설계조건 변화에 따른 지중열교환기 길이 변화 연구

박종일[†], 박경순
동의대학교 건축설비공학과

Study on Capacity Alteration of Geothermal Heat Exchanger by Changing
Design Condition

Jong Il Park[†], Kyung Soon Park

Department of Building System Engineering Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea

Abstract

A ground loop heat exchanger for the ground source heat pump system is the important equipment determining the thermal performance and initial cost of the system. The length and performance of the underground heat exchanger is dependent on ground thermal conductivity, operation hours, ground loop diameter, grout, ground loop arrangement, pipe placement and design temperature. In this study we find out heat exchanger length with various design factor

Key words: Ground loop design simulation (GLD시뮬레이션), Geothermal heat exchanger (지중열교환기), Geothermal system (지열시스템), Design condition (설계조건)

1. 서론

기호 설명

EST : 히트펌프 인입 열원수 온도[°C]

ELT : 히트펌프 인입 냉원수 온도[°C]

1.1 연구배경 및 목적

최근 유가상승에 의한 에너지비용 증가에 따라 신재생에너지가 많이 보급되면서 친환경적인 측면 뿐 만아니라 경제적인 측면이 많이 고려되고 있다.

지열 냉난방 시스템은 크게 지중열교환기와 히트펌프 및 배관설비로 구성된다. 이 중 지중열교환기는 시스템 설치비의 절반을 차지하며 지열 냉난방 시스템 효율에 지대한 영향을 미치므로 지열 시스템 설계에 가장 중요한 부분이다.

현재 지중열교환기에 대한 연구는 많이 진행되었으나 설계변수들에 따른 지중열교환기 길이에

[†] Corresponding author

Tel.: +82-51-890-1985 ; fax: +82-51-890-1625

E-mail address: jipark@deu.ac.kr

접수일 : 2013년 10월 7일

심사일 : 1차:2013년 10월 25일, 2차:2013년11월 8일

채택일 : 2013년 11월 12일

대한 전반적인 내용은 많이 부족한 실정이다.

이전 연구에서는 일반적인 설계범위 중에서 시스템 운전시간과 지중순환수 온도에 따른 용량변화 연구가 진행된 적이 있으나[1][2], 본 연구에서는 지중열전도도, 보어홀 열저항, 지중초기온도, 파이프의 관경, 시추공내 파이프의 위치, 실리카샌드의 질량분율, 보어홀 간의 이격거리와 시추공 배열방식의 변화에 의하여 얻어지는 지중열교환기 길이의 변화정도를 GLD시뮬레이션을 이용하여 분석하여, 지열시스템의 열교환기 길이와 설계조건의 상관관계의 기초자료를 제공하고 고찰하는 것에 목적이 있다.

1.2 연구범위 및 방법

본 연구는 지열시스템이 적용된 기준 모델 건물을 설정하고 이에 대하여 지중열교환기 설계에 관련된 지중열전도도, 보어홀열저항, 지중초기온도, 실리카샌드의 질량분율, 보어홀 간의 이격거리 등을 GLD프로그램을 이용해 변수를 적용하여 열교환기 기준길이에서 변화되는 열교환기의 길이변화를 그래프로 나타내었다.

연구를 수행하기 위하여 가정한 모델건물은 2011년도부터 2012년까지의 지열시스템이 시공된 대상건물의 지중초기온도, 지중열전도도, 보어홀 저항 등을 범위에 따른 도수분포표를 활용하여, 가장 일반적인 기준을 정하고, 각각의 설계변수의 시뮬레이션 적용 범위를 선정하였다. 또한 이 논문에서는 냉방용 열교환기 길이의 변화를 중심으로 고찰하였다.

2. GLD 시뮬레이션

2.1 기준모델설계조건

기준모델건물의 설계조건은 이전 연구에서 350 kW 용량을 적용한 사례가 있으나[1], 본 연구에서의 건축물 사용 조건은 냉방기준 하절기 최대 부하 450 kW 주 5일 사용 1일 부하시간 10시간으로 하였다. 히트펌프 설정조건은 냉방 EST 30℃, ELT 12℃, 난방 EST 5℃, ELT 40℃를 적용하였

다. 그 외에 지열시스템 설계에 적용된 기준은 전체 조사된 71개의 지열시스템 설계 자료를 통계 분석하여 평균값을 찾은 후 이를 적용하였다. 유량 12.1 (L/min)/3.5 kW, 부동액 에탄올 10% 수용액, 비열 4.138 kJ/(kg·K), 밀도 999.6 kg/m³, 토질에 관한 설계기준은 지중온도 15.8℃, 지중열전도도 2.66 W/m·K, 열 분산 0.128 m²/day, 모델링 기간은 20년으로 적용하였다.

지중열교환기의 설계 기준은 보어홀 열 저항 0.156 m·K/W, 관경 37.5 mm, Type-SDR11, 보어홀 구경은 150 mm, 보어홀 내의 파이프는 싱글 타입으로 튜브간의 거리는 보통으로 설계하였다. 보어홀은 4행 10열로 40 개소로 장방형 배치하였으며, 시추공간의 거리는 6m로 설정하였다.

위 내용의 기준설계의 결과 GLD시뮬레이션을 실행하였을 때 열교환기의 길이는 냉방은 9473m로 계산되었다.

3. 시뮬레이션 결과

3.1 지중열전도도의 영향

지중열전도도는 지열시스템이 설계되는 지역에 따라 변화되는 요소 중 토양의 구성상태에 따라 열전도도의 크기가 달라지며 열전도도가 높을수록 지열시스템의 회복속도와 능력도 상승하게 된다[2]. 그러므로 건물의 냉난방부하에 대응하기 위한 지중 열교환기 적정규모를 결정하기 위해서는 지중 열교환기가 설치되는 현장의 열전도율을 파악하는 것이 중요하다.

시뮬레이션에는 지중열전도도의 변화에 따른 지중열교환기 길이의 변화를 확인하기 위하여 기준설계조건 2.66 W/m·K에서 최소 1.5 W/m·K 최대 6 W/m·K 까지의 범위를 10등분하여 지중열전도도 0.5 W/m·K 변화 할 때마다 열교환기 길이의 변화를 계산하였다.

시뮬레이션결과 Fig. 1과 같이 지중열교환기의 변화가 나타났으며, 지중열전도도가 낮을수록 열교환기의 필요길이가 급격하게 늘어나고 지중 열전도도가 높아질수록 그에 따라 열교환기의 길이도 작아졌다.

3.2 보어홀 열저항의 영향

열교환기용량은 그라우트의 종류, 열전달성능, 파이프의 관경과 위치에 따라 현저하게 달라질 수 있다[3][5]. 보어홀 열 저항의 범위를 $0.1 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$ 에서 $0.4 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$ 까지 $0.02 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$ 의 간격으로 시뮬레이션을 실시하여 열교환기의 길이를 측정된 결과 Fig. 2와 같이 냉방과 난방의 열교환기 길이가 일정한 비율로 상승함을 알 수 있었다. 냉방의 경우 보어홀 열 저항 $0.02 \text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$ 증가 마다 총길이 9473 m의 7.17%, 679.2 m 증가 하였으며 난방은 총길이 2647 m의 9.3%, 246.2 m 증가 하였다.

3.3 지중초기온도의 영향

지중 초기온도는 기준설계조건 15.8°C 에서 냉방, 난방의 열교환기의 길이를 100%라 하였을 때, 냉방시에는 지중온도 0.5°C 변화 시 마다 열교환기 변화율은 평균 3.2% 열교환기 길이가 증가하였으며, 난방 시 열교환기 길이는 냉방과 반대로 지중에서 취득할 수 있는 열량이 많아지므로 열교환기 길이가 감소하며, 그 변화량은 0.5°C 당 난방 기준 설계길이의 평균 4%의 열교환기 길이가 감소하였다.

3.4 파이프관경의 영향

일반적으로 지중열교환기의 깊이가 150m에서

Fig. 1 Change of heat exchanger length by thermal conductivity

200m로 증가되면 순환수의 마찰손실수두를 감소시키기 위하여 지중열교환기 파이프의 관경을 30 A에서 40A로 변경한다.

이러한 지중열교환기 파이프의 관경의 변경은 보어홀 열저항에 영향을 주어 열교환기길이 변화가 발생한다.

시뮬레이션은 파이프 관경 20 mm, 25 mm, 32 mm, 37.5 mm의 4가지 종류의 배관으로 시뮬레이션을 시행하였으며 파이프관경 변화시의 유속변화는 고려하지 않았다. 관경 20 mm에 따른 지중열교환기의 길이는 기준길이의 3.3%, 25 mm는 2.2%, 32 mm는 1.1%의 열교환기 길이의 변화를 보임으로서 관경이 증가함에 따라 1.1%의 지중열교환기 길이의 변화를 보였다.

일반적으로 관경이 커짐에 따라 열 교환 면적이 증가하고 보어홀 열 저항의 감소로 인해 지중열교환기 길이가 짧아지는데, 이 시뮬레이션에는 적용되지 않았지만 일반적으로 지중열교환기의 깊이가 깊어짐에 따라 암반층의 비율이 높아져 지중열전도도가 증가하므로 Fig. 4에서의 열교환기 길이보다 더 감소할 수 있다[4].

3.5 보어홀 내 파이프의 위치에 따른 영향

지중열교환기 설치시 보어홀 내의 파이프는 U자 형태로 설치되며 인입구와 토출구로 구성되어 있다. 시뮬레이션에는 일반적인 사항을 고려하여 시추공 내 U-tube를 하나로 하였을 경우를 기준으로 하였다. 시추공 단면을 보았을 경우 Fig. 5

Fig. 2 Change of heat exchanger length by bore hole heat resistance

Fig. 3 Change of heat exchanger length by underground temperature

Fig. 4 Change of heat exchanger length by pipe diameter

Fig. 5 Pipe placement in bore hole

와 같이 파이프간의 간격이 가까운 정도에 따라 근접, 보통, 벽에 밀착의 순으로 나타낼 수 있으며, 시추공 내에는 파이프간의 열 간섭으로 인해 파이프와 지중간의 열 교환에 방해가 하게 된다.

결국 단계마다 파이프간의 거리가 멀어질 수록 열저항이 약 0.014 m·K/W 정도 차이가 나게 되는데 근접과 벽에 밀착의 차이는 Fig. 6에서와 같이 모델건물에서 열교환기 길이가 1000 m의 차이가 나는 것을 알 수 있으므로 보어홀 내의 파이프간의 거리는 열 교환 성능의 중요한 인자 중 하나이며 그러므로 지열시스템 시공 시 불합리한 조건이 아닌 이상 보어홀 내의 파이프의 위치는 최대한 파이프간의 간격을 이격하여 지중과 파이프

프간의 열 저항을 줄이는 것이 열교환기 길이를 줄일 수 있음을 알 수 있다.

3.6 실리카샌드 질량분율에 따른 영향

시추공 내에는 지중의 열에너지가 보어홀벽을 통과하여 U-tube에 도달하기 위해 시추공 내를 그라우트로 채우는데 그라우트의 구성은 물, 벤토나이트 외에 지중열교환기와 지중 열 간의 열전달 성능을 높이기 위해 실리카샌드를 혼합하여 그라우팅을 한다[6].

시뮬레이션에서는 실리카샌드의 종류 중 현재 국내 지열시스템 설계사무소에서 일반적으로 사용되는 그라우트 중 가장 열전도도가 높은 Volcay grout를 기준으로 벤토나이트가 30%일 때 실리카 샌드의 질량분율을 0 ~ 50%까지 5%의 비율로 증가시켜 그라우트의 열전도율을 변화하며 시뮬레이션 실시하여 지중열교환기의 변화를 Fig. 7에 나타내었다.

실리카샌드의 질량 분율이 5% 증가시 Fig. 7과 같은 열교환기 길이변화를 보였으며, 보어홀 내의 열저항이 평균 0.007 m·K/W의 감소하며 열교환기 길이가 총길이의 평균 2.5%의 변화를 보였다.

3.7 보어홀 간의 배열 및 이격거리의 영향

지중에서 지열시스템의 냉방과 난방의 가동시 각각의 보어홀에서 열을 방사하거나 흡열을 하기 때문에 보어홀 간의 거리와 밀집도는 열간섭에 의하여 열교환기의 길이에 영향을 미치게 된다. 이전 연구에서는 보어홀간의 이격거리 정도에 의한 열교환기 길이변화와 설치면적의 변화를 나타내었으며, 본 연구에서는 이격거리와 배열 방식을 바꾸므로써 4행 10열과 2행 20열의 배열을 비교하였다.

이격거리에 따른 열교환기 길이변화는 Fig. 8과 같이 이격거리 4 m에서 5 m로 변경될 경우, 길이차 325 m 총길이의 3.3% 감소의 변화를 보이며 4 m에서 6 m로 변경할 경우, 길이차 500 m 총길이의 5% 감소를 보였다. 이격거리와 배열방식을 모두 고려할 경우 최대 600 m, 약 6%의 차이

를 보였으며, 이것은 지중초기온도 0.5°C 변화 일 때 총길이의 평균 4% 변화, 실리카 샌드 질량분을 10% 증가시 총길이의 평균 5%의 변화보다 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 6 Change of heat exchanger length by pipe placement

Fig. 7 Change of heat exchanger length by silica sand

Fig. 8 Geothermal heat exchanger length by distance of bore hole.

4. 결론

본 연구에서는 일반적인 설계범위 중에서 설계 조건 변화에 따라 얻어지는 열교환기 길이의 변화정도를 알아냄으로서, 지열시스템의 열교환기와 설계조건 간의 상관관계를 도출하여 지열시스템 설계자에게 기초자료로 제공하는 것에 목적 두고 있으며 결론은 다음과 같다.

- (1) 지중열전도도 $0.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 변화 할 때 지중 열전도도가 낮을 수록 열교환기의 길이가 늘어나고 전도도가 높아질수록 그에 따라서 지중열교환기의 변화율도 줄어든다.
- (2) 보어홀 열 저항이 $0.02 \text{ m}\cdot\text{K/W}$ 증가시 총길이의 냉방은 7.2%, 난방은 총길이 9.3%의 증가를 나타내었다
- (3) 지중초기온도 0.5°C 마다 열교환기는 냉방의 경우 3.2%의 열교환기 길이가 증가하며 난방시 열교환기 길이는 냉방과 반대로 0.5°C 당 기준설계길이의 평균 4% 열교환기 길이가 감소한다.
- (4) 관경 40 mm 기준으로 20 mm로 설계시 지중열교환기의 길이는 기준길이의 3.3%, 25 mm는 2.2%, 32 mm는 1.1%의 열교환기 길이의 변화를 보임으로서 관경의 변경에 따라 1.1%의 열교환기 길이의 변화를 보였다.
- (5) 지중열교환기내 파이프 위치의 근접, 보통 벽에 밀착의 단계마다 파이프간의 거리가 멀어질 수 록 열 저항이 약 $0.014 \text{ m}\cdot\text{K/W}$ 이 감소하는데 근접과 벽에 밀착의 차이는 약 1000m 기준길이에 10%의 차이가 발생한다.
- (6) 실리카샌드의 질량 분율이 5% 증가 시, 보어홀 내의 열저항이 평균 $0.007 \text{ m}\cdot\text{K/W}$ 의 감소하며 열교환기 길이는 평균 2.5%의 변화를 보인다.
- (7) 배열에 의한 지중열교환기 길이변화는 모델 건물의 경우 이격거리 4 m 일 때 배열이 4 열에서 2열로 바뀌면서 약 300 m의 열교환기 길이 변화를 나타내었으며, 이격거리 5 m 일 때 150 m, 이격거리 6 m 일 때 100 m의 미소한 차이를 보였다.

이격거리에 따른 열교환기 길이변화는 이격거리 4 m에서 5 m 로 변경될 경우 3.3%의 변화를 보이며 4 m에서 6 m로 변경할 경우, 5%의 변화를 보였다.

이격거리와 배열방법을 모두 고려할 경우 최대 약 6%의 차이를 보였다.

후 기

본 논문은 2013년도 동의대학교 교내연구비 지원에 의해 연구된 논문임(2013AA120)

참고문헌

1. Kyoung Chon Min, and Jae Ho Choi, 2011, Effect of the Design Parameters of Geothermal Heat Exchanger Design Length, Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 7, No. 2, pp. 10-15
2. You Sun Jung, Kim Ju Young, Hong Won Hwa, and Ahn Chang Hwan, 2007, Research on the Temperature Recovery Time in Well of Geothermal System Using Standing Column Well in Case of Cooling, Proceedings of the SAREK Fall Annual Conference, pp. 285-288
3. Lim Hyo Jea, Kong Hyoungh Jin, Kang Sung Jea, and Choi Jea Ho, 2009, An Experimental Study on the Effect of Ground Heat Exchanger to the Overall Thermal Conductivity, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 23, No. 2, pp. 95-102
4. Cho Heuy Nam, Lee Dal Heui, and Jeong Gyo Cheol, 2012, Efficiency of Geothermal Energy Generation Assessed from Measurement of Deep Depth Geothermal Conductivity, The Journal of Engineering Geology, Vol. 22, No. 2, pp. 233-241
5. Lim Hyo Jea, Song Yoon Seok, Kong Hyoungh Jin, and Park Seong Koo, 2004, Thermal Conductivity Measurement of Various Grouting Materials for Geothermal Heat Exchanger, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering , Vol. 17, No. 4, pp.364-369
6. Byong hu Sohn, 2006, Thermal Conductivity Enhancement of Bentonite Grout Using Silica Sands, SAREK. Vol. 185, No. 6, pp. 493-500.