

설계변수가 수직밀폐형 지중열교환기 설계길이에 미치는 영향

민경천, 최재호[†]
코텍엔지니어링 기술연구소

Effect of the Design Parameters of Geothermal Heat Exchanger Design Length

Kyong Chon Min, Jae Ho Choi[†]
Engineering Research Center, KOTEC Engineering, Anyang 431-767, Korea

Abstract

A ground loop heat exchanger for the ground source heat pump system is the core equipment determining the thermal performance and initial cost of the system. The length and performance of the heat exchanger is dependent on the ground thermal conductivity, the operation hours, the ground loop diameter, the grout, the ground loop arrangement, the pipe placement and the design temperature. The result of this simulation shows that higher thermal conductivity of grouting materials leads to the decrease length of geothermal heat exchanger from 100.0 to 84.4%

Key words : Ground Thermal Conductivity(지중열전도도), Radial Pipe Placement(파이프 이격 거리), Geothermal Heat Exchanger(지중열교환기, GHEX)

기 호 설 명

- EST : 히트펌프 인입 열원수 온도 [°C]
- ELT : 히트펌프 인입 냉원수 온도 [°C]
- COP : 성적계수
- q : 천공 단위 m당 열이동량
- T_p : PE 파이프 외벽온도
- T_b : 수직 천공의 내벽온도
- R_b : 보어홀 열저항
- R_{pp} : PE 파이프의 열저항

R_g : 천공의 열저항

1. 서 론

우리나라는 총 에너지 사용량의 97%를 수입에 의존하며, OECD 국가 중 최하위 수준의 녹색경쟁력지수를 보이고 있다. 이에 정부는 2030년까지 총 에너지 사용량의 11%를 신재생에너지로 대체하기 위해 1,000 m² 이상의 공공건물에 예상에너지사용량의 10% 이상을 신재생에너지에 투자하는 설치의무화관련 법 이외에 다수의 법을 제정하고 이를 시행하고 있다.^[1]

근래 신재생에너지가 많이 보급되면서 친환경적인 측면 뿐만 아니라 경제적인 측면이 많이 고려되고 있다. 지열 냉난방 시스템은 신재생에너지 중 초기투자비가 가장 낮고 효율이 높기 때문에

[†] Corresponding author

Tel: +82-31-420-4677, Fax: +82-31-420-4678
E-mail: bestghp@chol.com
접수일 : 2011년 5월 4일
심사일 : 1차: 2011년5월12일, 2차: 2011년6월13일
채택일 : 2011년 7월 22일

많은 각광을 받고 있다.

지열 냉난방 시스템은 크게 지중열교환기와 히트펌프로 구성된다. 이 중 지중열교환기는 시스템 설치비의 절반을 차지할 뿐만 아니라 지열 냉난방 시스템 효율에 지대한 영향을 미치므로 지열 시스템 설계에 가장 중요한 부분이다.

지중열교환기에 대한 연구는^{[2][3]} 많이 진행되었으나 설계변수들에 따른 지중열교환기 설계 길이에 대한 전반적인 내용은 많이 부족한 실정이다.

본 연구에서는 지중열전도도, 시스템 운전시간, 지중열교환기 파이프의 관경 및 간격, 실리카샌드의 첨가, 지중열교환기 배열 및 지열 순환수 설계 온도 변화에 따른 지중열교환기 설계길이의 변화를 고찰하고자 한다.

2. 지중열교환기 설계프로그램

현재 국내에서는 에너지관리공단에서 인정하는 지중열교환기 설계프로그램을 사용하도록 되어있다. 이 중 GLD(Ground Loop Design)는 사용방법이 쉬울 뿐만 아니라 Average block loads 및 Zone manager 모듈을 이용하여 상세한 부하조건을 입력할 수 있고 수직밀폐형, 수평형 및 지표수 이용 지중열교환기 모듈을 제공하여 여러 가지 시스템에 적용이 용이하다. 아울러 부하, 운전조건, 히트펌프, 부동산, 지중온도, 지중열전도도, 지중열교환기 설치조건 및 배열 등 다수의 데이터 입력을 통해 지중열교환기의 장기적인 열적 영향 및 길이를 확인할 수 있어 이를 이용하여 시뮬레이션을 수행할 수 있다. 이 프로그램은 G-function을 이용해 길이를 계산하는 cylindrical source model 과 월별 온도변화를 시뮬레이션 할 수 있는 simple line source theory를 이용하며, 식은 다음과 같다.^[4]

$$T(r,t) - T_0 = \frac{Q/L}{k} G(z,p) \quad (1)$$

$$T(r,t) - T_0 = \frac{Q/L}{4\pi k} \int_x^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad (2)$$

3. 설계조건에 따른 지중열교환기의 길이 변화

3.1 기준 설계조건

지중열전도도, 운전시간, 그라우트, 천공배열, 지열순환수, 지중열교환기 파이프 및 간격의 변화에 따라 지중열교환기 길이의 변화를 확인하기 위해 기준 설계조건을 선정하고 이와 비교하여 설계조건 변화에 따른 지중열교환기 길이 변화를 확인하고자 한다.

기준 설계는 350 kw의 일반적인 오피스 건물의 냉난방 부하를(냉방 350 kw, 난방 145 kw) 기준으로 주 5일 10시간 근무조건을 모사하였다. 부하율은 한국전력의 축냉식 냉방 심야전력 기기 인정기준의 표준부하지수^[5]를 적용하였다. 히트펌프는 인증제품인 NXW-540 모델을 기준으로 하였으며, 설계온도는 냉방 EST 30℃, ELT 12℃, 난방 EST 5℃, ELT 40℃를 적용하였다. 유량은 11.4 LPM/RT, 부동산은 에틸알콜 20%로 비열 3.82 kJ/kgK, 밀도 972.4 kg/m³을 적용하였다. 지중 초기 온도는 15℃를 적용하였으며, 지중열전도도는 2.5 W/mK를 이에 따른 열확산은 GLD에서 제공하는 Diffusivity Calculator에 지중열전도도 값 및 Dense Rock의 물성치를 적용하여 계산된 0.052 m²/day를 적용하였다. 모델링 기간은 20년을 적용하였으며, U-tube는 32A, SDR 11, Single Type으로 150 mm의 천공홀에 평균적인 파이프 간격을 유지하도록 물 80%, 벤토나이트 20%으로 혼합된 그라우트로 그라우팅 되었다. 지중열교환기 배열은 장방형 배치를 적용하였다.

Table 1. Monthly loads variation with Load factor

month	operatin g day	operatin g hour	load factor	monthly loads(kWh)
1	21	10	78%	40,131
2	17		66%	27,489
3	22		53%	28,567
4	21		0%	-
5	21		0%	-
6	21		50%	36,750
7	20		72%	50,400
8	22		69%	53,130
9	20		45%	31,500
10	20		0%	-
11	22		0%	-
12	22		64%	34,496
cooling load	350 kw		heating load	245 kw

위와 같은 조건을 적용하였을 때 GLD를 통해 계산된 지중열교환기 길이는 냉방 8,084.5 m, 난방 4,105.9 m이며, 20년간 지열 순환수의 온도변화는 2.1℃이다.

3.2 지중열전도도의 영향

지중열전도도 변화에 따른 지중열교환기 길이 변화를 확인하기 위하여 기준설계조건에서 지중열전도도를 달리하여 지중열교환기 길이를 계산하였으며, 결과를 Fig. 1에 명기하였다.

기준 설계조건에서 지중열전도도가 0.2 W/mk 증가함에 따라 지중열교환기 길이는 평균 1.5% 감소하였으며, 지중열전도도가 0.2 W/mk 감소함에 따라 지중열교환기 길이는 평균 2.1% 증가하였다.

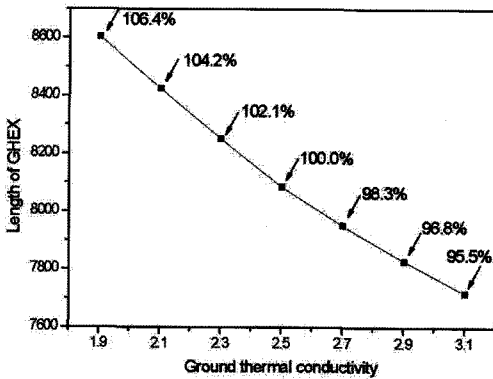


Fig. 1 Length Variations with Ground Thermal Conductivity

3.3 운전시간의 영향

운전시간 즉 히트펌프 가동시간이 증가하면 지중열교환기에서 처리해야하는 열량이 많아지며, 지중온도를 회복할 수 있는 시간이 짧아져 지중열교환기 설계 시 중요하게 고려되어야하는 조건 중 하나이다.

운전시간 변화에 따른 지중열교환기 길이변화를 확인하기 위하여 기준설계에서 주간운전조건(10시간, 12시간), 종일운전조건(24시간)을 적용하여 지중열교환기 길이를 계산하였다. 주간운전은 10, 12시간 운전조건으로 월별부하(Monthly Loads)

를 계산하였으며, 시간대별 부하(Design Day Loads)에서 오후 8시 ~ 오전 8시에 운전하지 않는 것으로 계산하였다. 종일운전은 24시간 운전조건으로 Monthly Loads를 계산하였으며, Design Day Loads의 오후 8시 ~ 오전 8시에 피크부하의 50%를 운전하는 것으로 계산하였다.

Fig. 2는 계산결과를 나타낸다. 야간운전을 하지 않고 운전시간을 10시간에서 12시간으로 증가하였을 때 지중열교환기 길이는 1.1% 증가로 많은 변화를 보이지 않지만 24시간 운전과 같이 야간운전을 할 때 지중열교환기 길이는 15.8% 증가하였다. 이와 같이 24시간 운전을 수행하였을 때 추가적인 지중열교환기가 소요되며, 종종 설치되고 있는 지열을 이용한 심야전기 수축열 시스템을 설계할 때도 필히 고려해야할 사항이다.

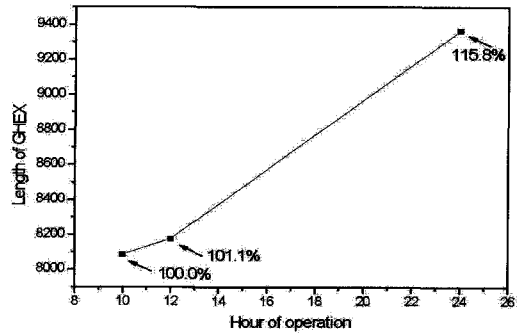


Fig. 2 Length Variations with Hours of Operation

3.4 지중열교환기 파이프 환경의 영향

지중열교환기의 깊이가 150 m에서 200 m로 증가되면 마찰손실수두를 감소시키기 위하여 지중열교환기 파이프의 관경을 30A에서 40A로 변경한다. 변경된 지중열교환기 파이프의 관경은 식 (3)^[6]에 의해 보어홀 열저항 및 열전달량에 영향을 미친다.

$$q = (T_p - T_b) / R_b \tag{3}$$

$$R_b = R_{pp} + R_g$$

이와 같이 지중열교환기 파이프 관경의 변화로 인한 보어홀 열저항의 변화가 지중열교환기 길이에 미치는 영향을 확인하기 위해 기준설계에서

지중열교환기 파이프의 관경을 변경하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 3은 계산결과를 나타낸다. 지중열교환기 파이프 관경이 증가함에 따라 보어홀 열저항은 5.4% 감소하였으며, 지중열교환기 길이는 3.5% 감소하였다.

일반적으로 지중열교환기 길이를 200 m로 변경하면 150 m에 비해 암반층의 비율 높아져 지중열전도도가 높아지는 것으로 알려져 있다. 하지만 암반층의 비율을 무시하더라도 지중열교환기 파이프의 관경확대로 열교환을 할 수 있는 면적이 넓어짐으로 인해 3.5%의 지중열교환기 길이를 감소할 수 있으므로 150 m 설계 시에도 고려해 봐야 할 사항이다. 또한 이에 따른 경제성점토도 함께 이루어져야 할 것이다.

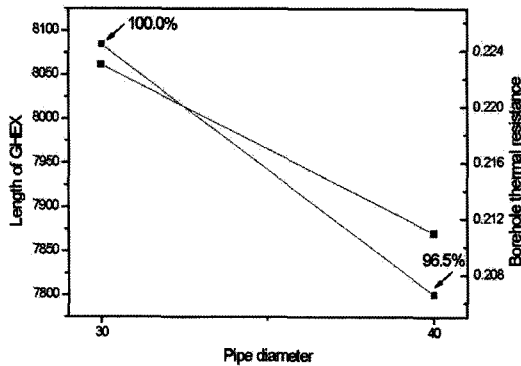


Fig. 3 Length Variations with Pipe Diameter

3.5 실리카샌드 첨가의 영향

지중열교환기의 열전달 성능을 높이기 위해 그라우트 주입 시 실리카샌드를 혼합하여 그라우팅을 수행한다. 실리카샌드의 혼합은 그라우트 열전도도를 높이며, 높아진 그라우트 열전도도는 지중열교환기의 열전달량을 높이는 결과를 가져온다.

물 80% 벤토나이트 20%를 교반 시 실리카 샌드의 비율을 0 ~ 30%까지 증가하였을 때 그라우트 열전도도의 변화^[7]와 이에 따른 지중열교환기 길이의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 실리카 샌드의 첨가 비율이 증가함에 따라 지중열교환기 길이는 감소하며, 5% 및 25%의 실리카샌드를 첨가하였을 때 그라우트 열전도도의 상승이 두드러져

이에 따른 지중열교환기 길이 변화가 가장 큰 것을 확인할 수 있다.

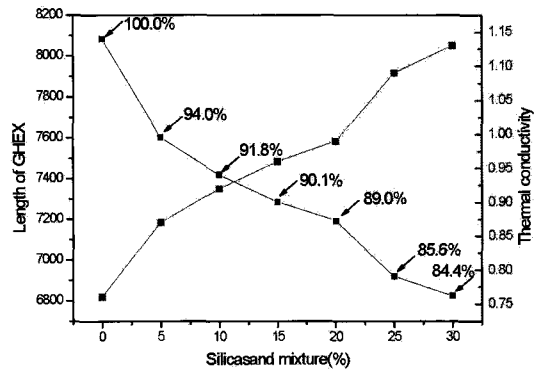


Fig. 4 Length Variations with Silicasand Mixture

3.6 지중열교환기 배열의 영향

일반적으로 지중열교환기는 6 m 간격의 장방향으로 배치하는 경우가 많다. 하지만 6 m 간격의 장방향 배치는 지중열교환기 설치면적을 증가시킬 뿐만 아니라 부지의 활용성을 저하시키며, 트렌치 배관 및 터파기, 되메우기 물량의 증가로 인해 공사비용이 증가한다. 때문에 2열로 지중열교환기를 배치하는 사례가 많아졌다.

34공의 지중열교환기 배열에 따른 지중열교환기 길이의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 150 m 깊이로 지중열교환기를 설치하였을 때 장방향 가로세로 6 m × 6 m 배열은 1,944 m², 2열 가로세로 4 m × 4 m 배열은 880 m², 2열 가로세로 4 m × 5 m 배열은 1,080 m²의 지중열교환기 설치면적을 갖는다. 2열 4 m × 4 m 배열은 장방향 6 m × 6 m 배열에 비해 45%의 설치면적이 필요하지만 지중열교환기 길이의 증가는 1.5%의 증가만을 보인다. 2열 4 m × 5 m 배열은 장방향 6 m × 6 m 배열에 비해 55%의 설치면적이 필요하지만 지중열교환기 길이의 증가는 0.2%의 증가만을 보인다.

이와 같이 2열 배치는 장방향 배치에 비해 지중열교환기 길이의 변화는 적지만 지중열교환기 설치면적을 획기적으로 줄일 수 있는 장점을 가지고 있으므로 설계 시 2열 배치의 고려가 필요하다.

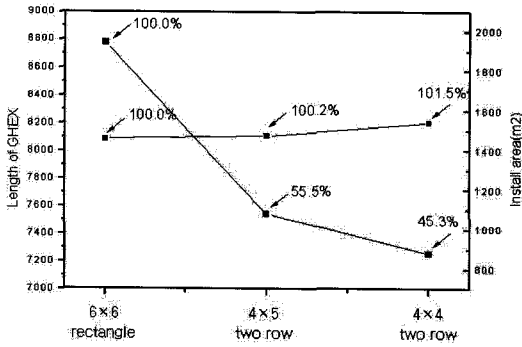


Fig. 5 Length Variations with GHEX Arrangement

3.7 지중열교환기 파이프 간격의 영향

현재 지중열교환기 파이프를 삽입할 때 U-tube 사이에 일정한 간격을 유지하는 스페이서 등은 설치하지 않고 삽입하는 경우가 대부분이다. 하지만 지중열교환기의 본래 목적인 열 교환에 있어 U-tube의 간격이 일정하게 유지되지 않음으로 인해 발생하는 열 간섭 현상은 열 교환 성능을 저하하는 중요한 인자 중 하나이다.

Fig. 6은 기준 설계조건에서 지중열교환기 파이프의 간격을 달리하였을 때 지중열교환기 길이의 변화를 나타낸 표이다. 지중열교환기 파이프의 간격이 좁을 때는 평균적인 조건에 비해 16.0%의 지중열교환기 길이가 증가하고 파이프의 간격이 천공홀 벽면에 가까우면 19.2%의 지중열교환기 길이가 감소한다.

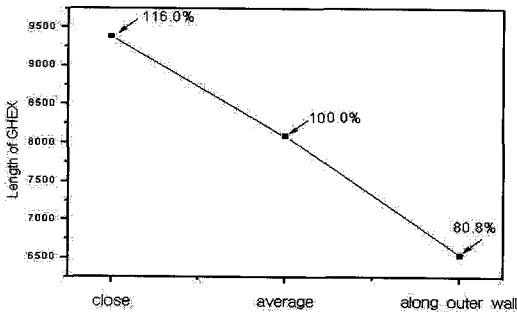


Fig. 6 Length Variations with Pipe Placement

이처럼 지중열교환기 파이프 간격에 따른 지중열교환기 길이의 변화가 큼을 고려할 때 지중열

교환기 파이프 간격을 최대한 이격할 수 있는 스페이서 등의 사용이 고려되어야 할 것이다.

3.8 지열 순환수 설계온도의 영향

지열순환수의 설계온도는 지열 히트펌프 COP (Coefficient of Performance) 및 지중열교환기 길이에 중요한 인자이다. 냉방 시 EST가 낮아지면 히트펌프에서 열을 쉽게 버릴 수 있으므로 히트펌프 COP는 증가하나 낮은 EST를 만들기 위해서는 그만큼 많은 지중열교환기가 소요되므로 히트펌프 COP의 증가에 따른 지중열교환기 길이 증가의 상관관계를 파악하고 설계하는 것이 중요할 것이다.

히트펌프 COP 및 지중열교환기 길이는 기준설계에서 냉방 EST를 2°C감소하였을 때 6.1%, 11.6% 상승하였으며, 4°C감소하였을 때 12.8%, 26.7% 상승하였다. 냉방 EST를 2°C증가하였을 때 5.6%, 9.1% 감소하였으며, 4°C증가하였을 때 11.1%, 16.6% 감소하였다.

기준설계에서 난방 EST를 2°C증가하였을 때 3.2%, 22.3% 상승하였으며, 4°C증가하였을 때 6.6%, 55.7% 상승하였다. 6°C증가하였을 때 10.0%, 111.6% 증가하였으며, 8°C증가하였을 때 13.6%, 223.3% 증가하였다.

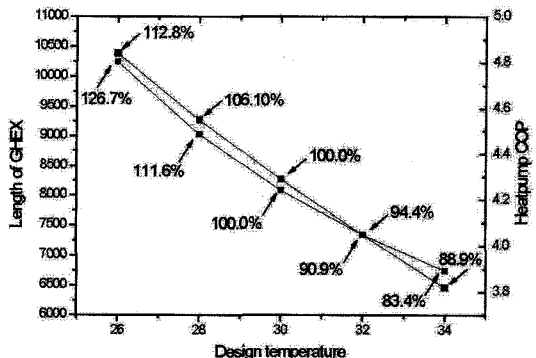


Fig. 7 Length Variations with EST of Cooling

EST의 증감에 따른 지중열교환기 길이의 변화량에 비해 히트펌프 COP 증감이 그리 크지 않으므로 기준 온도조건을 이용하는 것이 바람직하나 초기투자비 및 효율을 고려하여 최적의 EST선정

에 많은 노력을 기울여야 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 여러 가지 변수에 따른 지중열교환기 길이의 변화를 고찰하였으며, 결론은 다음과 같다.

- (1) 기준 설계조건에서 지중열전도도가 0.2 W/mk 증가함에 따라 지중열교환기 길이는 평균 1.5% 감소하였으며, 0.2 W/mk 감소함에 따라 평균 2.1% 증가하였다.
- (2) 주간운전조건에서는 지중열교환기 길이의 큰 변화는 없었으나 24시간 운전조건에서는 15.8%의 증가를 나타내었다.
- (3) 40A 지중열교환기 파이프를 사용하였을 때 지중열교환기 길이는 30A 보다 3.5% 감소하였다.
- (4) 5% 및 25%의 실리카샌트를 첨가하였을 때 그라우트 열전도도의 상승이 두드러져 이에 따른 지중열교환기 길이 감소가 가장 크다.
- (5) 지중열교환기를 장방향으로 배치하였을 때 보다 2열배치 하였을 때 천공부지는 약 45 ~ 55% 감소하였으나 지중열교환기 길이는 0.2 ~ 1.5% 정도로 아주 미미하게 증가하였다.
- (6) 기준설계조건 보다 지중열교환기 파이프 간격이 가까우면 지중열교환기 길이가 16.0% 증가하나 스페이서 등을 이용하면 지중열교환기 길이를 19.2%까지 감소할 수 있다.
- (7) 지열 순환수의 온도조건에 따른 COP의 변화는 그리 크지 않지만 지중열교환기 길이

의 변화는 매우 크므로 현장 여건에 맞추어 최적의 EST 선정에 주의해야 한다.

추후 GLD를 통하여 계산된 결과를 이용한 실증테스트를 거쳐 GLD의 계산결과와 실제 운전 데이터를 비교 연구하고자 한다.

참고문헌

1. Sooyoung Jun, Sangwon Park, Ho-jun Song, 2009, Assessment of CHG Emission Reduction Potential in Extension of Nuclear and Renewable Energy Electricity Generation, Energy Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 191-202.
2. 김옥중, 이공훈, 김민수, 2008, 지중열교환기 성능 향상에 관한 연구, 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 546-549.
3. 정민호, 장기창, 나호상, 2007, GSHP용 수직형 지중열교환기의 열전달 성능에 관한 연구, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 1443-1448
4. 2007, Ground Loop Design User's Manual, Gaia Geothermal, USA, pp. 1-136.
5. 한국전력공사 수요관리실, 2006, 축냉식 냉방 심야전력 기기 인정기준, 한국전력공사, pp. 70-71.
6. 한혁상, 한정상, 2005, 지열펌프 냉난방 시스템, 한림원, pp. 9-9.
7. Byong Hu Sohn, 2006, Thermal Conductivity Enhancement of Bentonite Grout Using Silica Sands, SAREK. Vol. 185, No. 6, pp. 493-500.