이므로 열원이 충분히 길고 열유속은 반경방향으로 이루어진다는 가정 역시 큰 오차 없이 적용될 수 있다.

식 2-6은 다음과 같이 근사화 될 수 있다.

$$T_o - T(r,t) = \frac{Q/L}{4\pi\kappa} \left(\ln \frac{4at}{r^2} - \gamma \right) \quad (2-7)$$

식 2-7은 식 2-6의 근사식으로 $at/r^2 > 5$ 에서 최대 2%의 오차가 있는 것으로 알려지고 있다. 또 이 식에서 γ 는 Euler 상수로 0.5772의 값을 갖는다. 식 2-7로부터 $r = r_b$ 인 보어홀 벽면의 온도 T_b 를 구하면

$$T_b = T_o - \frac{Q/L}{4\pi\kappa} \left(\ln \frac{4at}{r_b^2} - 0.5772 \right) \quad (2-8)$$

Fig. 6에서 보는 보어홀 유체의 유출·입 온도 T_{fo} 와 T_{fi} 는 실제로 그 차이가 크질 않으며 주위 토양과의 열전달 해석은 흔히 이 두 온도의 평균온도인 T_f 를 통하여 하게 된다. 즉,

$$T_f = \frac{T_{fi} + T_{fo}}{2} \quad (2-9)$$

이 평균온도 T_f 와 벽면온도 T_b 사이에는 전열저항 R_b 를 위에서 다음과 같이 정의 한 바 있다.

$$R_b = \frac{T_b + T_f}{Q/L} \quad (2-10)$$

식 2-10과 식 2-8로부터 지중 순환열유체의 온도 T_f 는

$$T_f = T_o - \frac{Q}{L} R_b - \frac{Q/L}{4\pi\kappa} \left(\ln \frac{4at}{r_b^2} - 0.5772 \right) \quad (2-11)$$

로 나타낸다.

여기서

- T_f : 지중 순환열유체의 온도(유출·입 평균온도)
- T_o : 초기 지중온도
- Q : 토양으로 부터의 채열율(Heat extraction rate)
- L : 보어홀 깊이
- R_b : 보어홀 전열저항
- κ : 지중열전도도
- a : 열확산율
- t : 가동시간
- r_b : 보어홀 반경

열성능 시험과 같은 지중 방열의 경우에는 열전달의 방향이 반대가 되므로 보어홀 유체온도 T_f 는 다음식과 같이 나타난다.

$$T_f = \frac{Q/L}{4\pi\kappa}(\ln t) + \frac{Q/L}{4\pi\kappa} \left(\ln \frac{4a}{r_b^2} - \gamma \right) + \frac{Q}{L} R_b + T_o \quad (2-12)$$

1) κ 값 계산

식 2-12는 T_f 와 $\ln t$ 에 관하여 1차식이며 따라서 T_f 를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_f = sx + b \quad (2-13)$$

여기서

$$s = \frac{Q/L}{4\pi k} \quad (2-14)$$

$$x = \ln t \quad (2-15)$$

또한 $\gamma=0.5772$ 이므로

$$b = s \left(\ln \frac{4a}{r_b^2} - 0.5772 \right) + \frac{Q}{L} R_b + T_o \quad (2-16)$$

식 2-16에서 기울기(Slope) s 를 알면 식 2-14로부터 k 를 구할 수 있다. 즉,

$$k = \frac{Q/L}{4\pi s} \quad (2-17)$$

가 된다.³⁰⁾

따라서 열응답시험을 통하여 시간에 따른 보어홀 유체온도를 측정하고 이 결과를 $T_f - \ln t$ 의 좌표위에 나타내어 직선식을 얻고 그 직선의 기울기로부터 k 를 구하기 때문에 이 방법을 Slope법이라고도 한다.³⁰⁾

2) R_b 값 계산

지중 토양의 k 값이 결정되면 다음에는 열확산율 $a(=\kappa/\rho c)$ 를 구하여야 하며 여기서 ρc 값은 보어홀 굴착자료를 이용하여 결정한다. 열확산율을 구한 후 식 2-16 또는 식 2-12를 이용하여 보어홀의 전열저항 R_b 값을 구할 수 있다.

식 2-12를 이용하면,

$$R_b = \frac{L}{Q} \left\{ T_f - \frac{Q/L}{4\pi\kappa} \left(\ln \frac{4at}{r_b^2} - 0.5772 \right) - T_o \right\} \quad (2-18)$$

여기서 T_f 는 시간에 따라 변하는 값이므로 R_b 또한 시간에 따라 약간의 변화를 보일 수 있다. 따라서 주어진 시간내에서 구한 평균값으로 R_b 값을 결정하게 된다.

제 3 장 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

3.1.1 열응답 시험 장치

본 연구의 실험대상은 광주광역시 남구에 소재하는 연면적 1,500 m², 지하1층, 지상 4층의 복지관 용도의 건물로서 지열원 히트펌프 냉·난방 시스템이다.

실험은 지중의 열물성치와 지중 온도변화 특성을 분석하기 위하여 실제 시공되는 지중열교환기와 동일한 사양으로 시험용 지중열교환기를 시공한 후, Photo. 1과 같은 지중 열전도도 측정유닛을 연결하였다.



Photo. 1 In-situ ground effective thermal conductivity test unit

지중 열전도도 측정 유닛은 열원장치, 순환장치 및 계측장치와 데이터로거로 구성되어 있다. Fig. 7은 지중 유효 열전도도 측정 시스템의 개략도를 도시하였다.

열원장치는 지중 열교환기에 일정한 열량을 주입하도록 전기히트와 수조로 구성되어 있고, 순환장치는 열매체가 지중열교환기와 열원장치를 순환하면서 열을 전달 할 수 있도록 순환펌프를 설치하였다.

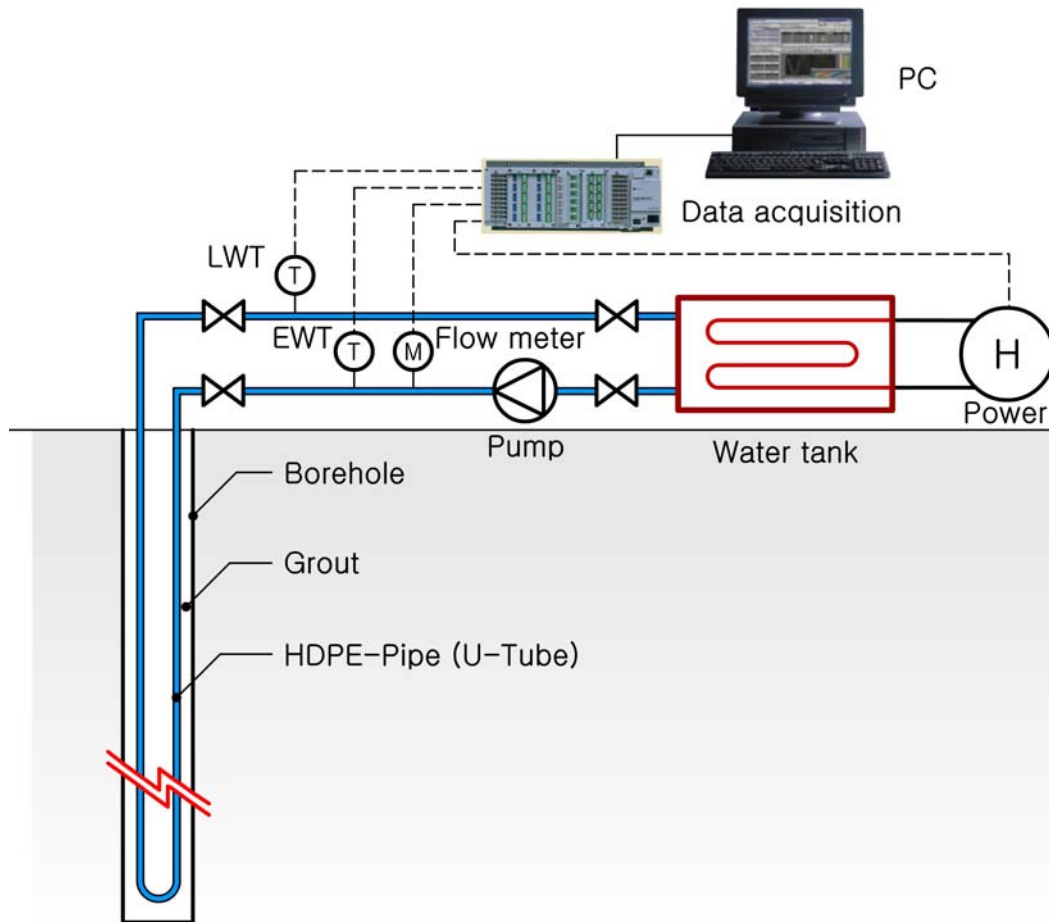


Fig. 7 Schematic of an in-situ thermal response test apparatus

계측장치는 열매체의 유량 측정을 위해 유량계, 히터에 공급되는 전력을 측정하기 위해 전력량계(Power meter)와 열매체의 순환온도 측정을 위해 지중열교환기 입·출구에 온도센서를 설치하였으며, 또한 측정된 데이터는 데이터 획득시스템에 저장한 후 실험결과 분석에 사용하였다.

보어홀은 직경이 150 mm, 깊이 162.5 m로 시공하였으며, 지중열교환기는 고밀도 폴리에틸렌 재질을 사용하였고, Grout 재료는 벤토나이트를 사용하였다.

열응답 시험의 원리는 열교환기 파이프 내부로 히터에 의해 가열된 유체를 유입시켜 지중 열교환을 통해 환수되는 유체의 온도차와 유량, 에너지 투입량을 측정하여 산정하였다.

Table 3은 지중 열전도도 측정 유닛의 제원을 나타낸다. 수조는 보충수의 보급이 용이하도록 25 ℓ의 체적으로 제작하였다.

Table 3 Specification of the in-situ thermal response tester

Items	Contents
Heater	3(kW) × 4EA
Water tank	25(Liter) × STS
Flow meter	0 ~ 200(L/min)
Recorder	Logo screen 500F
connection hose	30A × 2EA
Pump	12m × 80(L/min)
Temp. sensor	RTD × 3EA
Indicator	Power meter × 1EA

단계별 투입 열량 조절이 가능하도록 4개의 3 kW 히터를 장착하였으며, 관로 손실과 각종 밸브의 부차적인 손실을 고려하여 최고 양정 12 m, 최고 유량 80 L/min의 성능을 가진 펌프를 장착하였다.

히터에 공급되는 전력을 측정하기 위해 전력량계(Power meter)를 장착하였으며, 지중열교환기 입·출구 온도를 측정하기 위해 축온저항체를(Resistance temperature detector, RTD) 배관 상에 설치하였다. 시험에서 온도, 유량, 전력량 등의 데이터를 10분 간격으로 측정하여 데이터 획득 시스템에 저장한 후 실험결과 분석에 사용하였다.

3.1.2 지열 히트펌프 실험 장치

실험대상 건물의 냉·난방 부하는 부하계산 프로그램을 사용하여 지역의 기후조건, 실내조건, 구조체별 열관류율, 실별 자료 등을 순차적으로 입력하여 계산하였고 실내·외 온·습도 조건을 고려하여 부하계산을 수행하였다.

부하계산 결과 건물의 각층별 냉·난방 부하는 Table 4와 같으며 냉·난방 전체 부하는 냉방부하 180,627 kcal/hr, 난방부하 103,237 kcal/hr로 나타났다.

Table 4 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

건물의 부하계산에 따라 장비 선정은 물 대 냉매 방식의 멀티 히트펌프에 지열원을 적용하여 건물에서의 실사용 실험을 통한 지열원 히트펌프의 지중열교환기의 지중 열 확산 특성을 분석하기 위하여 냉방 42.1 kW, 난방 44.3 kW의 지열원 히트펌프 유니트 6대를 Photo. 2와 같이 기계실에 설치하여 가동하였다.



Photo. 2. Ground source heat pump outdoor unit

실험대상지역의 지질분포는 화강암질이며 열응답 시험결과 열전도도 값은 $2.65 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 이었다. Table 5와 같은 설계조건(Input parameter)을 지중열교환기 설계 프로그램인 GLD(Ground Loop Design)에 적용하여 보어홀 1홀당 10.16 kW 로 설계하였고 이에 대한 보어홀의 천공개요는 Table 6과 같다.

Table 5 Design Input parameter

Flow rate	16.7 (L/min)/3,5 kW
Specific heat(Cp)	4.156 kJ/(K·kg)
Density	999.6 kg/m ³
Ground temperature	16.7°C
Thermal conductivity	2.65 W/m·K
Thermal diffusivity	0.103 m ² /day

Table 6 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. 8은 대상건물의 옥외 지중열교환기의 배치도로서 건물을 중심으로 전·후면에 지중열교환기의 보어홀을 설치하였으며 22번 홀의 U-tube 표면에 온도를 측정하기 위하여 지름 0.32 mm의 K-type Thermocouple을 설치하여 각각의 부위의 온도변화를 측정하였으며 Photo. 3의 YOKOGAWHA사가 제작한 Data acquisition unit(DA100⁺)를 이용하여 수집하고 Photo. 4의 Computer에 저장하여 분석할 수 있게 장치하였다. K-type 열전대의 정확도는 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 이다.

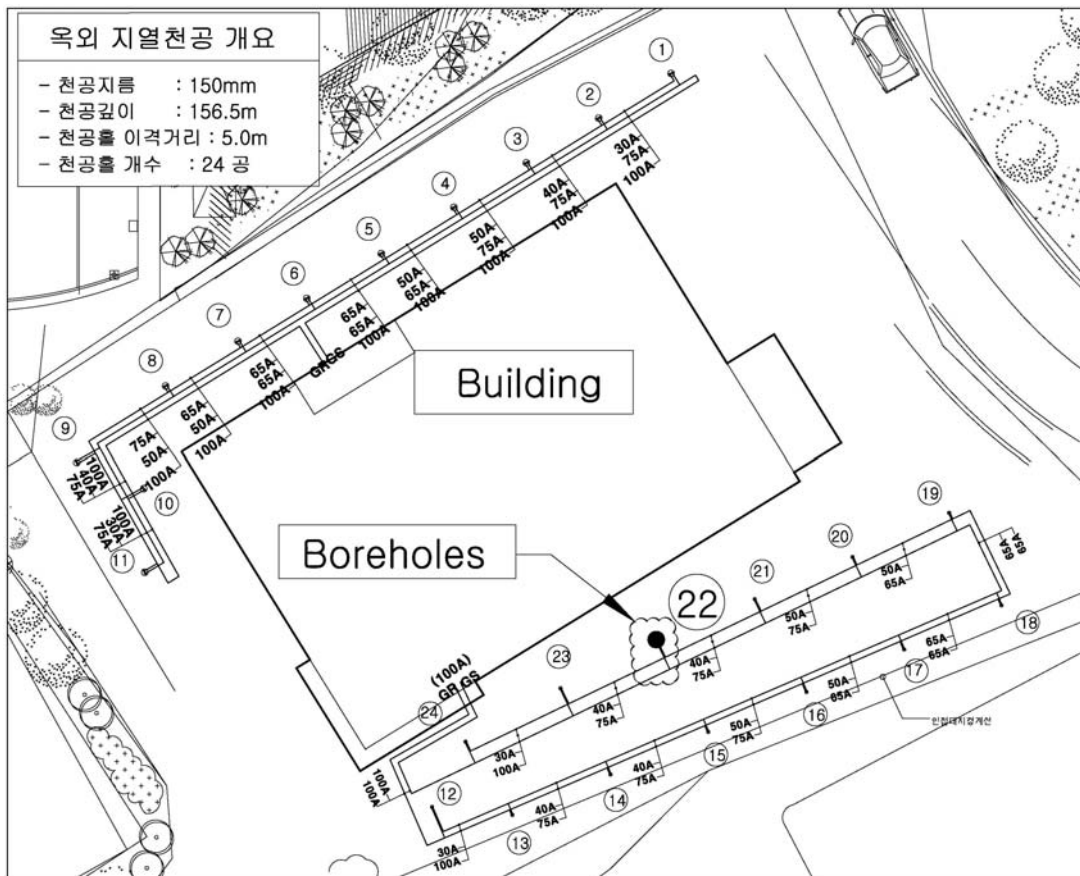


Fig. 8 Location of building and ground loop heat exchanger boreholes



(a) DA100+, YOKOGAWHA



(b) RS-232C Communication line

Photo. 3. Data acquisition unit(DA100+, YOKOGAWHA)



Photo. 4. Data acquisition unit (Computer)

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

또한 Fig. 9는 지열시스템의 계통도를 나타내는데 1층에서 4층까지의 실내기 위치와 지하 기계실의 히트펌프 그리고 지중열교환기를 나타낸다.

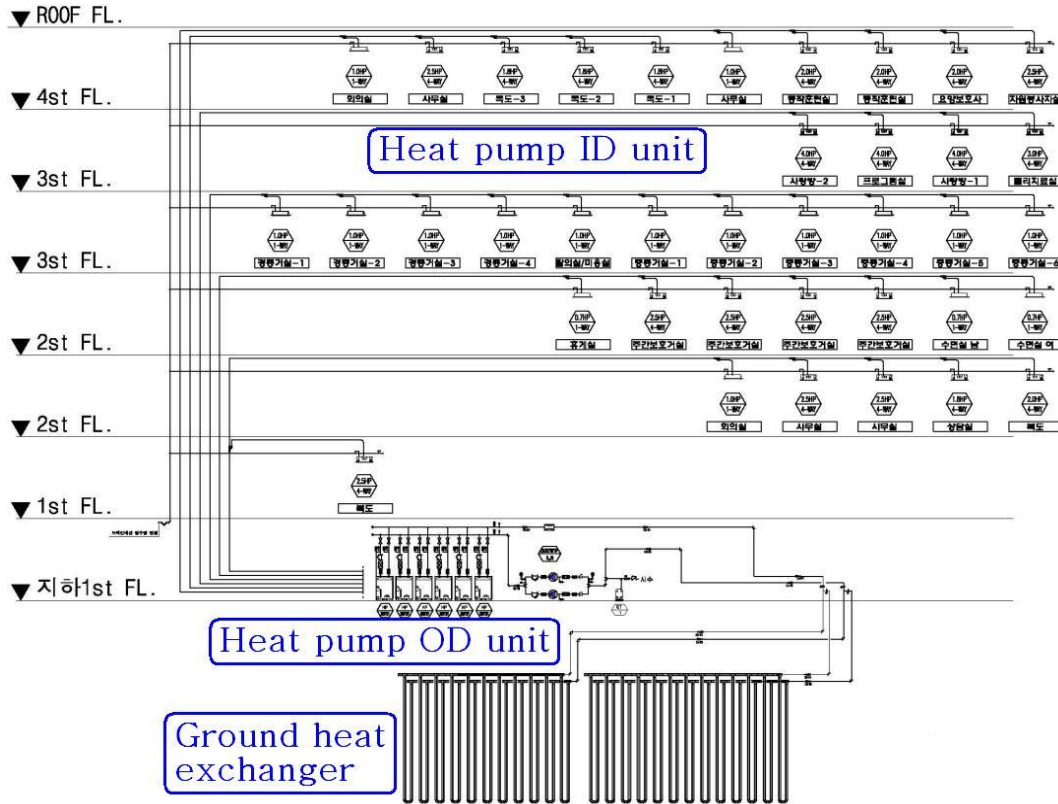


Fig. 9 Schematic diagram of ground source heat pump system

Fig. 10은 히트펌프와 22번홀 지중열교환기의 순환수 위치별, 지표면아래 각 위치별, 지중열교환기에서 이격거리별 열전대의 위치를 나타낸다.

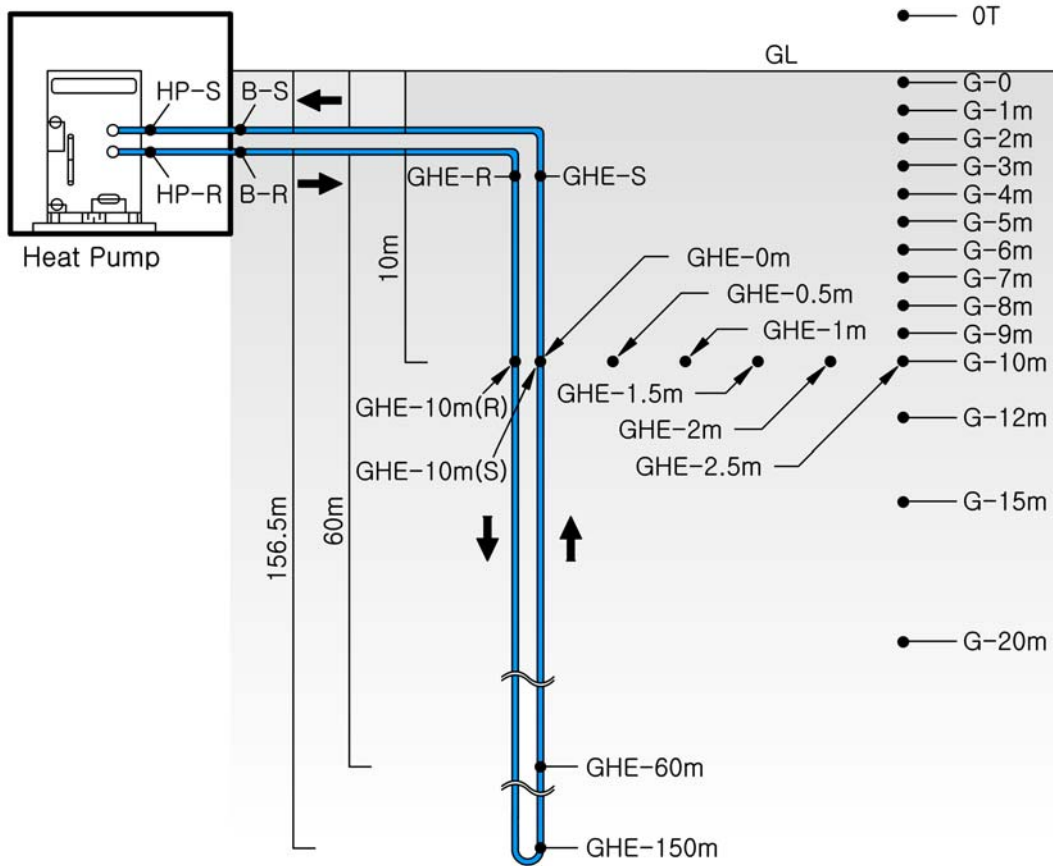


Fig. 10 System diagram of ground source heat pump and the location of thermocouples for measuring the ground temperature

3.1.3 지중열교환기의 구조

지중열교환기의 구조는 Fig. 11과 같이 지중에 지름 150 mm의 크기로 천공된 보어홀 내부에 고밀도폴리에틸렌 파이프(HDPE)가 U-tube의 형식으로 연결되어 있고 보어홀 내부 공간을 그라우팅재로 채워져 천공된 보어홀 내부로 오염된 이물질이 유입되지 않도록 차단재 역할을 한다. 그라우팅의 열전도율에 의해 열교환기의 성능을 좌우한다.

그라우팅의 재료는 물, 벤토나이트, 유동화재 등으로 구성되어 있다.

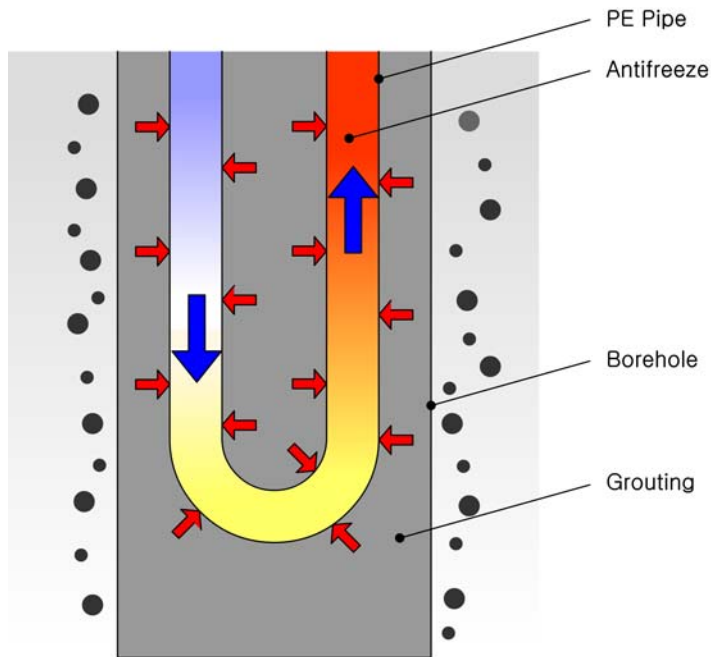


Fig. 11 Schematic diagram of ground heat exchanger section

Fig. 12는 지중열교환기의 천공 배치간격과 지중열교환기의 상세도를 나타내고 있다.

지중열교환기 천공간격은 5 m 간격으로 배치하며 지중열교환기 천공시 토사층(표토층)에서 시추공의 붕괴를 방지하기 위하여 케이싱(Casing)을 삽입하여 천공하고, 암반층은 케이싱 없이 굴착하여 지중열교환기를 설치하고 그라우팅 작업 후 케이싱을 인발하여 제거한다.

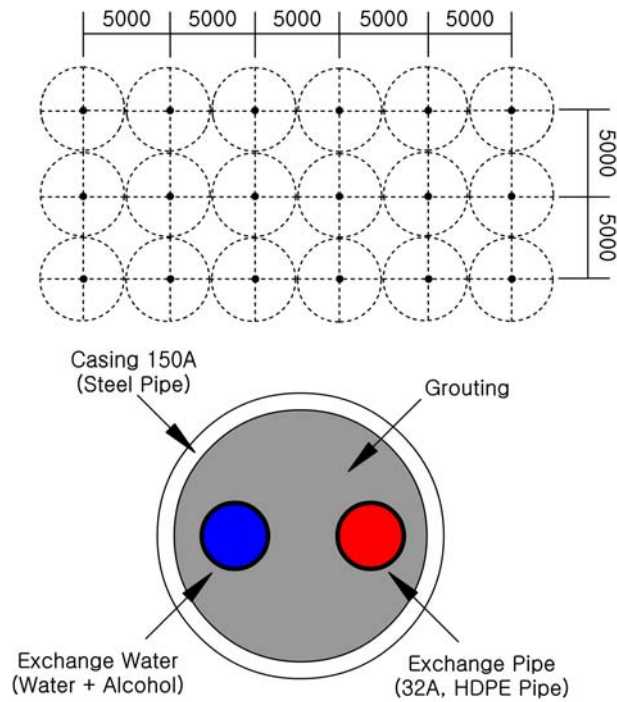


Fig. 12 Schematic diagram of ground heat exchanger

3.2 실험방법

3.2.1 열응답 시험 방법

시험용 지중열교환기는 지중을 수직으로 굴착을 한 후 폴리에틸렌(PE) 또는 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 재질의 파이프(U-tube)를 열융착법(Thermal fusion method)으로 U자관 형상으로 성형한 후 시험용 보어홀에 삽입하고, 그라우팅 재료를 보어홀 내에 주입하여 주위 토양과의 열적 접촉을 양호하게 할 뿐 아니라 일체의 지하수오염 등 공해가 발생하지 않도록 하는 지중시설로 완성하였다.

지중 열전도도 측정 유닛의 입·출구 배관과 지중열교환기 파이프의 입·출구 배관을 연결하고, 파이프 내에 순환유체를 주입한다. 펌프를 가동하여 파이프 내의 유체를 순환시켜 이물질과 공기를 완전히 제거한다. 일정 시간 동안 지속적으로 유체를 순환시켜 지중 온도가 정상 상태(Steady-state)에 도달하면, 열을 공급하면서 10분 간격으로 온도와 유량, 입력 열량 등을 측정한다.

시험은 48시간 동안 계속 실시하였으며 시험 초기에는 먼저 50분 동안 가열장치를 가동하지 않고 물만 순환시켜 지중 토양의 초기온도를 측정한 후에 가열장치를 작동시켰다.

자동전압조정기(Automatic voltage regulator, AVR)를 설치하여 가열기에 가해지는 전압이 일정하도록 제어하여 지중으로 전달되는 열량이 가능하면 변화가 적어 일정하도록 제어 하였다.

3.2.2 지중깊이에 따른 온도측정

연중 계절의 변화와 외기 온도의 변화에 따른 지중 깊이별 각 지점의 온도변화를 고찰하기 위해 실제 광주광역시 소재의 복지관 건물에 설치한 지중열교환기에서 2.5 m 떨어진 위치에 지중의 수직 깊이별로 외기(지상 1.5 m 지점), 지표면, 지하 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, 6 m, 7 m, 8 m, 9 m, 10 m, 12 m, 15 m, 20 m의 위치 15개소에 K-type 열전대(K-type thermocouple)를 설치하여 계절별 외기 온도변화와 지중 깊이별 각 지점의 온도를 소수점 2자리까지 실시간으로 모니터링 하고 Data를 확인하여, Data acquisition unit (DA-100⁺)를 통하여 온도변화를 1분 간격으로 측정하여 Computer에 저장하고 분석하였다.

3.2.3 지중열교환기 이격거리별 온도측정

지열히트펌프가 작동할 때 지중열교환기의 온도변화에 따라 보어홀 반경방향으로 각 거리별 지중 온도변화와 열확산에 대한 특성을 분석하기 위하여 지중 10 m 지점의 지중열교환기에서 보어홀 반경방향에 0.5 m 간격으로 지중열교환기 표면과 0.5 m, 1 m, 1.5 m, 2 m, 2.5 m지점의 6개소에 K-type 열전대를 설치하여 이격거리에 따른 온도변화를 모니터링 하고 계절별 지중열교환기 주위의 이격거리별 열확산에 의한 온도변화를 1분 간격으로 측정하여 Data acquisition unit (DA-100⁺)를 통하여 Computer에 저장한 후 분석하였다.

3.2.4 순환수의 위치별 온도측정

지열원 히트펌프시스템의 가동에 따른 지중열교환기 내부를 순환하는 열매체 순환수의 위치별 온도를 측정하여 열매체 순환수와 지중과의 열교환작용을 순환수 위치별로 분석하기 위하여 히트펌프 입·출구, 건물 입·출구, 트렌치 입·출구(지중 1.5 m지점), 지중 10 m, 60 m, 150 m지점 위치의 지중열교환기에 K-type 열전대를 설치하여 히트

펌프 가동에 따른 온도변화와 각 순환수의 위치별 온도를 Data acquisition unit (DA-100⁺)를 사용하여 측정하고 수집하여 Computer에 저장 후 분석할 수 있게 장치하였다.

제 4 장 실험결과 및 고찰

4.1 설계변수에 대한 고찰

4.1.1 보어홀의 깊이와 지형에 따른 지질분석

지질 및 지형도를 참고로 지중 상태를 조사하여 기반암의 분포 및 특성을 파악하였고 단층별로 지질 상태를 파악하였다.

Fig. 13은 대상건물의 지질도를 나타내었다. 지형의 지리좌표는 동경 : $126^{\circ} 55'$ 에서 $126^{\circ} 56'$ 까지이며, 북위 : $35^{\circ} 07' \sim 35^{\circ} 08'$ 사이이다. 본 지역 무등산 근처에서 산세가 갑자기 높고 험준해지기도 하며 또 이로부터 남서방면으로 갈수록 산세는 완만해진다. 이지역의 지질은 중성 내지 산성의 화산암으로 이뤄졌으며, 이들이 본 지역에서 산출되는 암석 중에서 풍화에 대한 저항도가 가장 강하다. 광주천은 시가지 중심을 거쳐 소백산맥의 북쪽 구성체인 안산암질 암류를 가로지르며, 이는 산맥방향으로 한산암질 암질 속에 깊은 속을 형성한 여러 짧은 세천들과 연결되고 있다.

본 지역에 분포하는 지질은 선캠브리아기 화강암질편마암, 시대미상의 변성충적암류, 쥬라기의 화강암질, 그리고 백악기의 석영암질, 화산암류 및 심성관입암류 등으로 구분된다. 이는 운모편암, 각섬석편암, 석영편암 및 규암 등으로 구성되는 변성퇴적암질이다.

본 보어홀이 위치한 곳에서 가장 넓게 분포하는 쥬라기의 흑운모화강암은 광주광역시 지역의 지반이다. 선캠브리아기의 화강암질편마암을 관입하고 있다. 또한 흑운모화강암은 백악기 화산암질들에 의해 관입당하거나 부정합으로 덮혀 있음이 본 지역에서 관찰되고 있다. 일반적으로 이 화강암은 세립질 내지 중립질의 입상조립을 보이며 장석의 색깔은 회백색이 우세하고 유색물질로는 흑운모를 함유하나 가끔 각섬석, 스피, 저어콘, 인회석들이 불투명물질들이 존재한다. 본 지역은 농경지와 택지로 개발되어 도심 을 이루고 있다. 본 보어홀은 화강암질이 분포하고 있는 지역에 해당된다.

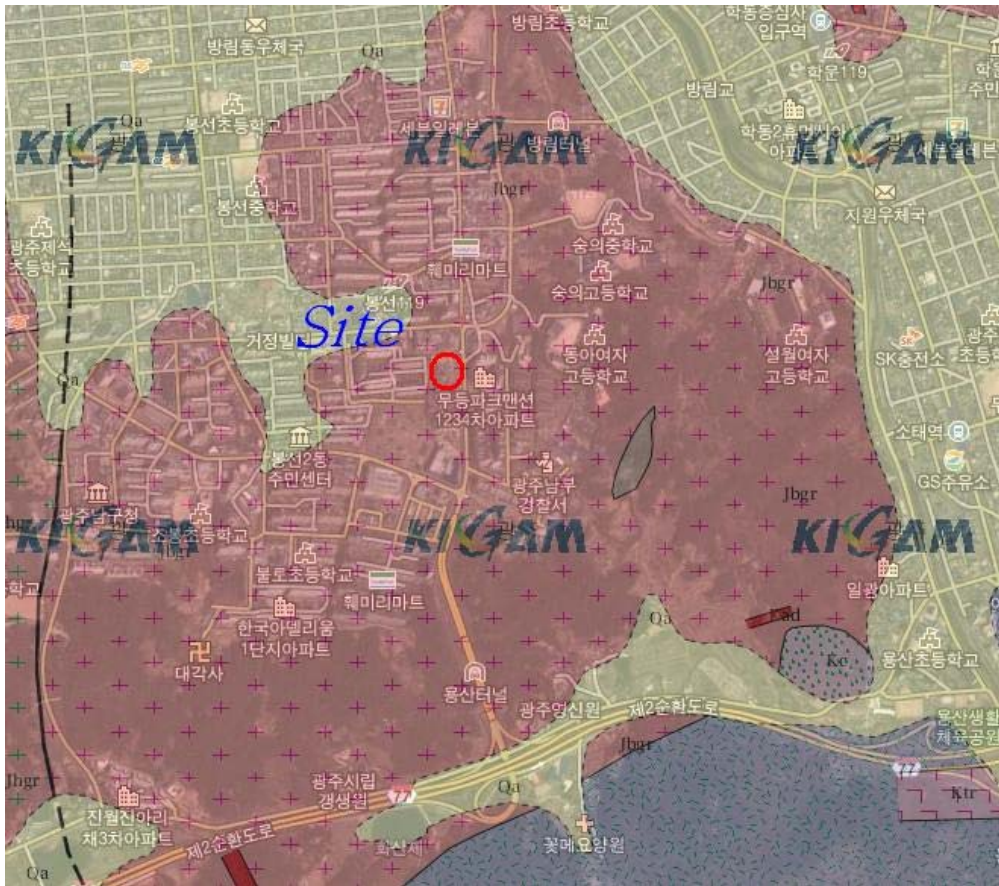


Fig. 13 Field geological map

지열히트펌프 시스템은 토양의 물성치에 따라 열교환량의 변화가 생기고 열교환기의 길이결정에 영향을 준다. 일반적으로 수직형의 경우 깊이에 따른 지질의 종류의 변화에 대한 예측이 필요하다. 또한 함습량에 따라 열교환량에 변화가 생긴다. 따라서 지질의 종류에 따른 정확한 해석을 위해서는 시추 시에 깊이에 따른 암질의 종류를 분석하여야 한다.

따라서 보어홀 깊이에 따른 지질의 상태와 특성을 시험천공 시 시료를 확보하여 깊이에 따른 암질의 분포 및 지질의 특성을 파악하였다.

Table 7은 실험대상 보어홀의 깊이에 따른 지질의 시료를 확보하여 사진으로 나타내었다. 여기에서 보는 바와 같이 0 ~ 20 m까지 토사층을 이루고 있으며 함수상태는 습윤 상태로 나타났다. 20 ~ 40 m까지 풍화암층으로 이루어져 있으며, 40 ~ 60 m까지 연암층으로 이루어져 있다. 또한 60 ~ 160 m 깊이까지는 화강암층으로 이루어져 있는 것으로 나타났다.

Table 7 Geological features of borehole depth(1st)

	
Depth : 0 ~ 10 m	Depth : 10 ~ 20 m
Geological features : Soil	Geological features : Soil
	
Depth : 20 ~ 30 m	Depth : 30 ~ 40 m
Geological features : Weathered rock	Geological features : Weathered rock
	
Depth : 40 ~ 50m	Depth : 50 ~ 60m
Geological features : Soft rock	Geological features : Soft rock
	
Depth : 60 ~ 70 m	Depth : 70 ~ 80 m
Geological features : Granite	Geological features : Granite

Table 7 Geological features of borehole depth(2nd)






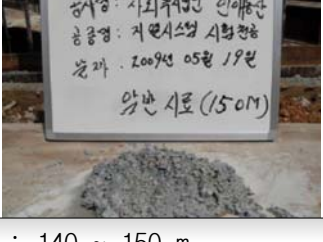
	
<p>Depth : 80 ~ 90 m</p>	<p>Depth : 90 ~ 100 m</p>
<p>Geological features : Granite</p>	<p>Geological features : Granite</p>
	
<p>Depth : 100 ~ 110 m</p>	<p>Depth : 110 ~ 120 m</p>
<p>Geological features : Granite</p>	<p>Geological features : Granite</p>
	
<p>Depth : 120 ~ 130 m</p>	<p>Depth : 130 ~ 140 m</p>
<p>Geological features : Granite</p>	<p>Geological features : Granite</p>
	
<p>Depth : 140 ~ 150 m</p>	<p>Depth : 150 ~ 160 m</p>
<p>Geological features : Granite</p>	<p>Geological features : Granite</p>

Table 8은 토양의 종류 및 함습량에 따른 물성치로 함습량에 따라 열전도율이 크게 차이가 나고 있음을 알 수 있다.

Table 8 Thermal properties of soil

Soil	Thermal conductivity (W/m·K)	Thermal diffusivity (mm/s)
Sand-dry(2%)	0.60	0.42
Sand-damp(7%)	1.50	0.72
Sand-saturated(12%)	2.20	0.72
Sand soil-dry(2%)	1.30	0.48
Sand soil-damp(5%)	2.50	0.84
Sand soil-saturated(8%)	2.80	1.10
Silty loam-dry(2%)	0.60	0.38
Silty loam-damp(10%)	1.30	0.56
Silty loam-saturated(20%)	2.30	0.68
Silty clay/clay-dry(2%)	0.40	0.33
Silty clay/clay-damp(10%)	0.80	0.48
Silty clay/clay-saturated(20%)	1.10	0.57
Basalt-lower quartile	1.20	0.60
Basalt-mean	1.60	0.71
Granite-lower quartile	2.80	0.81
Granite-mean	3.40	0.98
Limestone-lower quartile	3.20	0.83
Limestone-mean	3.40	1.28
Shale-lower quartile	1.60	0.49
Shale-mean	2.40	0.74

4.1.2 그라우트(Grout)

지열 히트펌프 시스템에서 수직형 지중열교환기는 수직으로 천공된 보어홀과 U-tube 파이프 그리고 보어홀과 파이프 사이의 빈 공간을 채우는 그라우트 재료 등으로 구성된다. 그라우팅 재료는 지중 열교환기와 보어홀 주변 암반층 간의 열전달을 촉진하는 촉진제로서 보어홀 주변의 지하수나 지표면 오염물질로 인한 지중열교환기의 손상을 보호하는 역할을 한다. Table 9는 그라우트의 열물성치에 대해 나타내었다.³¹⁾ 그라우트 재료로 주로 사용되는 것은 벤토나이트이며, 혼합되는 양을 제외한 나머지는 물을 첨가하여 고체화 시킨다.

순수 벤토나이트 그라우팅 재료(벤토나이트+물)와 순수 시멘트 재료(시멘트+물)는 보어홀 주변의 토양이나 암석과 비교했을 때 상대적으로 낮은 열전도도를 갖는다. 시멘트 계열 재료와 벤토나이트 계열 재료는 각각 $0.80 \sim 0.87 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 과 $0.75 \sim 0.80 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 의 열전도도 값을 갖는다. 또한 벤토나이트 계열 재료를 이용할 경우 투수도, 접착력, 재료가 함유하고 있던 수분의 유출로 인한 열전도도 감소 등에 주의를 기울여야 한다. 순수 재료의 열전도도를 향상시키기 위해 규사(Silica sand)와 같은 고체재료를 첨가하여 사용한다.³¹⁾

Table 9 Thermal properties of the grout

Item	Property : k[W/m·k]
Non include added material	
20% bentonite	0.73
30% bentonite	0.74
cement mortar	0.69 – 0.78
Include added material	
20% bentonite + 40% quartz sand	1.50
30% bentonite + 30% quartz sand	1.20 – 1.30
60% quartz sand + liquidity material	1.85

4.1.3 지중 열전도도 분석

지열원 히트펌프 시스템 성능에 영향을 미치는 가장 중요한 요인은 지중열교환기의 열교환 능력이라 할 수 있다. 지중열교환기가 지중으로부터 열을 흡수하거나 방출하는 과정은 지중열교환기 내를 순환하는 열매체온도와 지중의 온도차에 기인한다.

그러나 지중 구조는 흙이나 암반 이외에 물, 기체와 같은 여러 가지 물질들에 의하여 복합적으로 이루어져 있고 각각의 구성 비율도 위치에 따라 다르며 열전도도 또한 방향에 따라 다른 비등방성의 성향을 보이고 있다. 이러한 조건하에서 지중열교환기의 유효 열전도도(Effective thermal conductivity) 정확하게 분석해야 한다.

지열을 이용하는 지중열교환기의 설계에 적용이 유효한 지중열전도도는 일반적으로 있는 상태 그대로의 조건(in-situ)하에서의 유효 열전도도이어야 한다.

열전도도를 측정하기 위하여 보어홀 직경 150 mm, 깊이 162.5 m, HDPE 파이프(U-tube) 30 mm의 지중열교환기에 9.7 kW 용량의 전기히트를 사용하여 가열하면서 순환수 유량 36.53 L/min을 유지하며 순환시켜 순환수의 입·출구 온도를 측정하였다.

시험은 48시간 계속 실시하여 10분 간격으로 측정하였으며 시험초기에는 먼저 가열장치를 작동하지 않고 물만 순환시켜 지중의 초기온도를 측정한 후에 가열장치를 작동시켰다.

Fig. 14는 지중의 초기온도를 측정하기 위하여 50분 동안 가열장치를 작동시키지 않는 상태에서 순환펌프를 가동하여 물을 순환시켜서 초기 지중열교환기 입구 및 출구 온도를 측정한 그래프를 나타낸다.

지중열교환기의 순환수의 유량이 36.5 L/min으로 일정하게 순환할 때 순환수의 입·출구 온도는 16.6°C 전후에서 온도차가 없고 온도변화도 없는 상태로 가동되고 있는 것으로 나타난다. 그러므로 가동초기 지중 162.5 m 전체길이의 평균 지중온도는 16.6°C를 나타내었다.

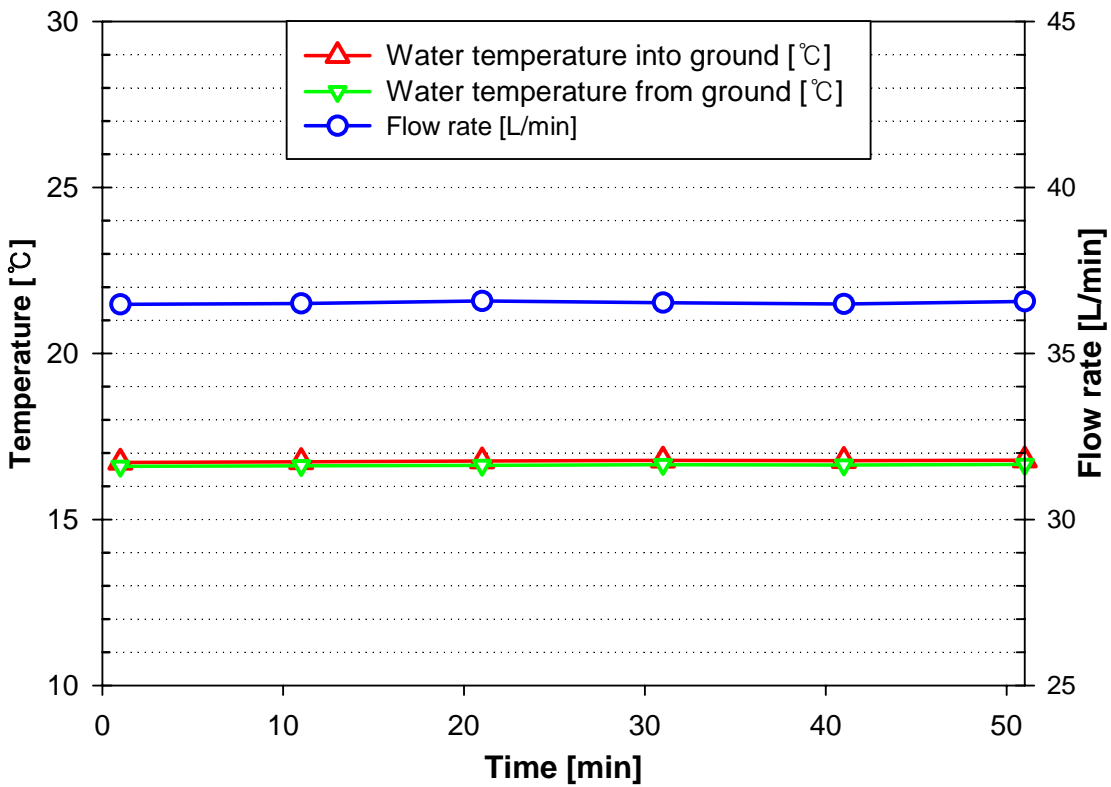


Fig. 14 Initial temperature of the inlet and the outlet

Fig. 15는 열전도도 측정 실험을 수행한 지중열교환기의 입·출구 온도변화 및 선형 열원 모델(line-source model)을 적용하기 위한 지중열교환기의 입·출구 평균온도 변화와 소요된 전력량을 나타낸다.

전체 시험시간은 48시간동안 계속 실시하였으며 시험초기에 50분 동안 가열장치를 작동시키지 않는 상태에서 순환펌프를 가동하여 물의 순환에 의하여 입·출구 온도는 16.6°C로 온도차가 없고 온도의 변화도 없었다.

초기 지중 평균온도를 측정하고 50분이 지난 후부터 히터를 통하여 열이 주입되면서

지중열교환기의 입·출구 온도는 급격히 상승하였다.

약 10시간(600 min)이 경과될 때까지 입·출구 온도가 급격히 상승하고 그 이후부터 점점 완만하게 기울기를 유지하였다.

전력투입량은 시험초기 50분 동안 약 0.4 kW로 순환펌프만 가동되었다가 히터를 통하여 열이 주입되면서 약 9.76 kW로 전력량이 상승되는 것으로 나타났다.

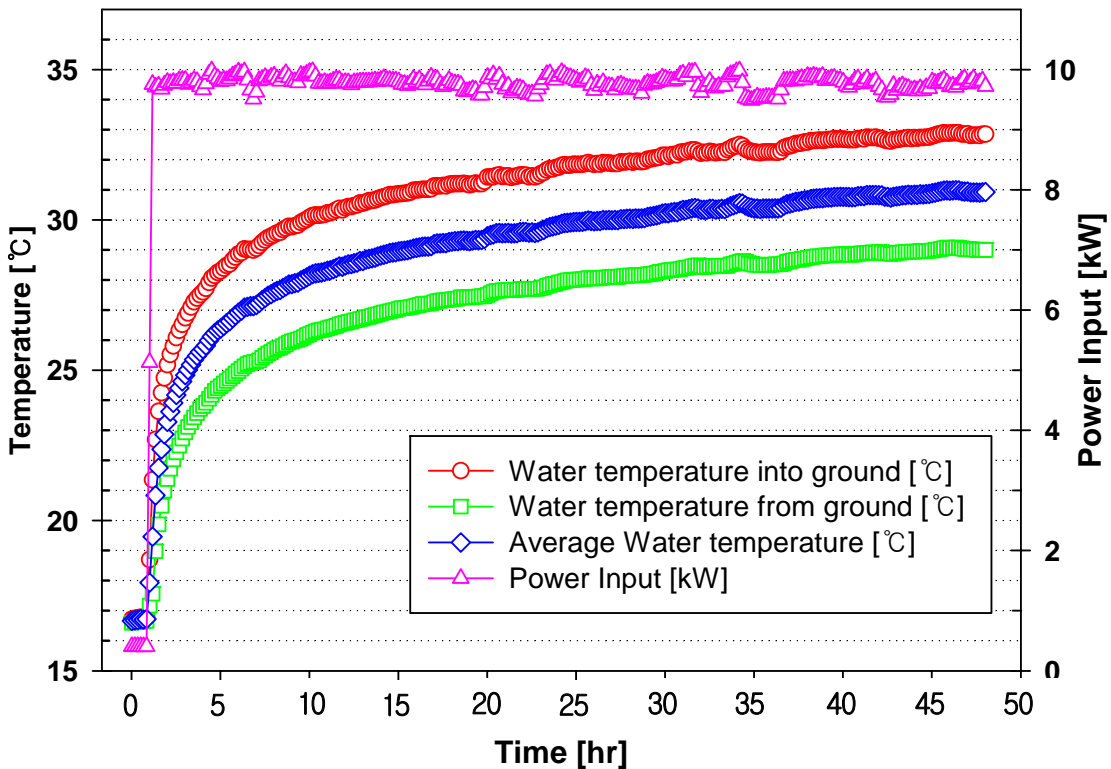


Fig. 15 Temperature distribution of the inlet and the outlet of the ground heat exchanger for measuring the thermal conductivity of ground

현장 열응답 시험은 자동전압조정기(AVR)를 설치하여 투입되는 전력량을 일정하게 유지되도록 제어하여 지중에 전달되는 열량을 가능하면 변화가 없이 일정하도록 제어하였다.

Fig. 16은 현장 열응답 시험의 전력투입량과 순환유체의 유량을 나타내는 그래프를 나타낸다.

전력 투입량은 시험초기 50분 동안 약 0.4 kW로 순환펌프만 가동되었다가 히터를 통하여 열이 순환수에 주입되면서 약 9.76 kW로 전력량이 상승되었으나 순환펌프의 유량은 36.53 L/min으로 일정하게 유지되는 것으로 나타났다.

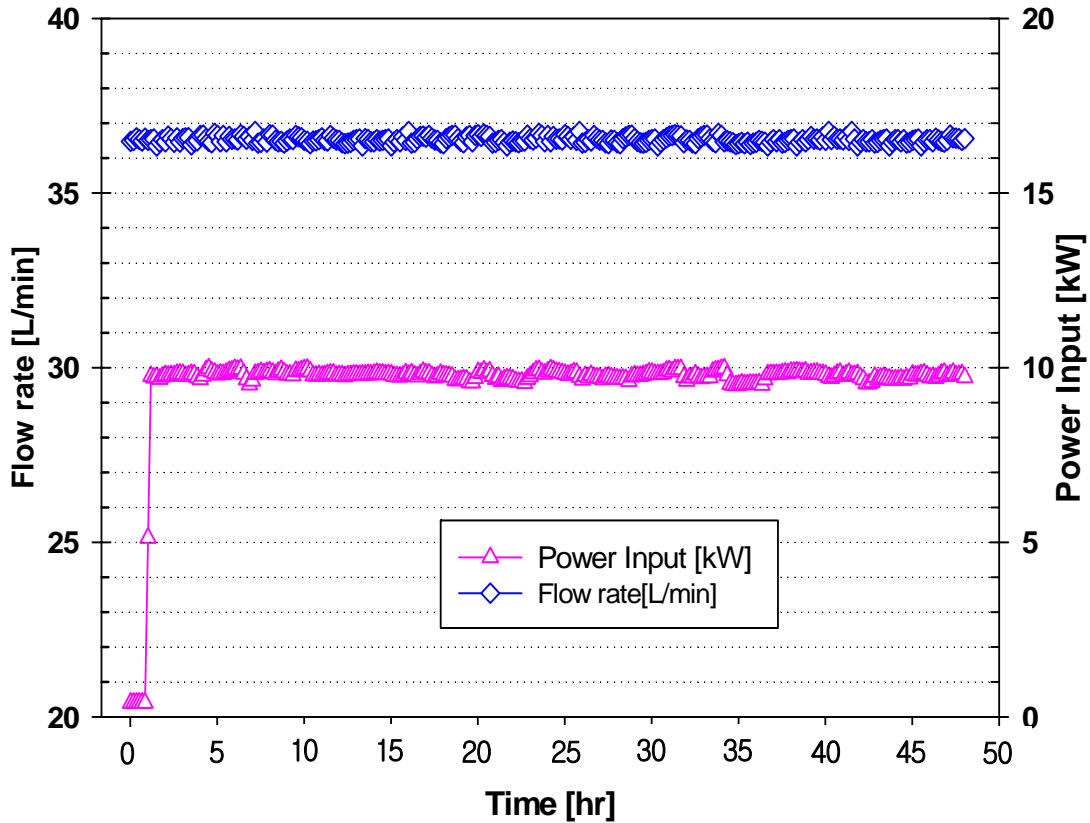


Fig. 16 Flow rate of circulating fluid and power input

전체 시험시간 48시간 동안 시험을 계속하였으며 시험초기 입·출구 온도가 급격히 상승하였다가 점점 완만하게 기울기를 유지할 때까지의 시간이 12시간이며 초기제외시

간(Initial ignoring time)이라고 한다. 선형열원 모델에서는 보어홀 유체의 온도가 대수시간에 관하여 직선식이 되는 특성을 이용하여 열전도도 값을 구한다.

Fig. 17은 지중열교환기 온도변화 곡선에 대하여 대수시간(Logarithmic time)에 대한 평균온도변화 곡선 전체를 나타내었다. 온도변화 곡선에서 지중열교환기를 통해 순환유체와 지중에서의 열전달이 안정화 되어 기울기가 일정해지는 지점에서 측정값으로 기울기를 구하였다.

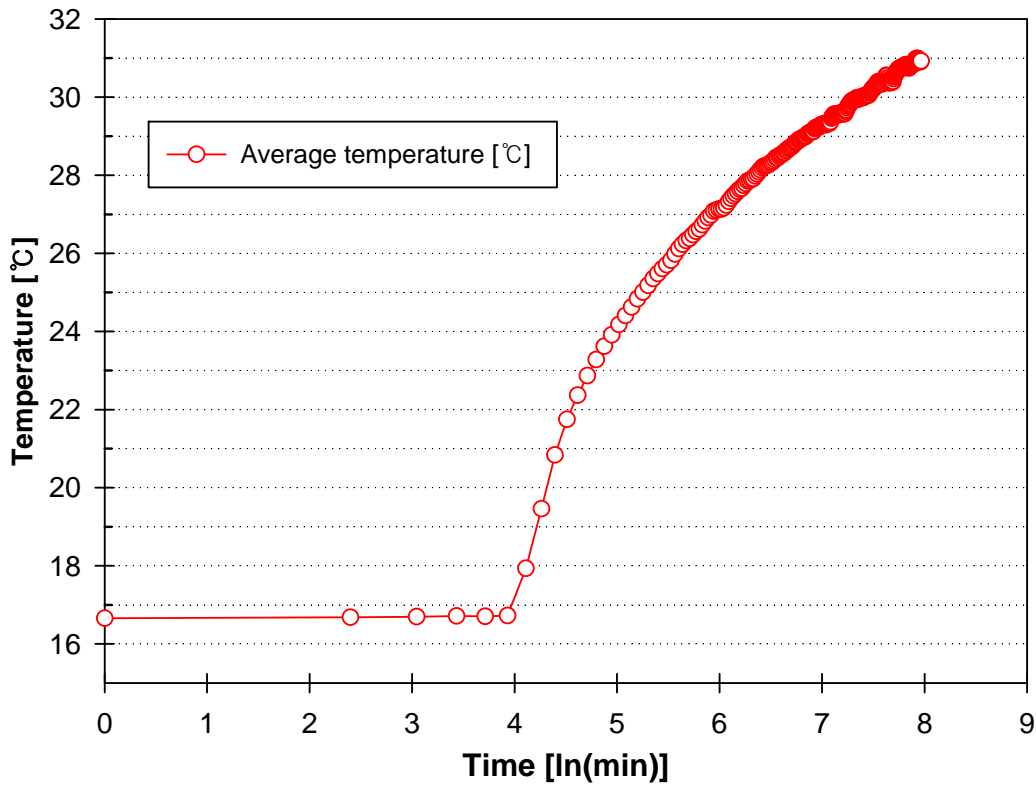


Fig. 17 Logarithmic time plot of the mean fluid temperature for calculating the thermal conductivity of ground

전체 시험시간 48시간 중 초기제외시간의 초기 12시간의 DATA를 버리고 그 이후 수집된 DATA를 분석하여 열전도도를 구한다.

Fig. 18은 지중열교환기 온도변화 곡선에 대하여 대수시간(Logarithmic time)에 대한 평균온도 변화 곡선의 초기제외시간의 12시간 DATA를 삭제하고 그 이후의 데이터로 그래프의 기울기를 나타내었다. 온도변화 곡선에서 지중열교환기를 통해 순환유체와 지중에서의 열전달이 안정화 되어 기울기가 일정해지는 지점에서 측정값으로 기울기를 구하였다. 기울기 방정식은 $Y=1.8061X+16.6449$ 이며 기울기(Slope) 값은 1.81로 나타났다.

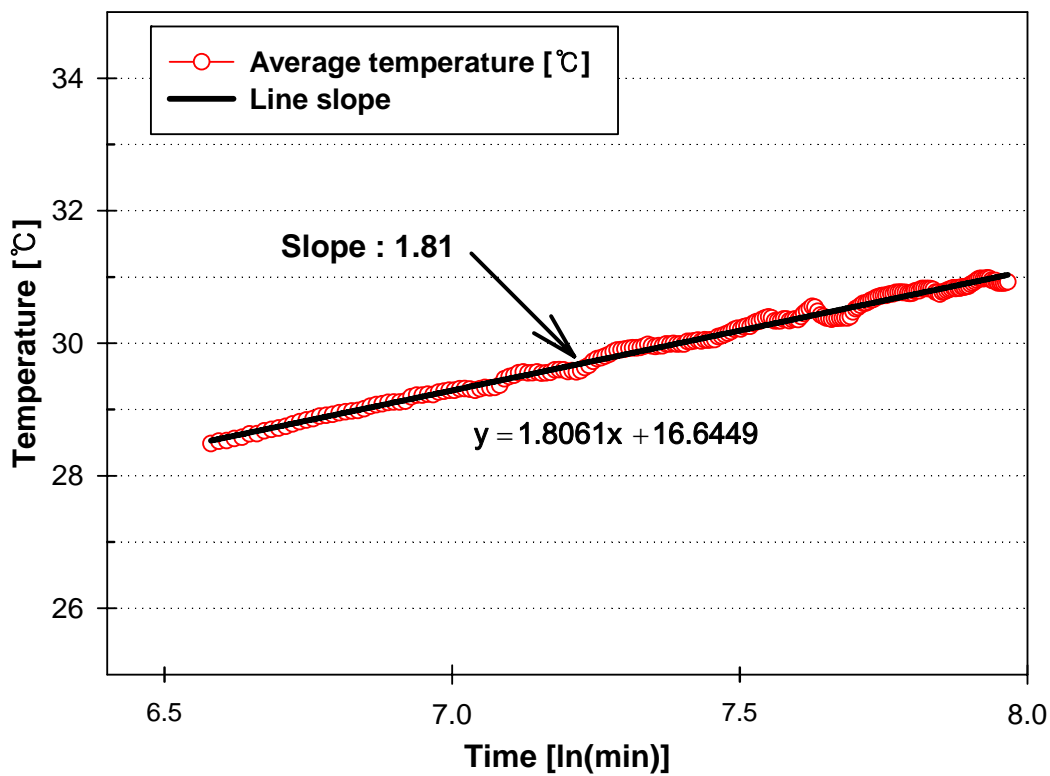


Fig. 18 Logarithmic time plot of the mean fluid temperature for calculating the thermal conductivity of ground

식(2-14)을 통해 기울기를 구하였으며 식(2-17)을 이용하여 열전도도 값을 계산하였다. 이때 기울기는 1.81이며, 열응답 시험 및 열전도도 값 계산결과 열전도도 값은 2.65 W/m·K로 나타났다. Table 10은 열응답 시험의 지중열전도도 측정을 위한 지중열교환기 규격 및 측정 조건 등을 정리하여 나타내었다.

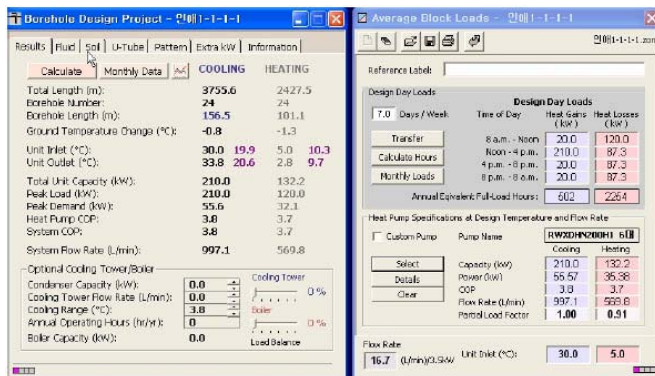
Table 10 Specification of the in-situ thermal response tester and the ground thermal conductivity

Items	Contents
Borehole diameter	150 [mm]
Depth of borehole	162.5 [m]
Material of GHE	HDPE(High-density Polyethylene)
Pipe size of GHE	32 [mm]
Circulating fluid	Water
Power input	9.756 [kW]
Flow rate	36.53 [L/min]
Test duration time	48 [hr]
Slope	1.81
Thermal conductivity	2.65 [W/m·K]

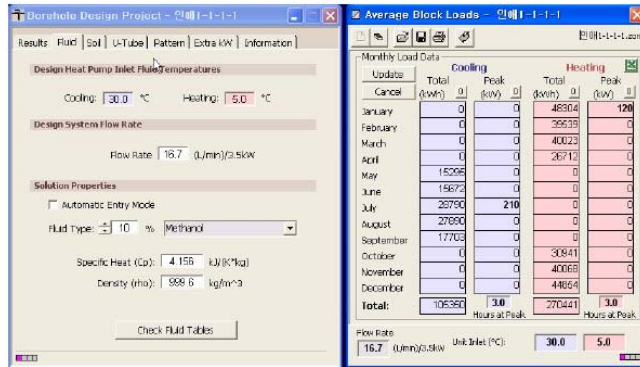
4.1.4 지중 열교환기 설계변수에 대한 고찰

지열 히트펌프의 설계는 미국 Gaia Geothermal사의 통합 지열원 히트펌프 시스템 설계 소프트웨어인 Ground Loop Design(GLD)을 사용하였다. 설계시 기본 입력 사항이 되는 실험대상의 건물 냉·난방부하는 부하계산 프로그램을 사용하여 지역의 기후조건, 실내조건, 구조체별 열관류율, 실별 자료 등을 순차적으로 입력하여 계산하고 실내외 온습도 조건을 고려하여 부하계산을 수행하였다.

Fig. 19와 Fig. 20은 지중 열교환기 설계프로그램(GLD)의 계산결과 화면을 나타내었다.

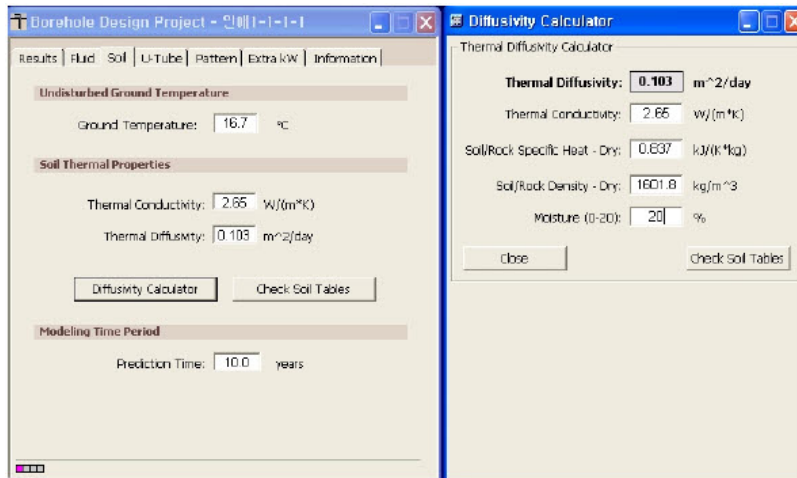


(a) Borehole design project results

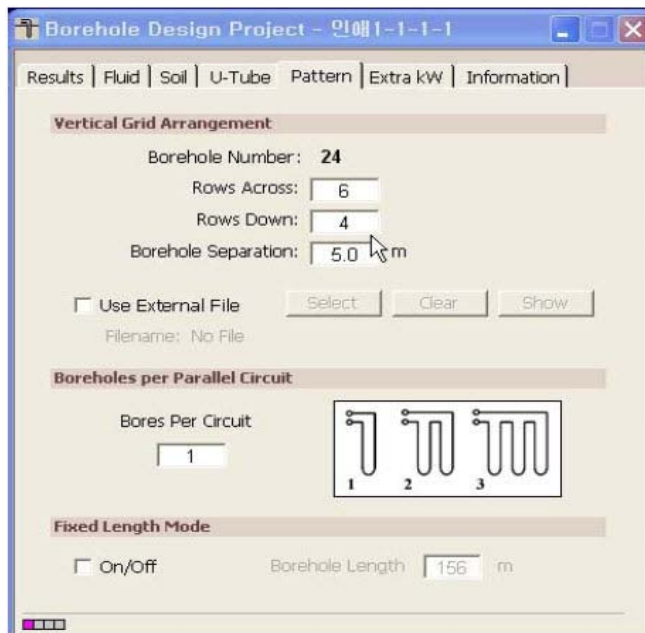


(b) Input fluid(Ground water) properties

Fig. 19 Borehole design project report



(c) Input soil (Ground) properties



(d) Input loop pattern

Fig. 20 Borehole design project report

4.2 지중 깊이별 온도분포

본 실험은 2010년 4월 12일부터 2011년 8월 8일까지 1년 4개월 동안 수행되었으며, 실험대상 건물을 완공하고 기계실 장비설치를 완료하여 시운전을 마친 후부터 가동을 시작하였다. 하절기는 냉방에 지열히트펌프만 사용되었으며 동절기에는 난방에 바닥 복사난방과 지열히트펌프가 겸용으로 사용되었다.

Fig. 21은 외기온도 변화에 따른 지표면 아래 20 m까지 각 지점의 연간 온도변화를 나타낸다.

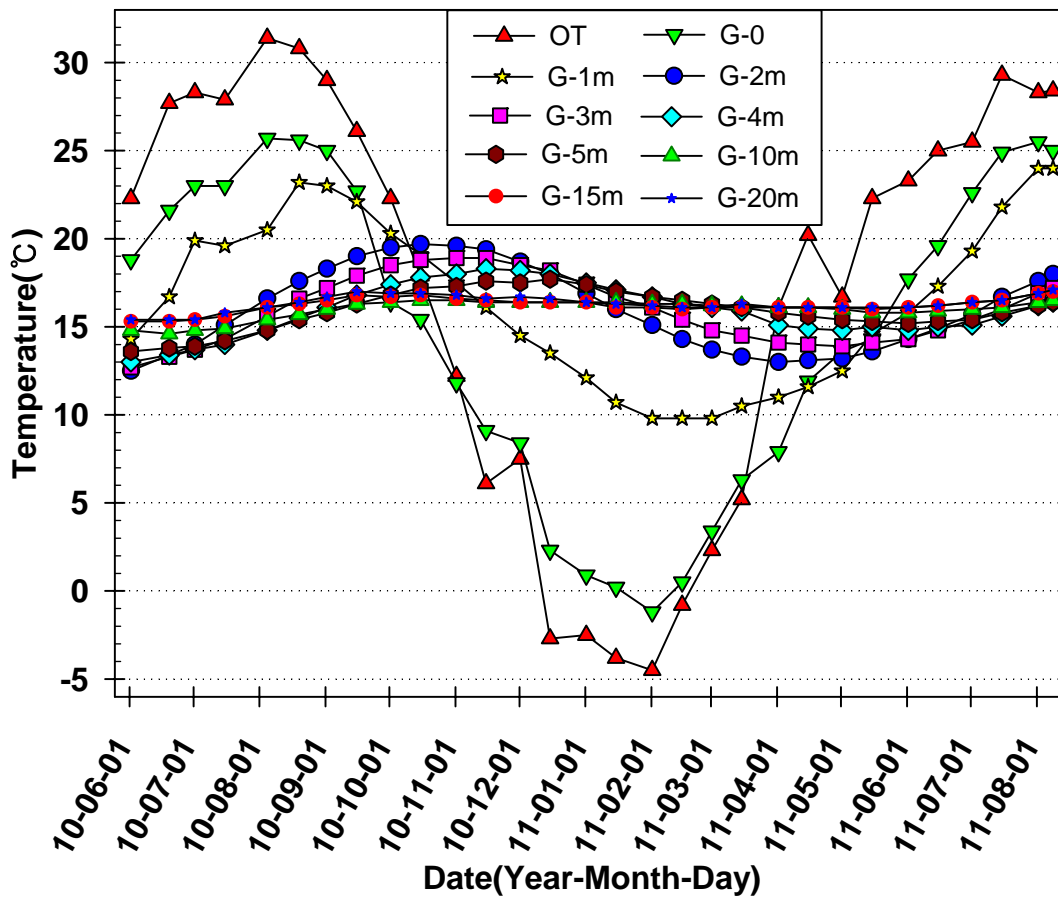


Fig. 21 Yearly relations of date and temperature of outdoor and ground with the ground depth

Fig. 22는 외기온도 변화에 따른 지표면 아래 10 m까지 각 지점의 연간 온도변화를 나타낸다.

지표면에 가까울수록 외기온도의 영향을 많이 받아 온도의 변화가 컸으며, 지표면 아래로 깊을수록 외기온도의 영향을 적게 받는 현상을 보였다.

연중 외기온도의 최고, 최저온도가 35.7°C의 온도 차이를 나타낼 때 이에 따른 지표면의 온도 차이는 27.5°C이고 지표면 아래 1 m에서 14.6°C, 2 m에서 6.9°C를 나타내어 지표면 아래 2 m이하에서는 계절이나 날씨에 따른 온도변화율이 급격히 적어짐을 볼 수 있었다.

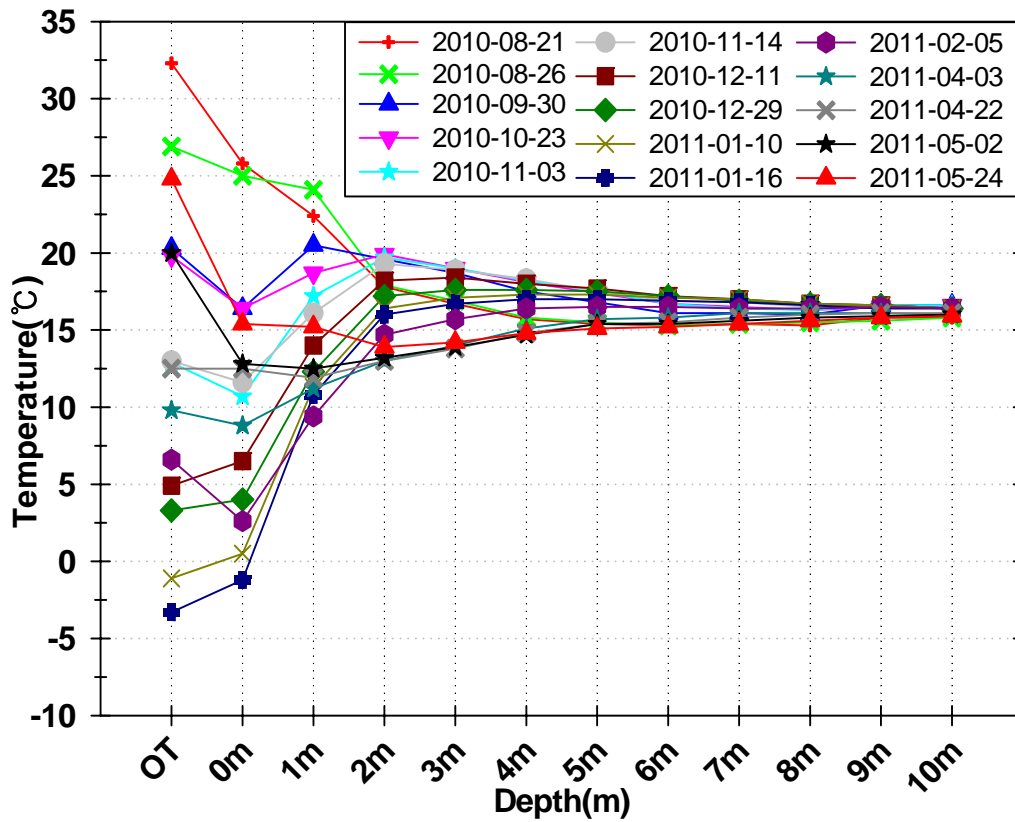


Fig. 22 Yearly relations of ground depth and temperature of outdoor and ground

지표면 아래 5 m이하에서 최고, 최저 온도 차이는 2.6°C의 차이를 나타내었고, 지표면 아래 6 m에서 2.1°C, 7 m에서 1.6°C, 8 m에서 1.1°C, 9 m에서 1°C, 10 m아래에서는 0.8°C 차이를 나타내어 거의 지표의 온도변화에 대한 영향이 없음을 나타내었다.

외기온도는 8월 초순이 가장 높았으나 지표면 아래 2 m지점(G-2)에서 최고온도는 10월 하순으로 측정되었으며 지표면 아래 5 m지점(G-5)에서는 12월 초순의 온도가 가장 높게 나타났다. 지표면 아래 10 m이하에서는 외기온도 변화에 따라 영향을 적게 받아 온도변화가 1°C차 이하로 안정적이었다.

지표면 아래 20 m지점의 연간 평균온도는 16.4°C를 나타내었다.

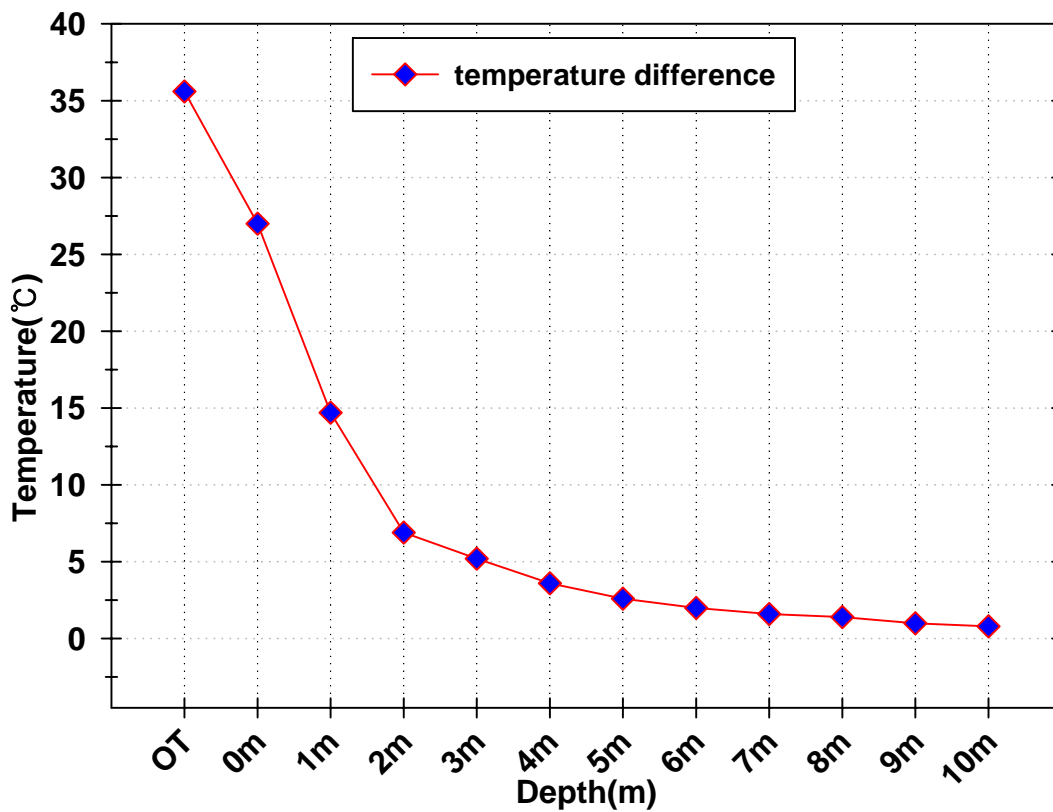


Fig. 23 Yearly relations of ground depth and temperature difference

그리고 지표면 아래로 깊어질수록 외기온도의 영향을 적게 받고 온도변화의 영향이 늦게 나타나는 시간지연(Time Lag)을 나타내고 있다.

이와 반대로 겨울철 외기온도가 가장 낮을 때는 1월 중순에 나타났으며 지표면 아래 2 m지점(G-2)에서 최저온도는 4월 초순으로 측정되었으며 지표면 아래 5 m지점(G-5)에서는 5월 하순의 온도가 가장 낮게 나타났다.

Fig. 23은 연중 최저온도, 최고온도의 차이를 지중 깊이별로 나타내었다.

외기온도의 연중 최저, 최고 온도차가 35.7℃의 온도 차이를 나타낼 때 지표면의 최저, 최고 온도 차이는 27.5℃를 나타내었고 지표면 아래로 깊어질수록 온도변화가 급격히 적어져 2 m 깊이에서는 6.9℃차이를 나타내고 지표면아래 10 m지점에서는 0.8℃차이를 나타내어 거의 지표의 온도변화에 대한 영향이 없음을 나타내었다.

4.3 이격거리에 따른 온도분포

4.3.1 냉방시

Fig. 24와 Fig. 25는 냉방시(2011.08.03) 하루 중 지표면 아래 10 m깊이에서 지열히트펌프 순환수 온도의 변화에 의한 지중열교환기 표면온도와 지중열교환기에서 수평으로 이격거리에 따른 온도변화를 나타낸다.

여름철 주간에는 일사부하에 의하여 외기온도의 상승에 따라 지열히트펌프의 작동으로 지중열교환기 표면온도가 상승하고, 외기에 의한 냉방부하의 증감에 따라 지중열교환기 표면의 온도가 변화한다.

하루 중 최대부하를 받는 경우와 부분부하를 받는 경우 지열히트펌프의 순환수온도에 의한 지중열교환기 표면온도가 3.1℃ 변화할 때 이격거리 0.5 m지점부터 최고, 최저 온도변화의 폭이 급격히 줄어들어 0.5 m지점부터 2.5 m지점까지 각 지점에서 하루 동안 온도변화는 각각 0.1℃차이를 나타내었으며 각 지점사이의 온도 차이는 지중열교환기 표면(0 m지점)과 0.5 m지점사이의 온도 차이는 4.4℃차이이며 0.5 m지점부터 급격히 적어져 0.5 m지점과 1 m지점 사이에서 0.6℃차이, 1 m지점과 1.5 m지점 사이에서 0.1℃차이, 1.5 m지점과 2 m지점 사이에서 0.2℃차이, 2 m지점과 2.5 m지점 사이에서 0.1℃차이를 나타내었으며 보어홀 반경거리 2.5 m지점에서 온도변화가 0.1℃이므로 그 이상의 이격거리는 온도변화가 작으므로 보어홀사이의 거리가 5 m의 경우 인접 지중열교환기의 온도변화에 의한 열간섭의 영향이 적을 것으로 추정된다.

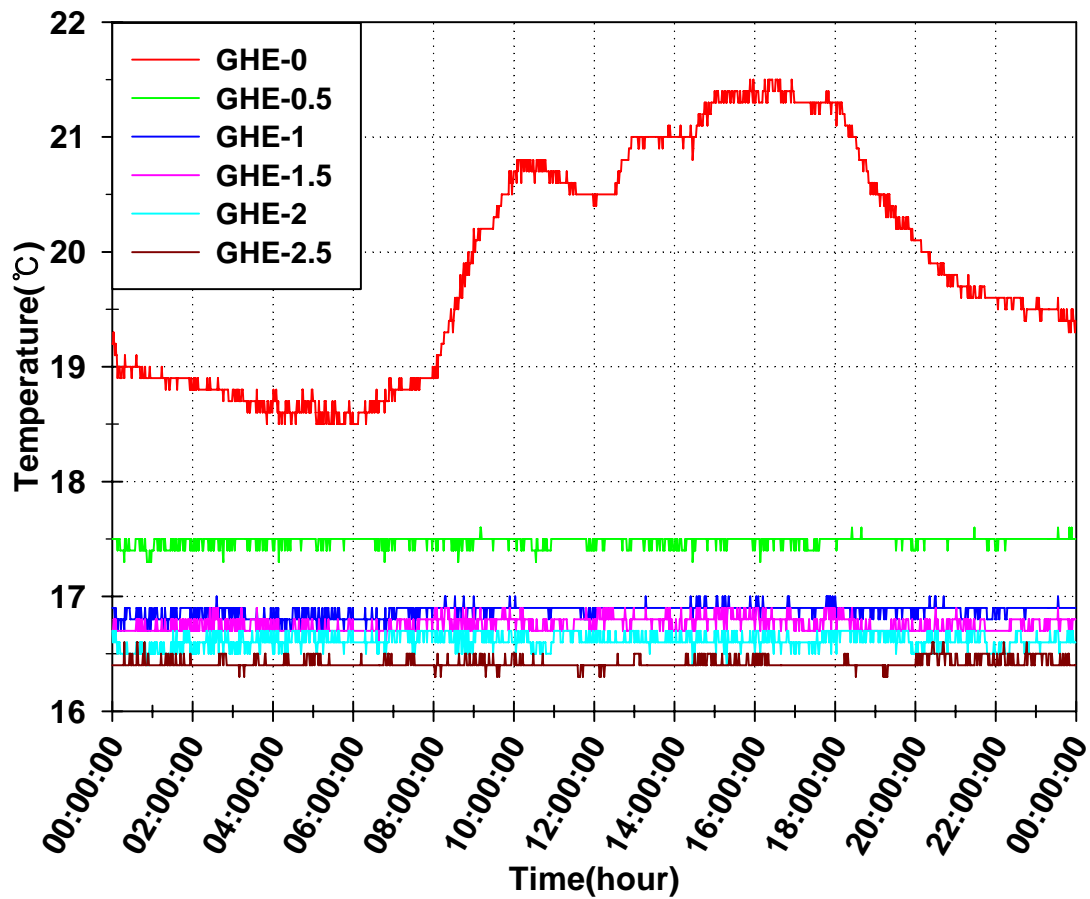


Fig. 24 Relations of temperature and time with the distances from the ground heat exchanger under cooling conditions(2011.8.3.)

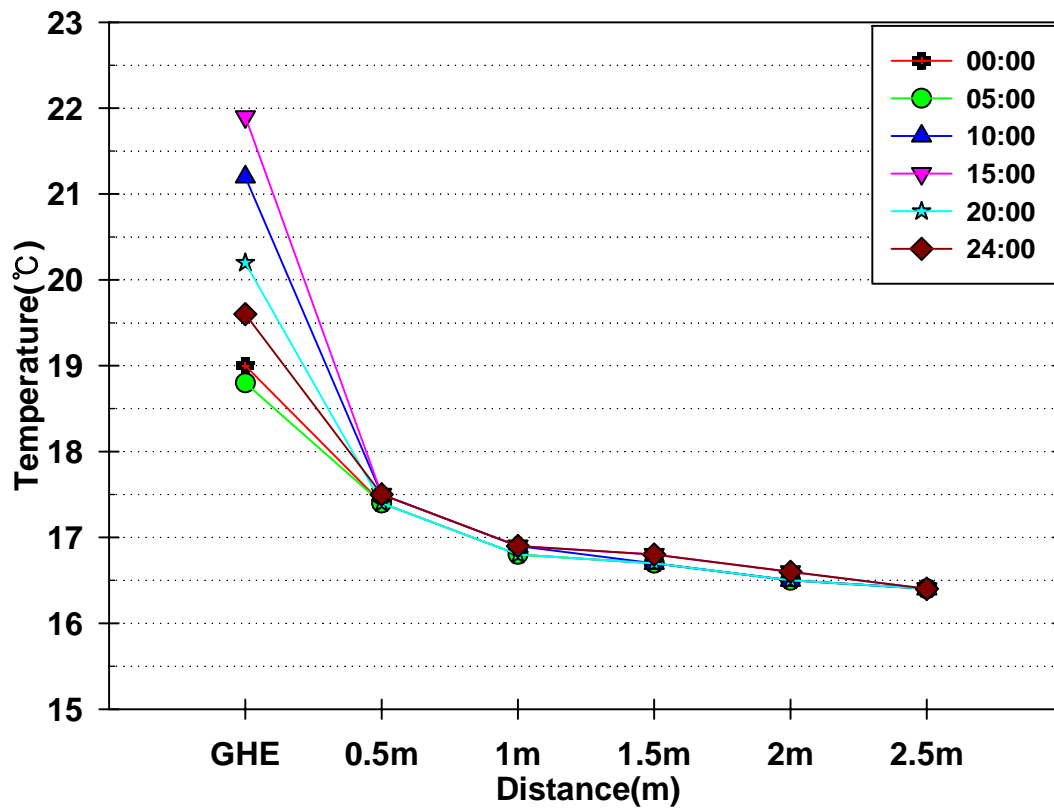


Fig. 25 Relations of temperature and distances from the ground heat exchanger under cooling conditions with time (2011 8.3.)

Fig. 26과 Fig. 27은 여름철 냉방시 지열히트펌프 순환수 온도의 변화에 의한 지중열교환기 표면온도와 지표면 아래 10 m깊이의 지중열교환기에서 수평으로 이격거리에 따른 각각 지점별 온도변화를 나타낸다.

여름철 계절부하에 의하여 외기온도의 변화에 따라 지열히트펌프의 작동으로 지중열교환기 표면온도가 상승하고, 외기에 의한 냉방부하의 증감에 따라 지중열교환기 표면의 온도가 변화한다.

여름철 최대부하를 받는 경우와 부분부하를 받는 경우의 지열히트펌프 순환수온도에 의한 지중열교환기 표면온도가 5.3℃ 변화할 때 이격거리 0.5 m지점부터 최고, 최저 온도변화의 폭이 급격히 줄어들어 1.6℃차이며 1 m지점에서 1.1℃, 1.5 m지점에서 1℃, 2 m지점에서 0.8℃, 2.5 m지점에서 0.4℃차이로 나타났다.

여름철 냉방중 보어홀 반경방향으로 2.5 m지점에서 온도변화가 하루 동안 온도변화보다 조금 증가했으나 0.4℃차이로 미세하게 나타났으므로 그이상의 이격거리는 온도변화가 없어 영향이 없는 것으로 판단된다.

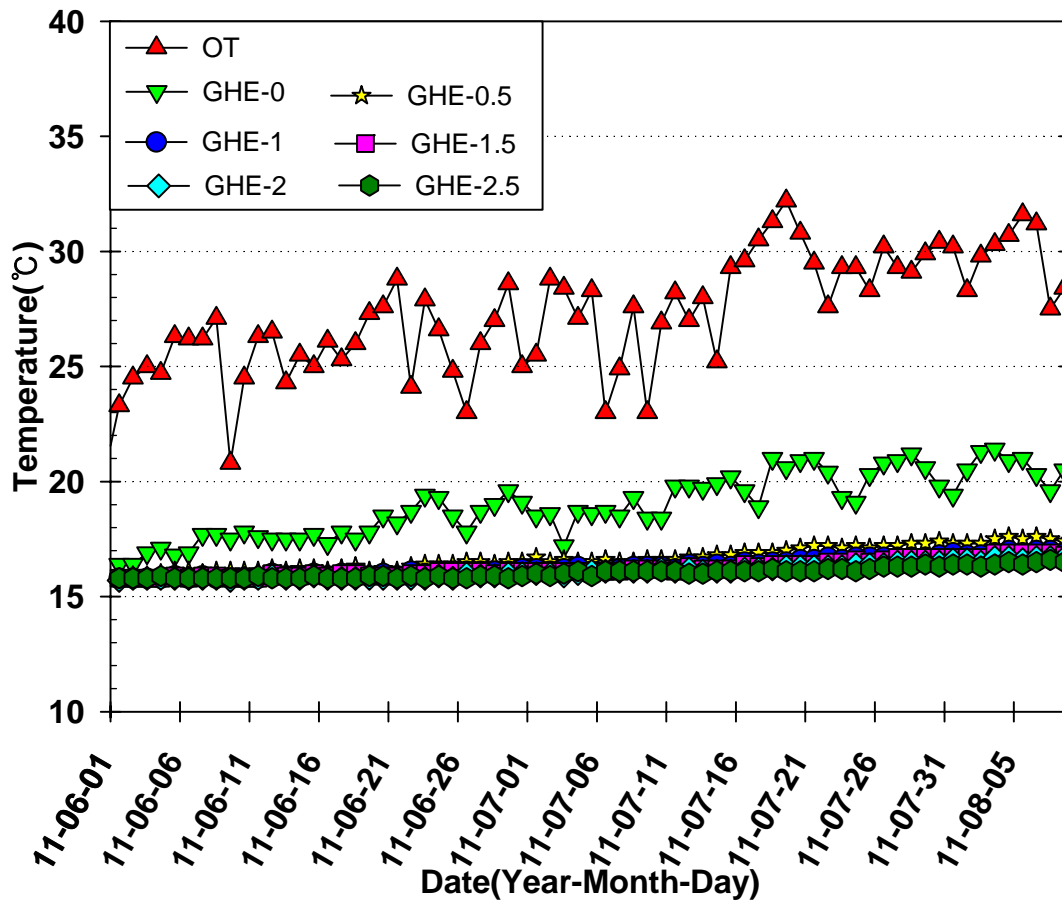


Fig. 26 Relations of temperature and distances from the ground heat exchanger under cooling conditions with season (Summer)

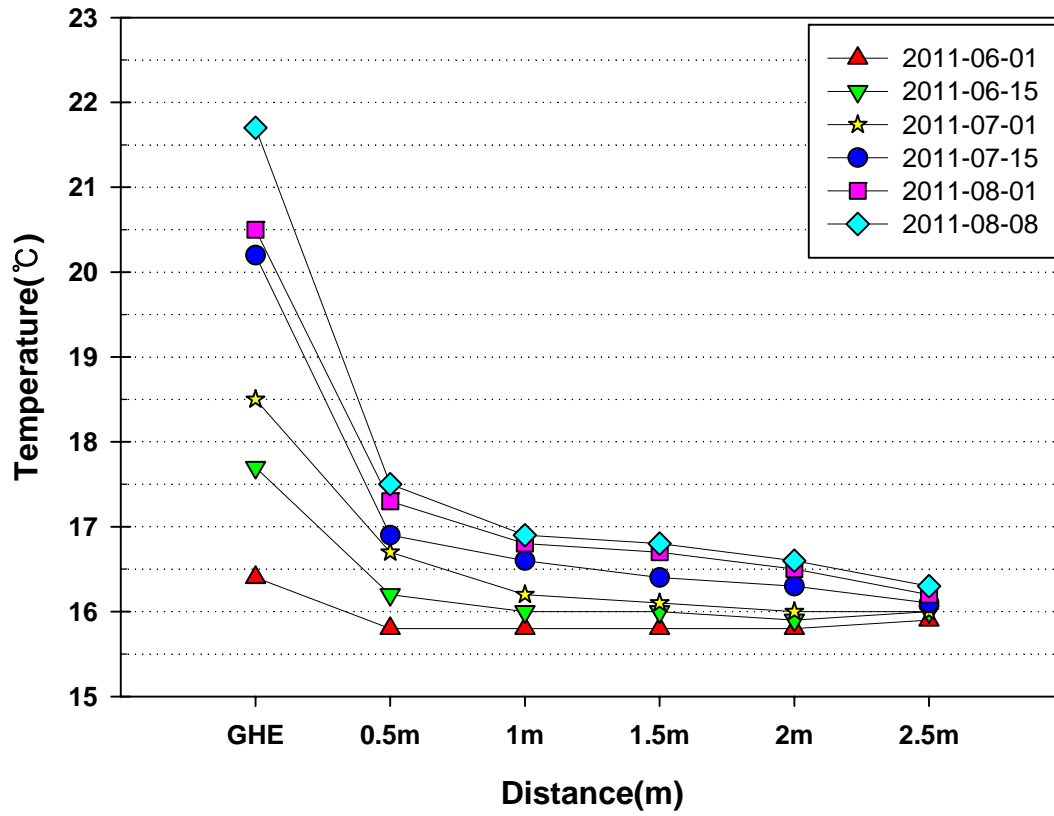


Fig. 27 Relations of temperature and distances from the ground heat exchanger under cooling conditions with season (Summer)

4.3.2 난방시

Fig. 28과 Fig. 29는 난방시(2011.01.18) 지표면아래 10 m 깊이에서 지중열교환기 순환수의 온도와 지중열교환기에서 수평으로 이격거리에 따른 하루의 온도변화를 나타낸다.

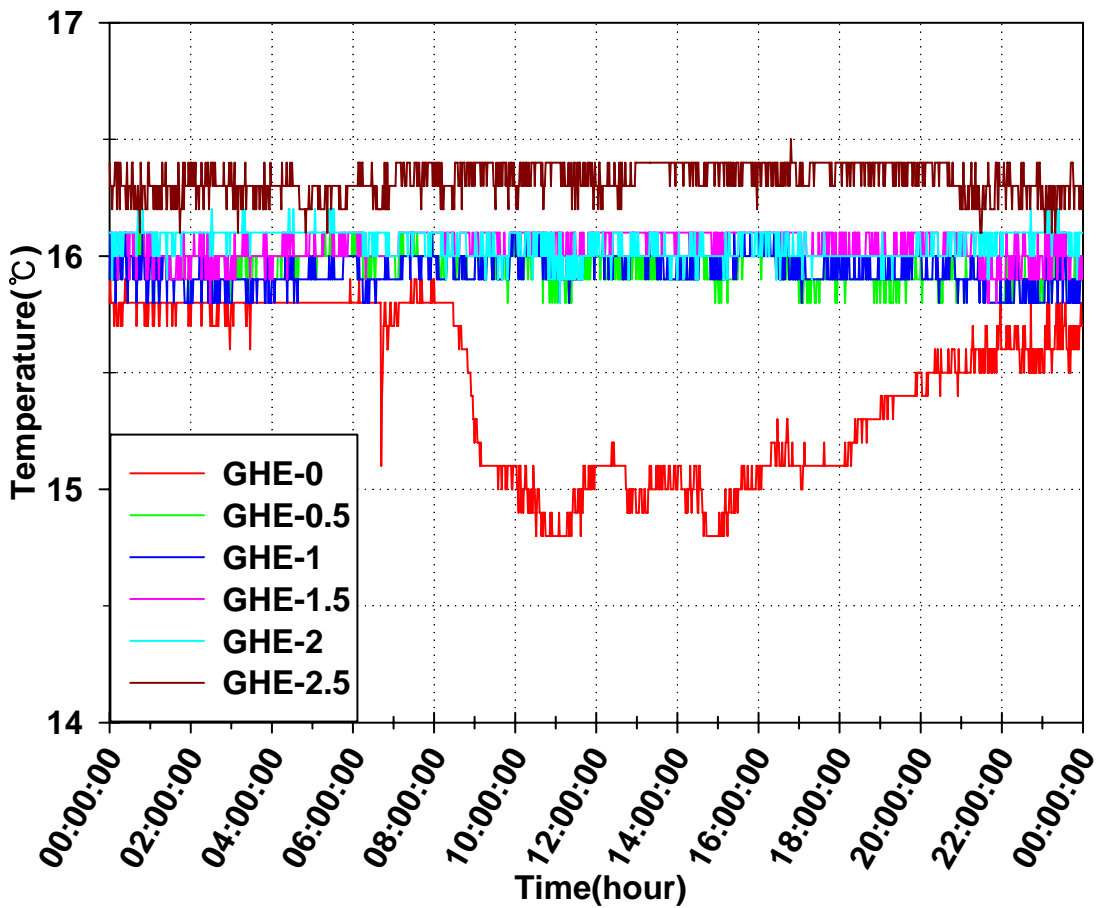


Fig. 28 Relations of temperature and time with the distances from the ground heat exchanger under heating conditions(2011.1.18)

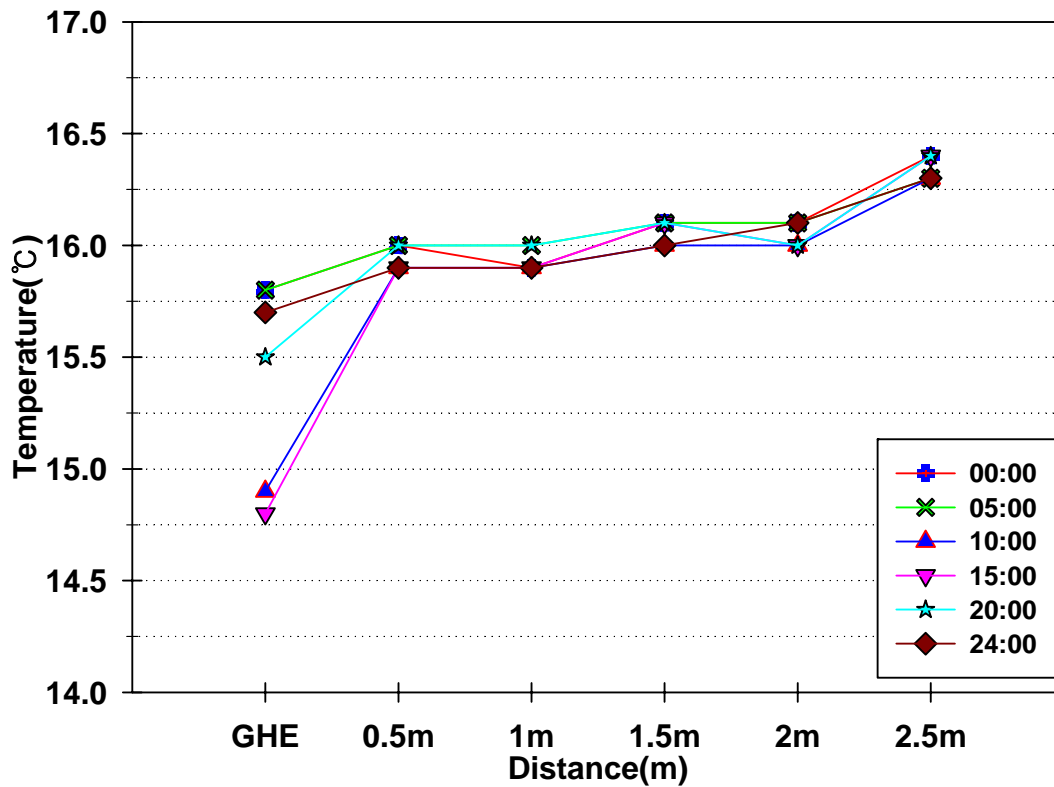


Fig. 29 Relations of temperature and distances with the time from the ground heat exchanger under heating conditions(2011.1.18)

순환수의 온도는 최대부하가 걸리는 경우와 부분부하가 걸리는 경우 1°C 차이가 날 때 이격거리 0.5 m 지점부터 급격히 적어져 0.5 m 지점부터 2.5 m 지점까지 각각 지점에서 온도 차이는 각각 0.1°C를 나타내었으며 각 지점사이의 온도 차이는 0 m 지점과 0.5 m 지점 사이에서 1.1°C 차이이며 0.5 m 지점부터 급격히 적어져 0.5 m 지점과 1 m 지점 사이에서 0.1°C 차이, 1 m 지점과 1.5 m 지점 사이에서 0.1°C 차이, 1.5 m 지점과 2 m 지점 사이에서 0.1°C 차이, 2 m 지점과 2.5 m 지점 사이에서 0.3°C 차이를 나타내었으며 보어홀 반경거리 2.5 m 지점에서 거의 영향을 미치지 않았다.

Fig. 30과 Fig. 31은 겨울철 난방시 지열히트펌프 순환수 온도의 변화에 의한 지중열교환기 표면온도와 지표면 아래 10 m깊이의 지중열교환기에서 수평으로 이격거리에 따른 각각 지점별 온도변화를 나타낸다.

겨울철 계절부하에 의하여 외기온도의 변화에 따라 지열히트펌프의 작동으로 지중열교환기 표면온도가 하강하고, 외기에 의한 난방부하의 증감에 따라 지중열교환기 표면의 온도가 변화한다.

겨울철 최대부하를 받는 경우와 부분부하를 받는 경우의 지열히트펌프 순환수온도에 의한 지중열교환기 표면온도가 1.3℃ 변화할 때 이격거리 0.5 m지점부터 최고, 최저 온도변화의 폭이 급격히 줄어들어 0.3℃차이며 1 m지점에서 0.2℃, 1.5 m지점에서 0.2℃, 2 m지점에서 0.2℃, 2.5 m지점에서 0.1℃차이로 나타났다.

겨울철 난방중 보어홀 반경방향으로 2.5 m지점에서 온도변화가 하루 동안 온도변화와 마찬가지로 0.1℃차이로 미세하게 나타나 그이상의 이격거리는 온도변화가 없어 영향이 없는 것으로 판단된다.

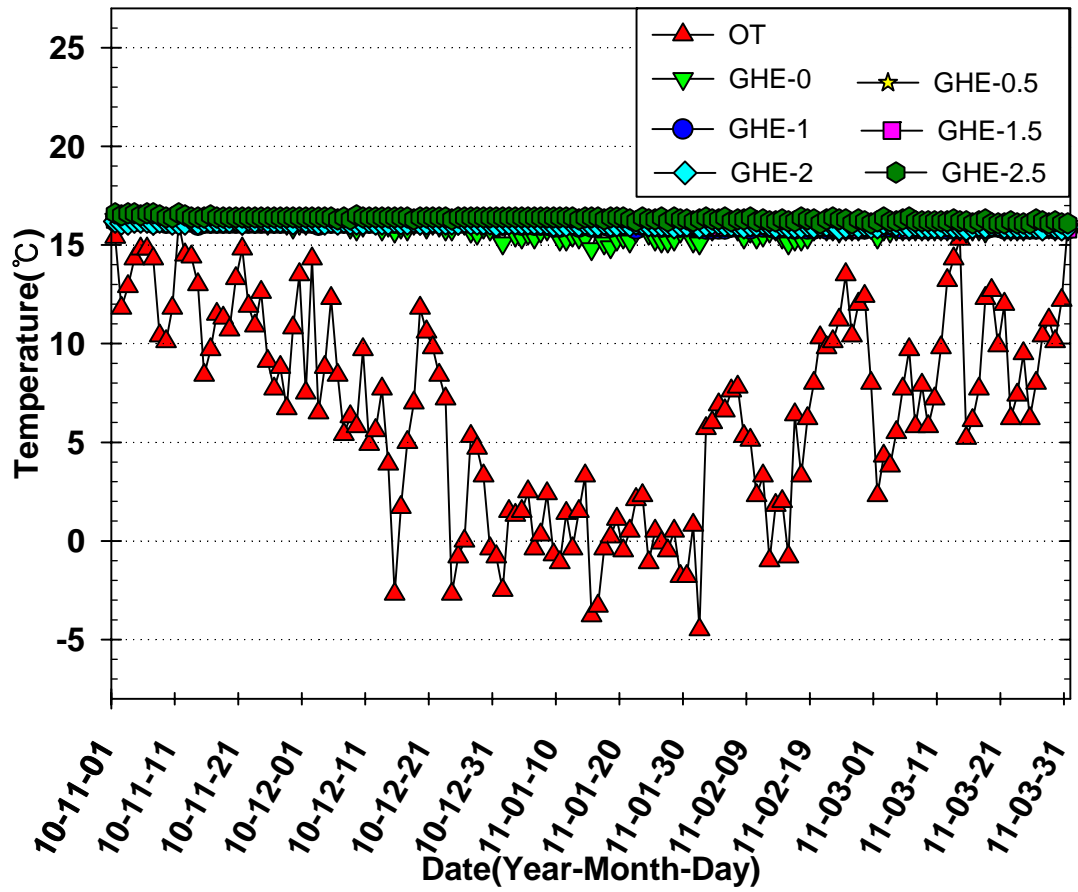


Fig. 30 Relations of temperature and distances from the ground heat exchanger under heating conditions with season (Winter)

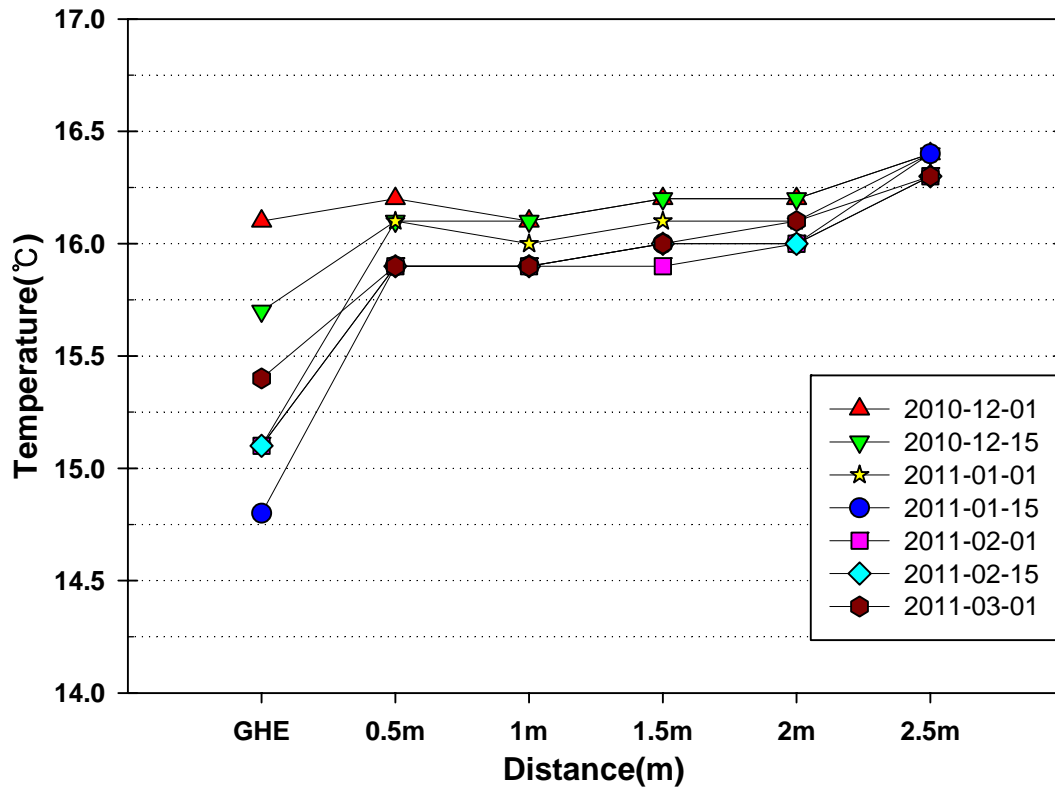


Fig. 31 Relations of temperature and distances from the ground heat exchanger under heating conditions with season (Winter)

4.3.3 연간 이격거리별 온도분포

Fig. 32와 Fig. 33은 냉·난방시 연간 지표면아래 10 m 깊이에서 수평방향으로 이격거리별 온도변화를 나타낸다.

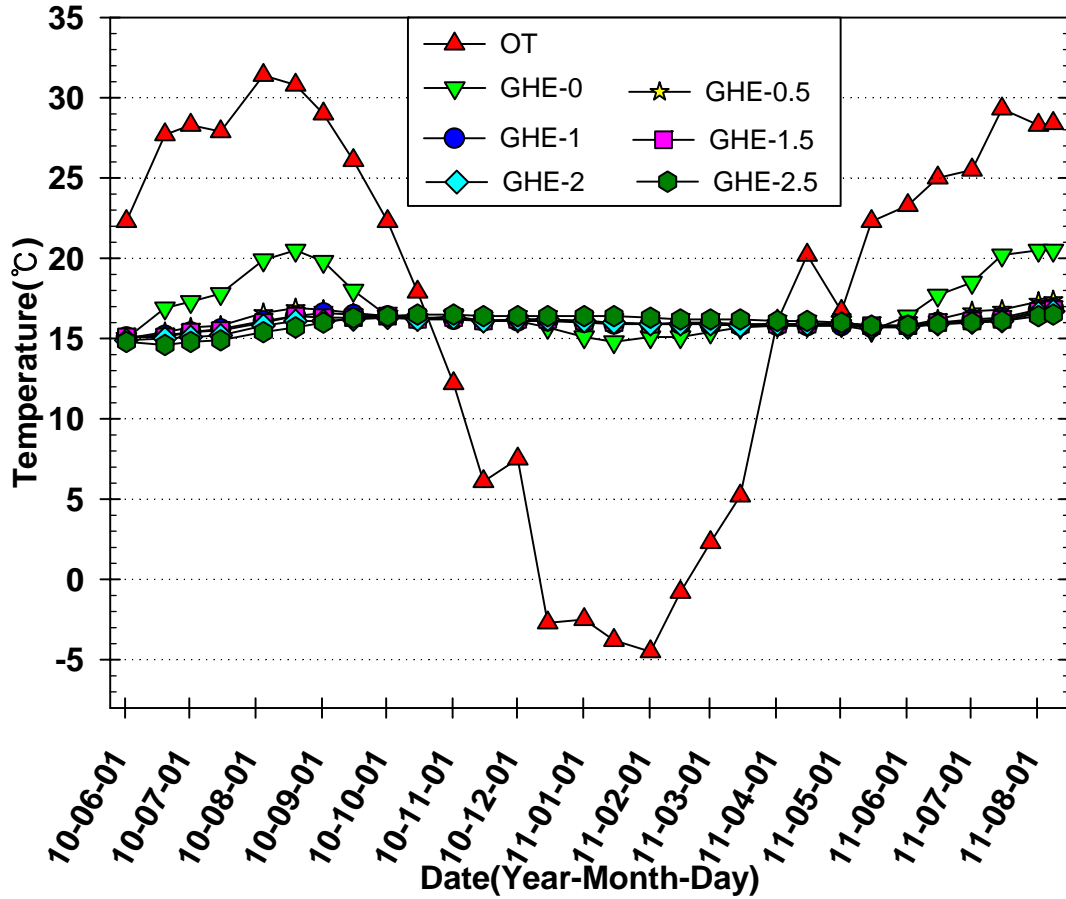


Fig. 32 Yearly relations of date and outdoor temperature with distances from the ground heat exchanger

냉방시와 난방시의 지중열교환기 순환수온도(GHE-0)의 연중 가장 추운날과 더운날의 지표면아래 10 m지점에서 순환수의 온도차는 7.1℃를 나타내었으며 이격거리 0.5 m지점에서 1.6℃차이며 1 m지점에서 1℃, 1.5 m지점에서 0.8℃, 2 m지점에서 0.6℃, 2.5 m지점에서 0.1℃차이로 나타났다.

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

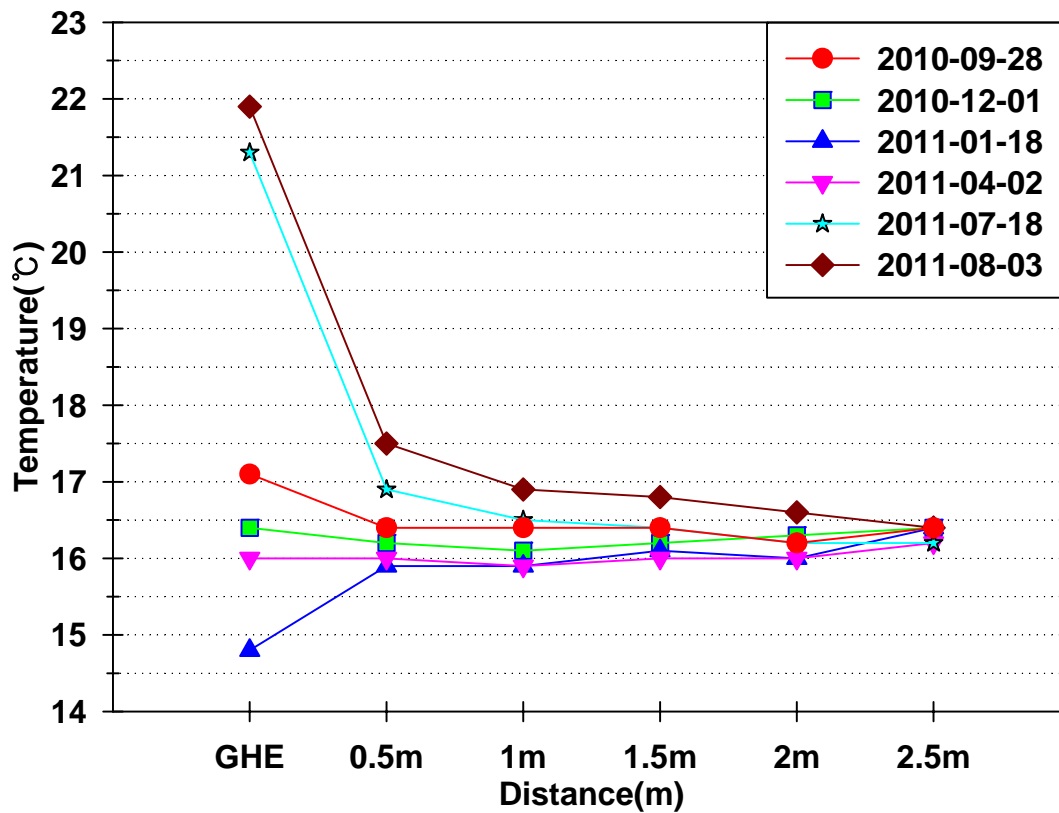


Fig. 33 Yearly relations of temperature and distances from the ground heat exchanger

위와 같이 냉·난방시 지중열교환기 순환수온도가 변화함에 따라 이격거리 0.5 m에서 2.5 m까지의 하루 중 온도변화는 0.1℃차이로 미세하였으며 연중 온도변화는 0.5 m지점에서 1.6℃차로 급격히 줄어들어 2.5 m지점에서는 0.1℃차이를 나타내었으며 보어홀 반경거리 2.5 m지점에서 거의 영향을 미치지 않았다.

이와 같은 결과 지중열교환기 보어홀의 간격이 5 m이상이면 인접 지중열교환기의 영향이 미치지 않아 열간섭(Temperature penalty)이 없음을 나타내었다.

4.3.4 지중 온도회복

Fig. 34는 지중열교환기에서 수평방향으로 이격거리 2.5 m지점의 계절별 온도변화를 나타내었다. 지열히트펌프를 가동하여 냉방운전중인 2010년 8월 4일의 지중온도는 15.8°C이며, 2010년 9월 1일 부분부하 운전시 온도는 16°C이다. 지열히트펌프 정지기간인 2010년 10월 15일까지 온도가 상승하여 지중온도는 16.5°C이고, 난방운전으로 2011년 1월 15일 16.4°C로 하강한다. 2011년 4월 15일 16.1°C까지 하강하고 2011년 7월 15일 냉방운전시까지 16.1°C로 온도가 동일하다가 상승하기 시작하여 2011년 8월 8일 16.5°C로 상승하였다. 2011년 8월 8일 이격거리 2.5 m지점의 지중온도는 1년 전의 지중온도보다 0.7°C 상승하였다.

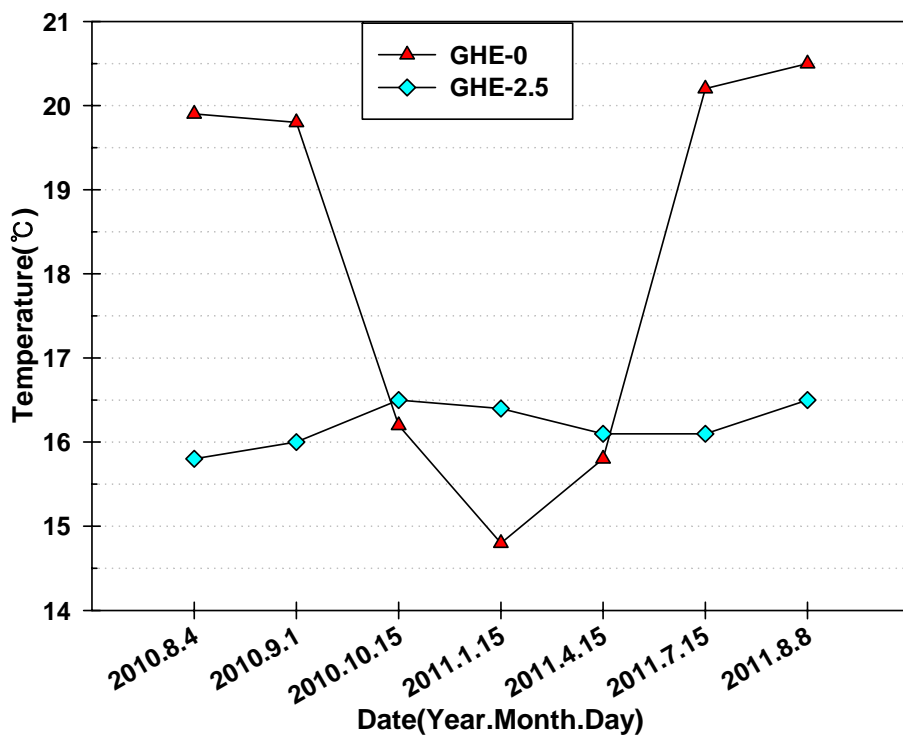


Fig. 34 Yearly relations of date and ground heat exchanger surface temperature with distances(2.5 m) from the ground heat exchanger

Fig. 35는 지중열교환기에서 수평방향으로 이격거리 2 m지점의 계절별 온도변화를 나타내었다. 지열히트펌프를 가동하여 냉방운전중인 2010년 8월 4일의 지중온도는 15.9°C이며, 2010년 9월 1일 냉방부하가 낮아져 부분부하 운전시 지중온도는 16.1°C이다. 지열히트펌프 정지기간인 2010년 10월 15일까지 온도가 상승하여 지중온도는 16.2°C이고, 난방운전이 시작되어 2011년 1월 15일 16°C로 하강한다. 2011년 4월 15일 15.9°C까지 하강되었다가 2011년 7월 15일 냉방운전으로 16.1°C로 상승하기 시작하여 2011년 8월 8일 냉방운전시 16.7°C로 상승하였다.

2011년 8월 8일 이격거리 2 m지점의 지중온도는 1년 전의 지중온도보다 0.8°C 상승하였다.

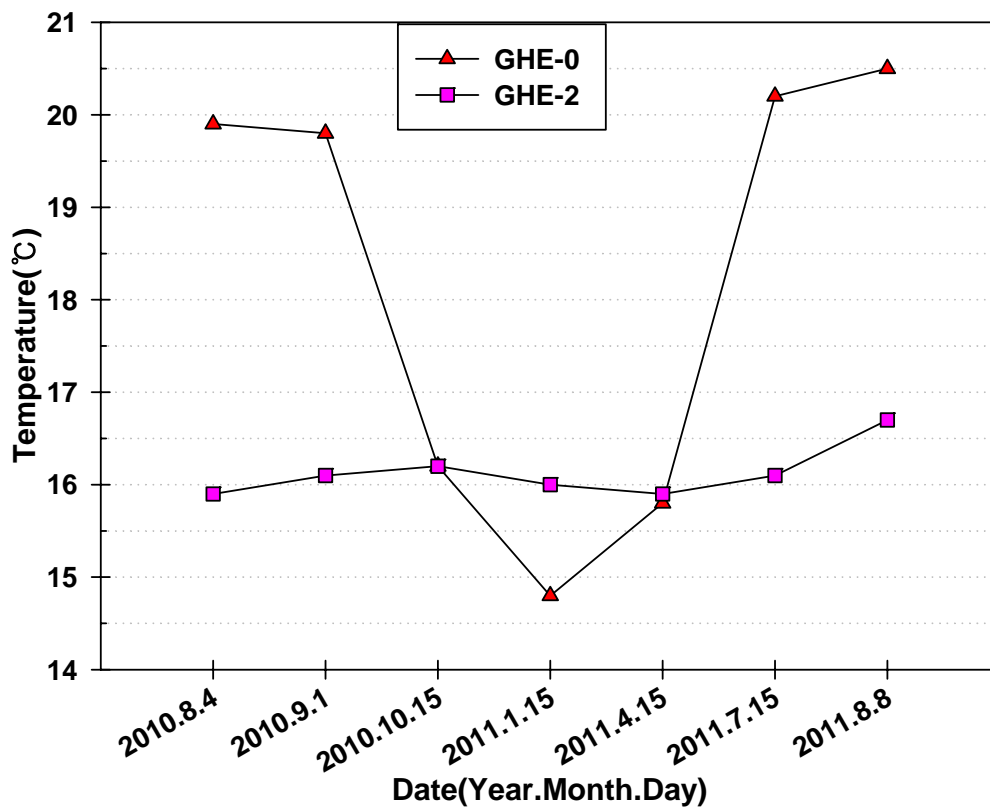


Fig. 35 Yearly relations of date and ground heat exchanger surface temperature with distances(2.0 m) from the ground heat exchanger

Fig. 36은 지중열교환기에서 수평방향으로 이격거리 1.5 m지점의 계절별 온도변화를 나타내었다. 지열히트펌프를 가동하여 냉방운전중 2010년 8월 4일의 지중온도는 16℃이며, 2010년 9월 1일 냉방부하가 낮아져 부분부하 운전시 지중온도는 16.3℃이다. 지열히트펌프 정지기간인 2010년 10월 15일 지중열교환기 온도하강에 따라 지중온도는 16.2℃이고, 난방운전중인 2011년 1월 15일 16℃로 하강한다. 2011년 4월 15일 15.9℃까지 하강되었다가 2011년 7월 15일 냉방운전으로 16.2℃로 상승하여 2011년 8월 8일 냉방운전시 16.8℃로 상승하였다.

2011년 8월 8일 이격거리 1.5 m지점의 지중온도는 1년 전의 지중온도보다 0.8℃ 상승하였다.

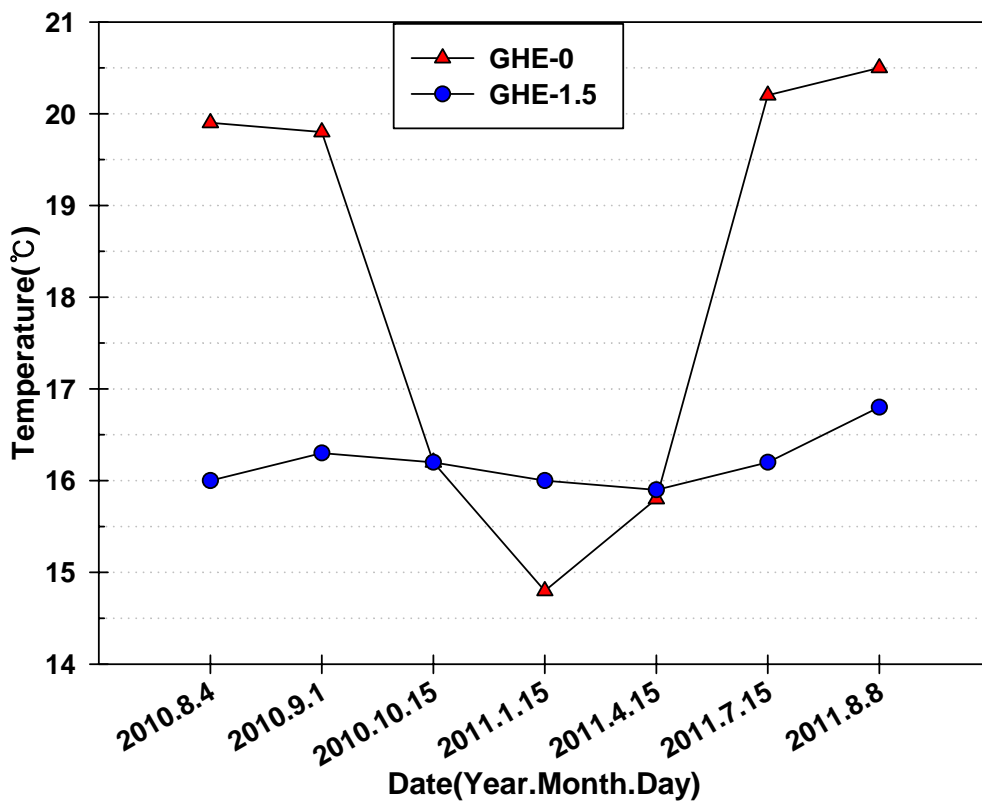


Fig. 36 Yearly relations of date and ground heat exchanger surface temperature with distances(1.5 m) from the ground heat exchanger

Fig. 37은 지중열교환기에서 수평방향으로 이격거리 1 m지점의 계절별 온도변화를 나타내었다. 지열히트펌프를 가동하여 냉방운전중 2010년 8월 4일의 지중온도는 16.1°C이며, 2010년 9월 1일 냉방부하가 낮아져 부분부하 운전시 지중온도는 16.6°C이다. 지열히트펌프 정지기간인 2010년 10월 15일 지중열교환기 온도하강에 따라 지중온도는 16.2°C이고, 난방운전중인 2011년 1월 15일 15.9°C로 하강한다. 2011년 4월 15일 15.8°C까지 하강되었다가 2011년 7월 15일 냉방운전으로 16.3°C로 상승하여 2011년 8월 8일 냉방운전시 16.9°C로 상승하였다.

2011년 8월 8일 이격거리 1 m지점의 지중온도는 1년 전의 지중온도보다 0.8°C 상승하였다.

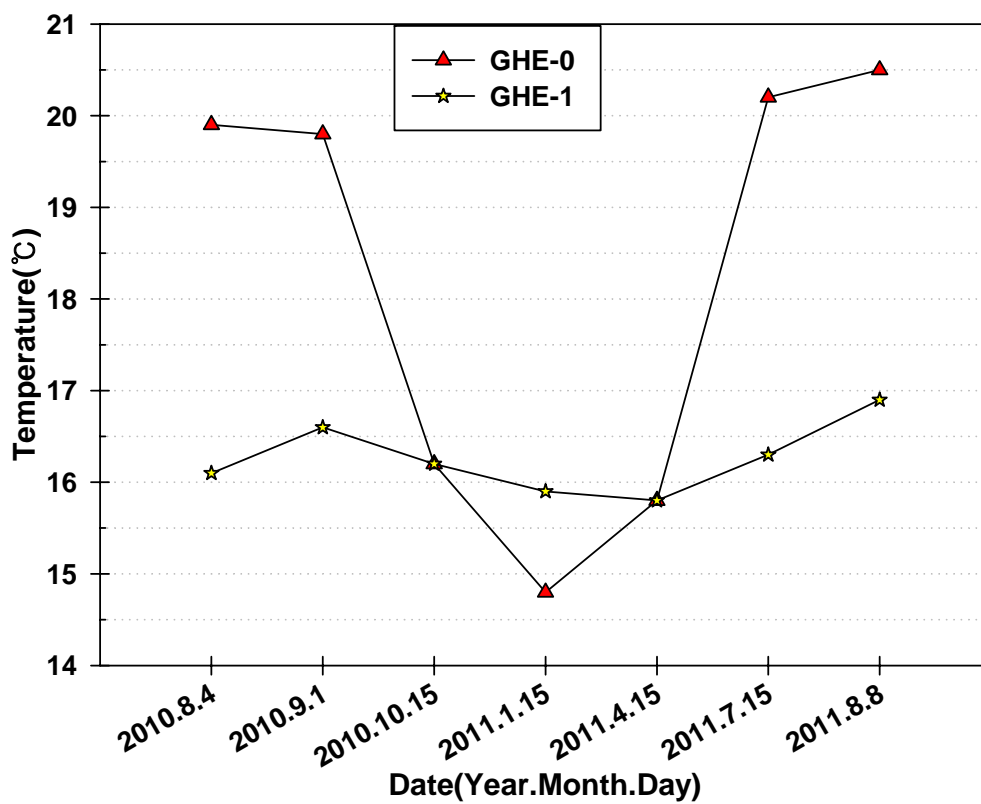


Fig. 37 Yearly relations of date and ground heat exchanger surface temperature with distances(1.0 m) from the ground heat exchanger

Fig. 38은 지중열교환기에서 수평방향으로 이격거리 0.5 m지점의 계절별 온도변화를 나타내었다. 지열히트펌프를 가동하여 냉방운전중 2010년 8월 4일의 지중온도는 16.6°C이며, 2010년 9월 1일 냉방부하가 낮아져 부분부하 운전시 지중온도는 16.8°C이다. 지열히트펌프 정지기간인 2010년 10월 15일 지중열교환기 온도하강에 따라 지중온도는 16.3°C이고, 난방운전중인 2011년 1월 15일 15.9°C로 하강한다. 2011년 4월 15일 15.9°C로 동일하였으며 2011년 7월 15일 냉방운전으로 16.8°C로 상승하여 2011년 8월 8일 냉방운전시 17.4°C로 상승하였다.

2011년 8월 8일 이격거리 0.5 m지점의 지중온도는 1년 전의 지중온도보다 0.8°C 상승하였다.

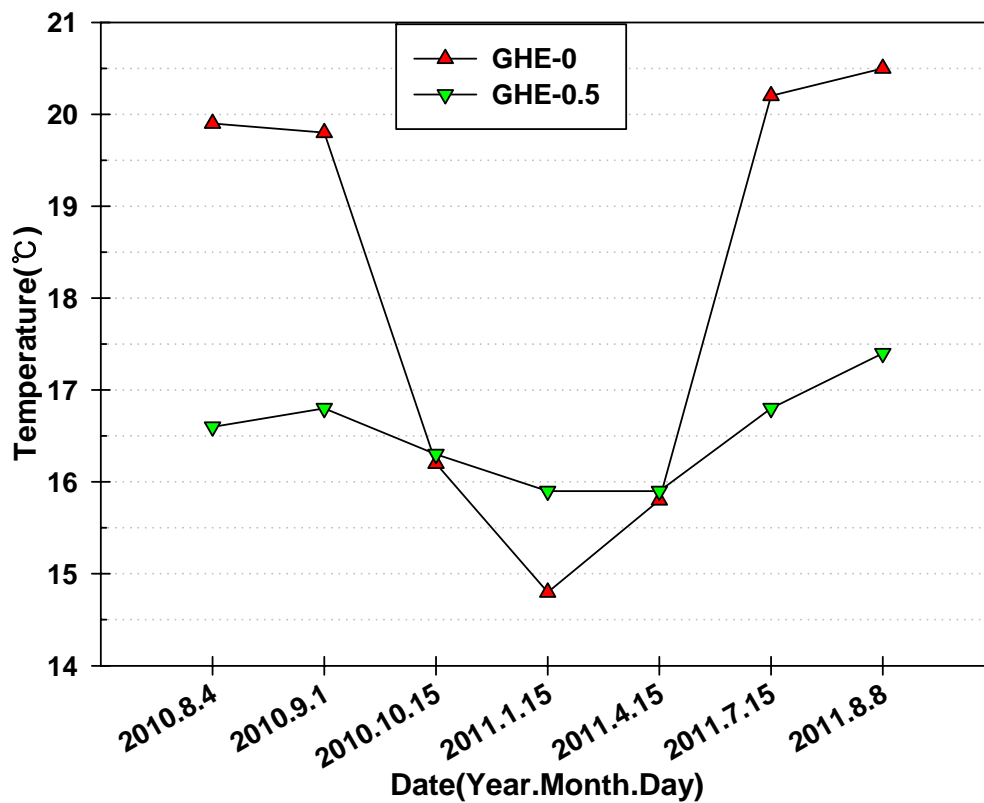


Fig. 38 Yearly relations of date and ground heat exchanger surface temperature with distances(0.5 m) from the ground heat exchanger

Fig. 39는 지중열교환기에서 수평방향으로 이격거리에 따른 각 지점의 계절별 지중 온도변화를 나타내었다. 지열히트펌프를 가동하고 여름철 냉방모드, 중간기 지열히트 펌프 정지시, 겨울철 난방모드 운전시 이격거리별 각 지점의 지중온도와 계절별 온도를 비교하였다.

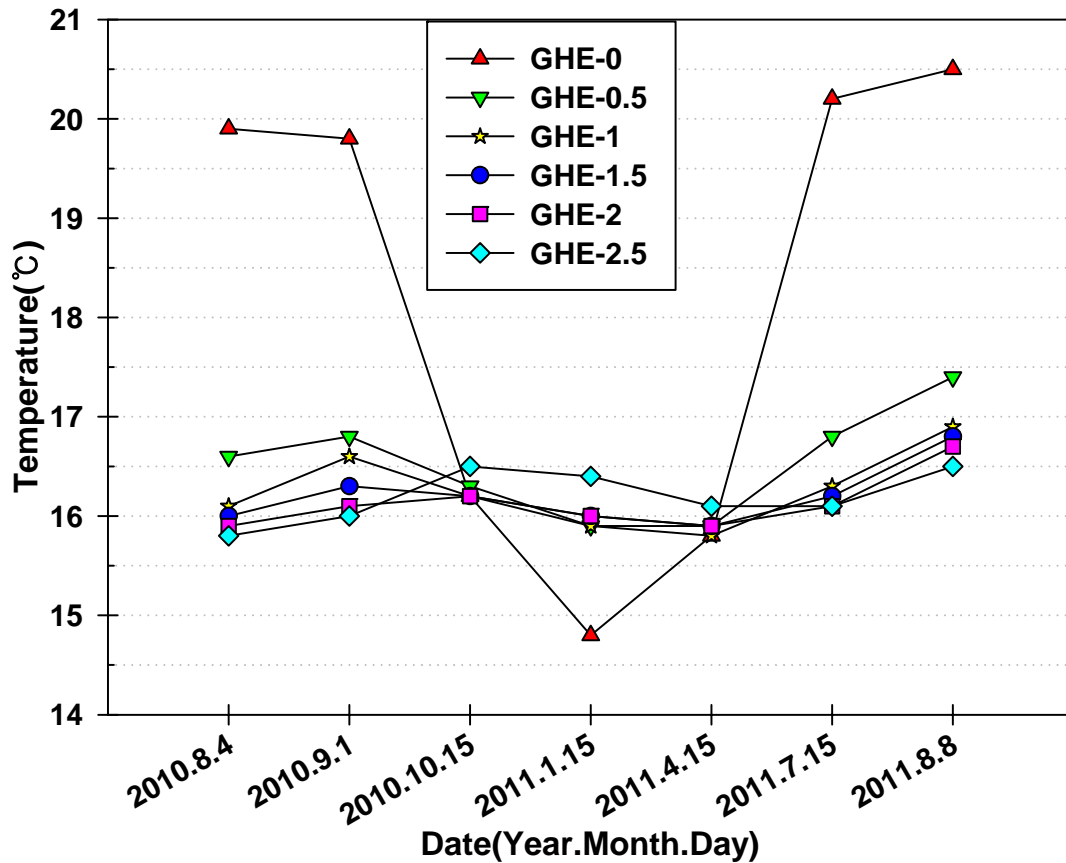


Fig. 39 Yearly relations of date and ground heat exchanger surface temperature with distances from the ground heat exchanger

냉방시(2010. 8. 4 ~ 2010. 9. 1) 지중열교환기 표면온도의 영향을 받아 각 지점의 온도가 상승하였으며 지중열교환기와 거리가 가까울수록 온도가 높았다. 2010년 10월 15일은 지중열교환기 표면온도가 하강하므로 인접지점의 지중온도는 하강하는데 2 m지점과 2.5 m지점의 지중온도는 상승하여 지중열교환기와 거리가 먼 지점은 지중열교환

기 온도의 영향이 늦게 나타나는 현상을 나타내었다.

난방기간인 2011년 1월 15일은 지중열교환기의 표면온도가 하강함에 따라 각 지점의 온도도 하강하여 지중열교환기와 거리가 가까울수록 온도가 낮아 냉방시와 온도는 반대로 나타났다.

각 지점의 지중온도는 2011년 4월 15일까지 하강하고 냉방의 영향으로 지중열교환기의 온도상승에 따라 각 지점의 지중온도도 상승하였다. 그러나 가장 원거리인 2.5 m 지점의 지중온도는 2011년 7월 15일 냉방기간 까지 온도가 동일하여 상승하는 지중열교환기 온도의 영향이 늦게 나타나는 현상을 나타내었다.

2011년 8월 8일의 지중 각 지점의 온도는 1년 전의 지중온도보다 각각 0.8℃ 상승하였다. 이는 여름철 냉방 가동율이 겨울철 난방 가동율보다 높아 나타난 것으로 판단된다.

4.4 순환수 위치에 따른 온도분포

4.4.1 냉방운전시 순환수 온도

Fig. 40은 냉방운전 시 외기온도의 변화에 따라 실내온도를 유지하기 위하여 지열히트펌프가 가동하고 있을때 가동상태에 따라 지열히트펌프 출구 순환수온도의 변화를 나타내었다.

순환수의 온도상승으로 히트펌프의 가동상태를 알 수 있다. 야간에 일부 거주실의 냉방을 위하여 6번 히트펌프(6HP)등 일부 히트펌프 장비가 야간에도 가동상태로 나타나는 것을 확인할 수 있고, 일과 시작시간부터 전체 히트펌프가 실내온도 제어를 위하여 실내온도를 감지하여 실내온도 변화에 따라 운전되어 오후 18시 이후부터 일부장비는 가동정지 상태이고 야간에 거주하는 존에 해당하는 히트펌프만 계속 가동되고 있음을 나타내었다.

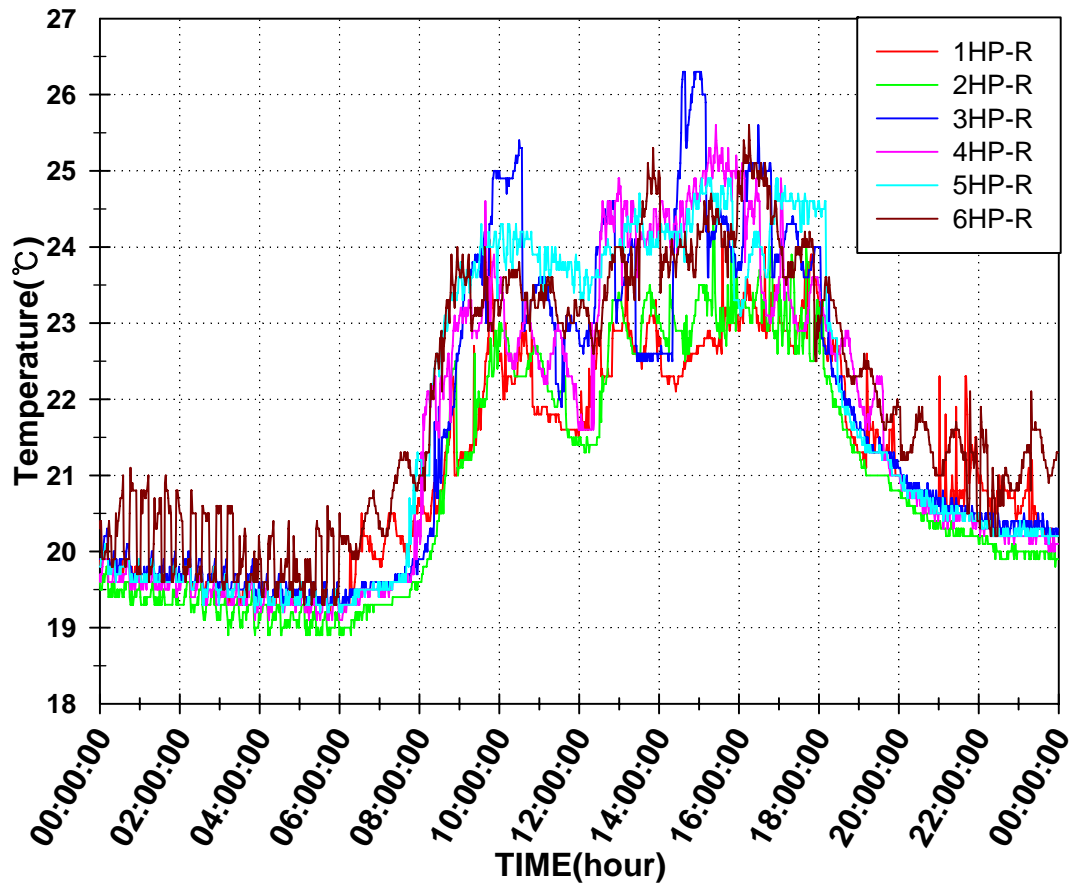


Fig. 40 Relations of time and outlet temperature of GSHP under cooling conditions (2011.8.3.)

Fig. 41과 Fig. 42는 냉방시 순환수의 위치에 따른 온도를 시간에 따라 나타낸다. 냉방운전시 히트펌프의 응축기에서 냉매가 응축되며 발생된 열을 지열순환수와 열교환하여 온도가 높아진 지열순환수는 히트펌프의 응축기를 나와 지중열교환기 내부를 순환하며 지중으로 열을 방출한다.

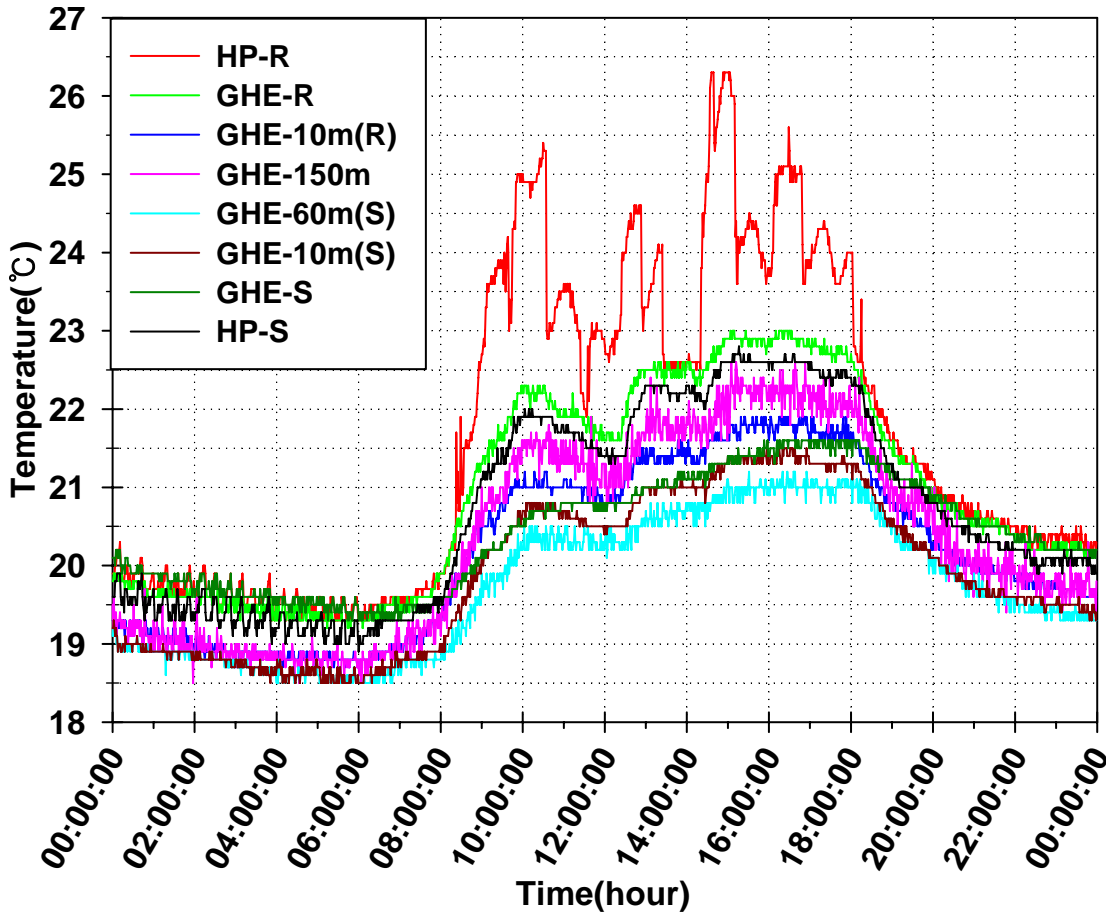


Fig. 41 Daily temperature circulating water, surface of the ground heat exchanger under cooling conditions (2011.8.3.)

순환수는 지중열교환기 내부를 지하 10 m, 60 m, 150 m까지 순환하며 지중과 열교환하여 순환수의 온도는 낮아진다. 지중열교환기의 깊이가 깊어질수록 지중과 열교환량이 증가하여 온도가 낮아지는 것을 알 수 있다. 지중 10 m에서 21.7℃를 나타내었으며 지중 150 m에서는 21.5℃로 구배가 완만해졌다. 이는 지온구배에 의한 지온상승을 때문으로 추정된다. 지중 150 m까지 순환하고 되돌아 나오는 지중 60 m에서는 20.8℃를 나타내었다. 낮아진 순환수는 트랜치 배관(GHE-S ~ B-S)을 지나면서 온도는 0.5℃ 상승하였다. 이는 트랜치 배관의 깊이가 1.5 m로 외기의 영향을 받아 열손실이 발생하여 온도가 미세하게 상승하였다. 그러므로 트랜치 배관에서는 열손실을 방지하기 위하여 단열조치가 필요할 것으로 판단된다.

지열히트펌프 입·출구 온도차는 4℃로 나타났다.

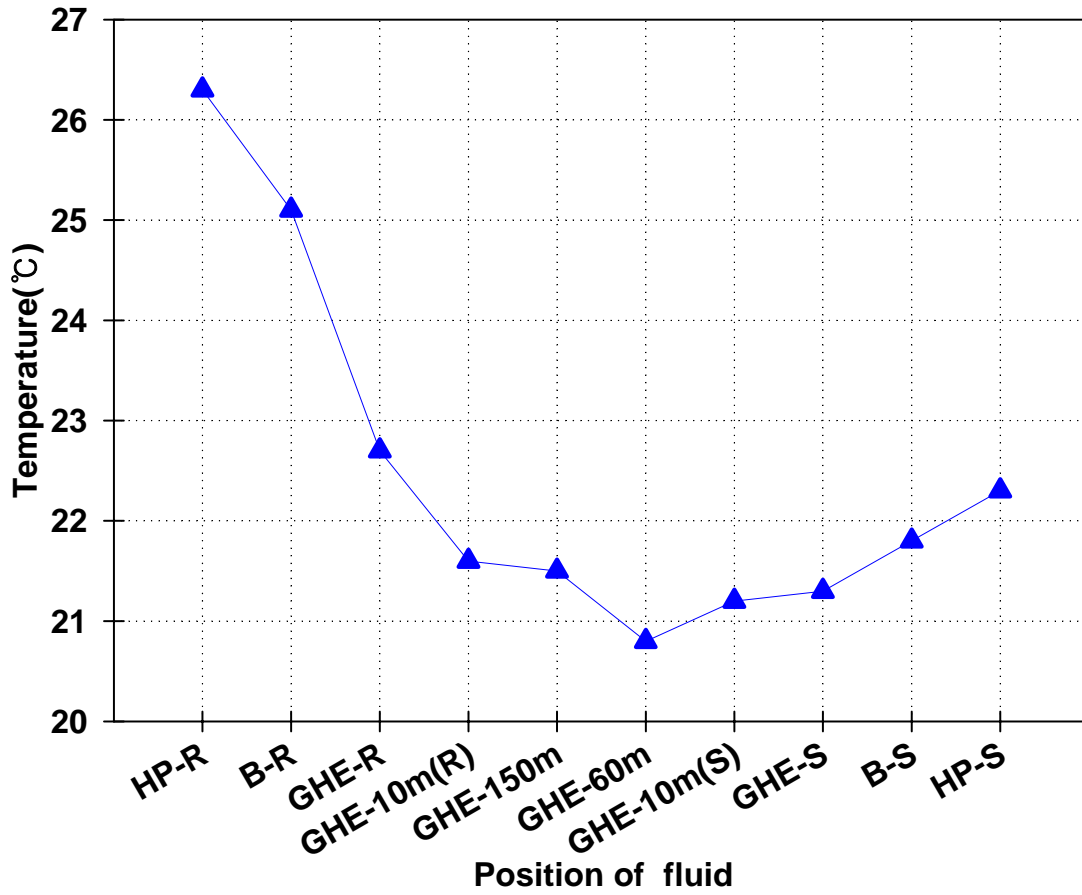


Fig. 42 Relations of positions and temperature of circulating water from the ground heat exchanger under cooling conditions (2011.8.3. 14:36)

4.4.2 난방운전시 순환수 온도

Fig. 43은 냉방시 외기온도에 따라 실내온도를 제어하기 위하여 지열히트펌프의 가동상태에 따라 지열히트펌프 출구 순환수온도의 변화를 나타내었다.

야간에 지열히트펌프가 가동 중단된 상태로 유지되고 있으나 기계실 내부 온도가 하강함에 따라 지열히트펌프 출구 온도가 하강하고 있다가 지열히트펌프의 가동과 순환펌프의 가동으로 출구 순환수 온도는 상승하였다가 하강한다.

순환펌프의 가동으로 온도가 일시적으로 상승하는 현상은 지중의 순환수의 온도가 외부 기계실 온도보다 높기 때문에 일시적으로 상승하였다가 지열히트펌프 증발기의 온도하강으로 지열히트펌프 출구온도는 하강하기 시작한다.

일과 시작시간부터 전체 히트펌프가 실내온도 제어를 위하여 실내온도를 감지하여 실내온도 변화에 따라 운전되어 오후 21시 이후부터 일부장비는 가동정지 상태이고 23시 이후에는 모든 지열히트펌프가 가동정지 상태에 있음을 나타낸다.

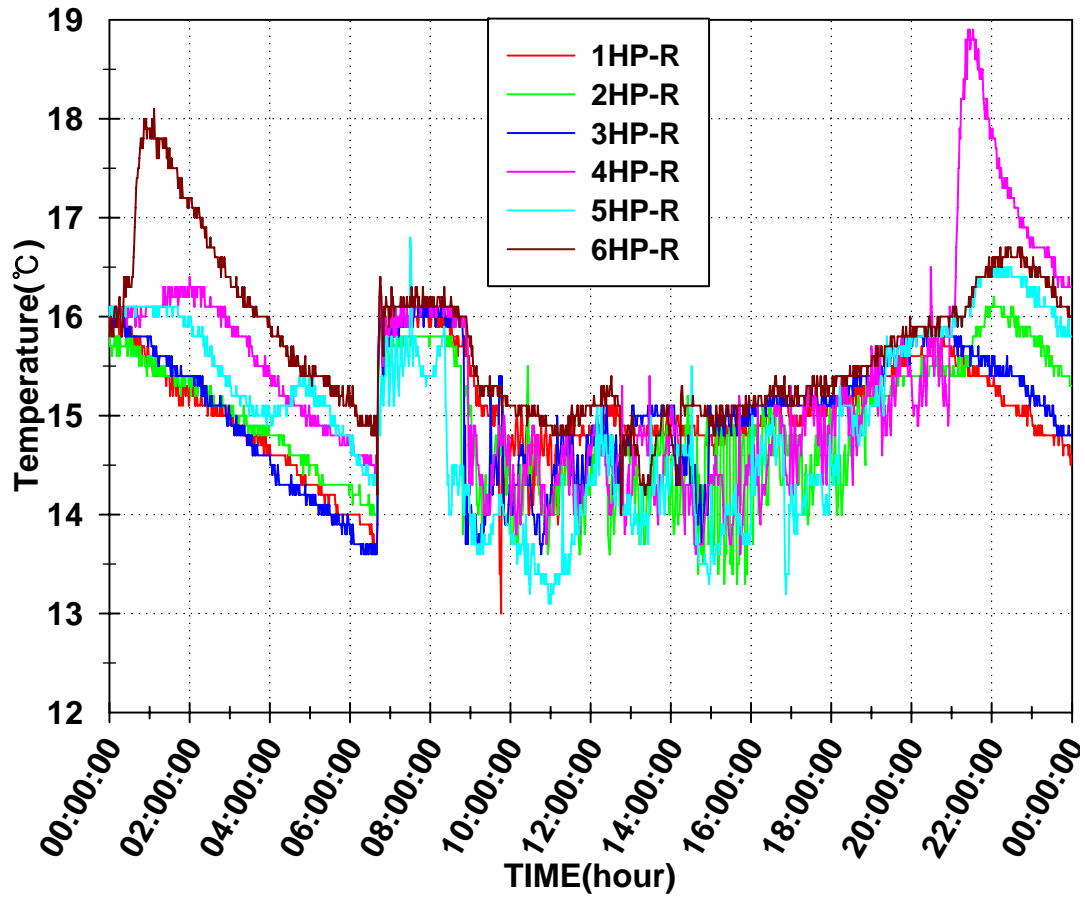


Fig. 43 Relations of time and outlet temperature of GSHP under heating conditions (2011.1.18.)

Fig. 44와 Fig. 45는 겨울철 난방운전 시 순환수 위치별 지중열교환기 표면의 온도 변화를 시간에 따라 나타낸다.

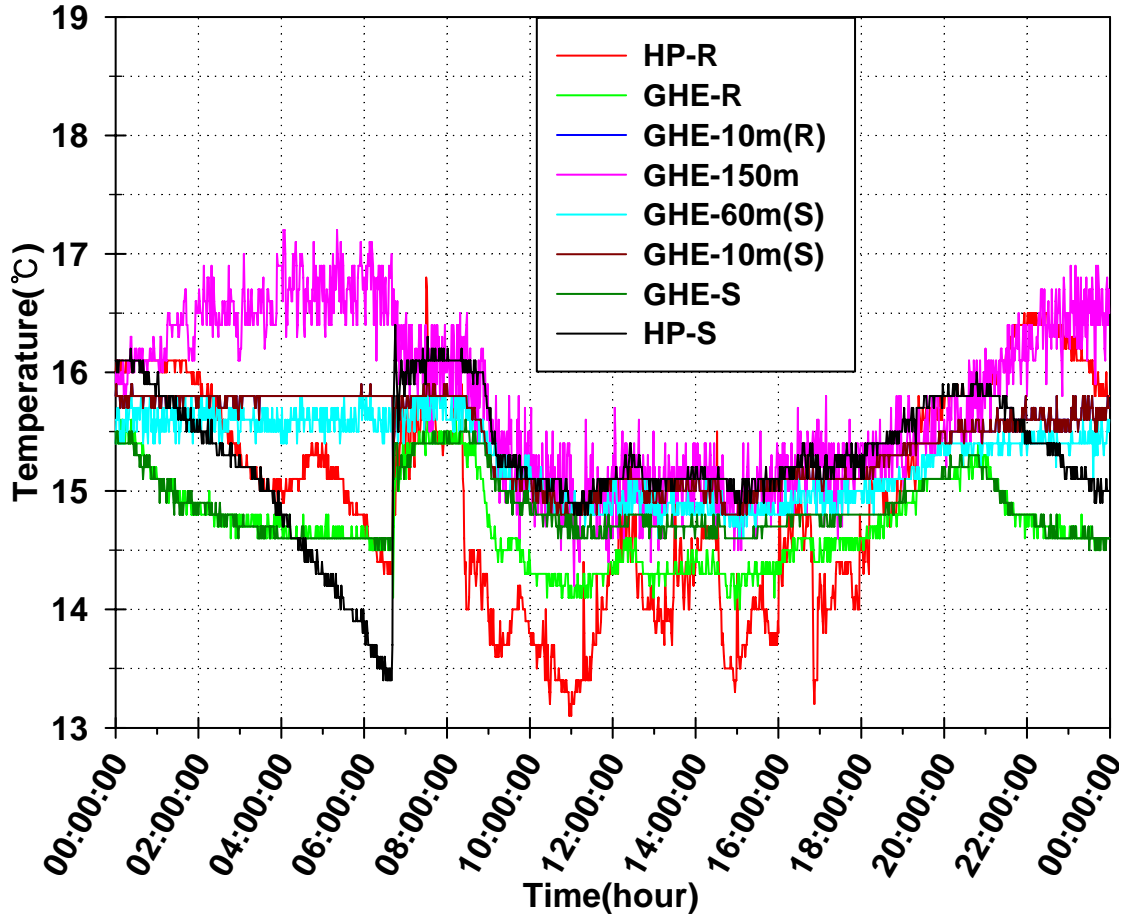


Fig. 44 Daily temperature circulating water, surface of the ground heat exchanger under heating conditions (2011.1.18.)

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

지열순환수는 지중열교환기 내부를 순환하면서 지중과 열교환작용을 하여 순환수의 온도는 상승한다. 지중열교환기의 온도는 150 m에서 15.4℃까지 증가하다가 지중 60 m에서 15.2℃로 내려가며 깊이가 낮아질수록 온도가 내려간다. 실내로 들어가며 0.5℃ 상승하였다. 온도가 상승된 순환수는 트랜치 배관(GHE-S ~ B-S)에서 히트펌프 입구까지 지나면서 온도가 하강하였다. 이는 트랜치 배관의 깊이가 1.5 m이므로 외기온도의 영향을 받아 열손실이 발생하는 것으로 추정된다.

따라서 트랜치 배관은 지표면아래 2 m이상에 설치하거나 단열 처리하는 것이 타당하다고 판단된다.

지열히트펌프 입·출구 온도차는 1.8℃이었다.

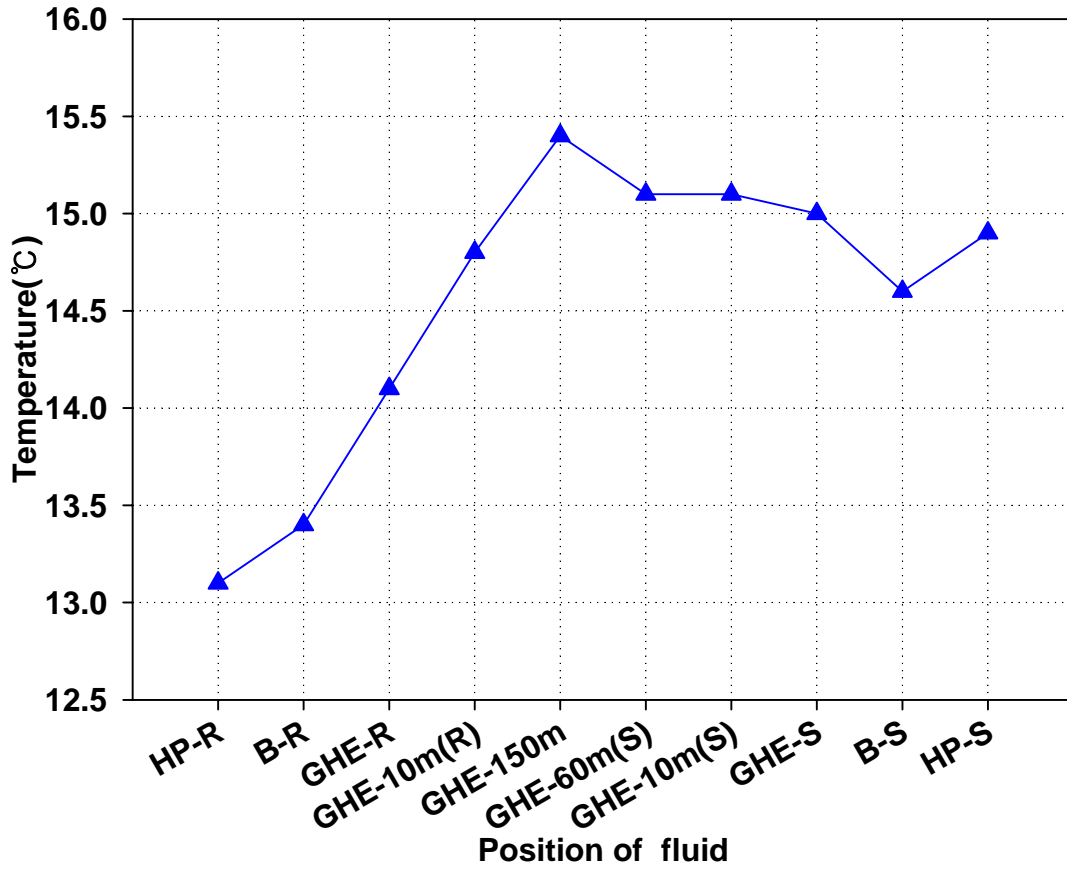


Fig. 45 Relations of positions and temperature of circulating water from the ground heat exchanger under heating conditions (2011.1.18. 15:16)

제 5 장 결 론

수직형 지중열교환기의 열확산특성을 분석하여 최적의 설계를 하기 위하여 지중 열응답 시험을 실시하여 지중 열전도도를 산출하였으며, 연간 계절에 따른 외기온도 변화와 지표면 아래 지중깊이에 따른 각각 지점의 온도변화를 측정하여 분석하였고, 지열원 히트펌프 시스템을 실제 건물에서 가동하는 실험적 장치를 통하여 지표면 아래 지중에서 지중열교환기의 보어홀 반경방향으로 열전대를 설치하여 지열원 히트펌프 시스템을 가동할 때 이격거리에 따른 온도변화를 측정하여 열확산특성을 분석하였으며, 또한 지열원 히트펌프 시스템 가동 시 지중열교환기 순환수의 위치에 따른 온도변화를 측정하고 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 열응답 시험에서 지중 토양의 초기온도를 50분 동안 가열 없이 측정한 결과 순환수의 입·출구의 온도차가 없고, 온도변화도 없는 16.6℃로 나타내었다.
- 2) 열응답 시험의 평균온도변화 곡선에 대하여 대수시간(Logarithmic time)의 기울기방정식은 $Y = 1.8061X + 16.6449$ 이며 지중열전도도 값을 구하기 위한 기울기(Slope) 값은 1.81로 나타났다.
- 3) 지중 열전도도를 측정하기 위해 지중 열교환기의 입·출구 온도 변화를 측정하였고, 선형열원 모델(Line-source model)을 이용한 지중열전도도 값은 2.65 W/m·K이었다.
- 4) 지중깊이 1 m와 2 m사이에서 지중온도에 대한 외기의 영향은 크게 감소하였으며 지중 10 m이하에서는 영향을 거의 받지 않았다.
- 5) 지표면 아래 20 m지점의 연간 평균온도는 16.4℃를 나타냈으며 지표면 아래로 깊을수록 외기온도의 영향을 적게 받고 온도변화의 영향이 늦게 나타나는 시간지연(Time lag)을 나타내었다.

- 6) 트랜치 배관의 깊이는 지표면아래 2 m이상에서 외기에 의한 영향을 거의 받지 않으며 그 이하에서는 단열처리가 필요하다.
- 7) 지중 10 m에서 이격거리가 0.5 m이상일 때 연중 온도변화는 1.6℃ 이하이며 2.5 m지점에서의 온도변화는 0.1℃이었다.
- 8) 지중열교환기 보어홀의 간격이 5 m이상이면 인접 지중열교환기의 영향이 미치지 않는다.

REFERENCES

1. Kong, H. J., Kang, S. J., Yun, K. S., An Experimental Study on the Cooling and Heating Performance of a Residential Ground Source Heat Pump System, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 25, No. 3, pp. 156-163, 2013.
2. Kang, B., Cho, H. H., Simulation of Performance in a Solar-Geothermal Hybrid R22 Heat Pump System with Operating Conditions, Proceedings of the SAREK, Winter Annual Conference. pp. 463-466, 2012.
3. Nam, Y. J., Study on the Optimum Design of a Heat Pump System Using Solar and Ground Heat, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 24, No. 6, pp. 509-514, 2012.
4. Kang, S. J., Kong, H. J., Y, K. S., Lim, H. J., An Experimental Study of Cooling Performance for Residential Ground Source Heat Pump System, Proceedings of the SAREK, Winter Annual Conference. pp. 377-382, 2011.
5. 임효재, 지열시스템의 방식별 특성 비교, Journal of the KARSE, 제23권 제3호 (통권 258), pp. 60-70, 2006년 3월.
6. Woo. S. W., Hwang, K. I., Kim, J. H., Shin, S. H., 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
7. Koo, K. M., Jeong, Y. M., Hwang, 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.
8. 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.
9. 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.
 10. 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.
 11. 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.
 12. Choi, J. M., Lim, H. J., Kang, S. H., Moon, J. M., Kim, R. H., 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
 13. 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.
 14. Sohn, B. H., Choi, J. M., Choi, H. S., Performance Simulation of Ground-Coupled Heat Pump(GCHP) System for a Detached House, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 23, No. 6, pp. 392-399, 2011.
 15. Sohn, B. H., Performance Analysis of Ground-Coupled Heat Pump System with Slinky-Type Horizontal Ground Heat Exchanger, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 24, No. 3, pp. 230-239,

2012.

16. Park, Y. J., Kang, S. H., Experimental Study on the Earth Temperature of GSHPs with Horizontally-Trenched GHEXs, Proceedings of the SAREK Summer Annual Conference. pp. 765-766, 2012.
17. Ko, I. S., Lee, J. S., Park, H. H., Kim, Y. C., Experimental study on the dynamic characteristics of a hybrid ground source heat pump, Proceedings of the SAREK, Winter Annual Conference. pp. 3-8, 2012.
18. Chae, H. B., Nam, Y. J., Study on the method to predict the heat exchange rate of horizontal ground heat pump system using underground heat transfer analysis model, Proceedings of the SAREK, Winter Annual Conference. pp. 399-402, 2012.
19. Nam, Y. J., Numerical Analysis for the Effect of Ground and Groundwater Conditions on the Performance of Ground Source Heat Pump Systems, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 321-326, 2011.
20. Kim, C. W., Kim, B. K., Lee, P. G., Lim, H. J., Kang, S. H., Choi, J. M., Verification Experiment of a Water-to-air Ground Source Multi-heat Pump System, Transactions of the Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 6, No. 1, pp. 9-16, 2010.
21. 2011년 신·재생에너지 보급통계, 에너지관리공단 신·재생에너지센터, pp. 8-15, 2012년 12월
22. Lee, T. J., Shim, B. O., Song Y. H., Monitoring of Subsurface Temperature Variation as Geothermal Utilization, Transactions of the Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 6, No. 1, pp. 29-35, 2010.
23. Lee, J. Y., Chung, J. T., Woo, J. S., Choi, J. M., Influence of the Secondary Fluid Flow Rate on the Performance of a GSHP System, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 22, No. 10, pp.

649-656, 2010.

24. Kong, H. J., Lim, H. J., Choi, J. H., Sohn, B. H., An Experimental Study on the Effect of Ground Heat Exchanger to the Overall Thermal Conductivity, Proceedings of the SAREK Summer Annual Conference. pp. 0045-0051, 2009.
25. 송윤호, 전 세계 지열에너지 자원 활용의 현황 및 전망, Journal of the KARSE, 제23권 제3호 (통권 258), pp. 34-44, 2006년 3월.
26. 조정식, 수직형 지중 열교환기를 이용한 냉난방 시스템 운전에 따른 지중온도 분포, 지열에너지저널, 제3권 제2호, pp. 3-10, 2007년 12월.
27. 김승욱, 지열 냉난방 시스템 소개, Journal of the KARSE, 제26권 제10호(통권 301), pp. 32-45, 2009년 10월.
28. 한정상, 한규상, 한혁상, 한찬, 지열펌프 냉난방 시스템, 도서출판 한림원 pp 4.9-4.15, 2005년.
29. Kim, Y. K., Jo, J. S., Lee, T. W., Lee, D. H., Sohn, B. H., Long-term Variations of Ground Temperature in a Medium Sized Geothermal Heating and Cooling system, Proceedings of the SAREK Summer Annual Conference. pp. 758-761, 2012.
30. 우정선 외, 현지 지중열전도도 측정 기술, 지식경제부, 2008년 5월
31. 김성수, 지열에너지를 이용한 히트펌프 시스템에 관한 연구, 경상대학교 대학원 박사학위논문, 2010년.