

저심도 유닛형 지중 열교환기의 성능 해석

남 유 진

부산대학교 건축공학과
(namyujin@pusan.ac.kr)

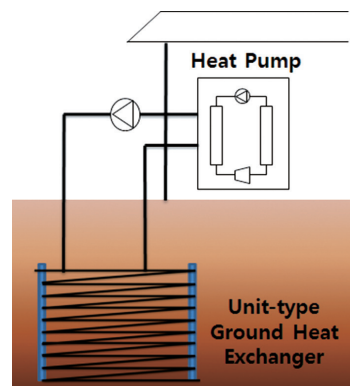
서론

지열 히트펌프 시스템은 연중 보다 유리한 조건의 지중열원을 활용함으로써 기존 공기열원 시스템에 비해 높은 성능을 확보할 수 있으며, 외기 조건에 큰 영향을 받지 않는다는 점에서 안정된 시스템 성능 확보라는 장점을 가지고 있다. 하지만, 일반적인 수직밀폐형 지중 열교환기 시스템은 천공비, 기기 반입비, 그라우팅비 등 높은 초기 투자비를 필요로 하게 되어, 소규모 공사일수록 도입 용량 대비 투자비가 증가하게 된다. 지열 시스템의 획기적인 보급을 위해서는 소규모 건물이나 단독 주택을 대상으로 한 시공비 저감 기술 개발이 필요하다.

지열 시스템의 초기 투자비 절감을 위해, 건물 구체 이용이나 수평형 시스템 등 다양한 형태의 실험적 연구¹⁻⁵⁾들이 수행되고 있으나, 비교적 얕은 심도에서 적정 수준의 에너지를 이용하기 위한 기술이나 열교환기 비용 절감을 위한 유닛화에 대한 연구는 드물다. 본 연구에서는 저시공비로 소규모 주택에 적용이 가능한 유닛형 지중 열교환기를 개발하고 이에 대한 성능 평가를 실시하였다.

유닛형 지중 열교환기의 개요

그림 1은 유닛형 지중 열교환기의 개요를 나타낸다. 본 기술은 저심도(2~5 m)의 지중에 직육면체의 열교환기를 설치하여 냉난방 열원으로 활용하는 기술로서 일반적인 수직밀폐형 지중 열교환기에 비해 파이프 단위 길이당 채열 효율은 낮으나 천공비 절감과 공기단축이 가능하며 보다 용이하게 채열 및 방열이 가능한 시스템이다. 본 연구에서는 유닛형 지중 열교환기를 모의한 시뮬레이션 모

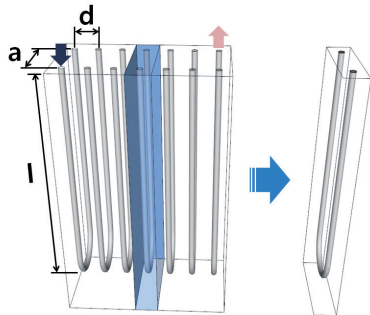


[그림 1] 유닛형 지중 열교환기 개념도

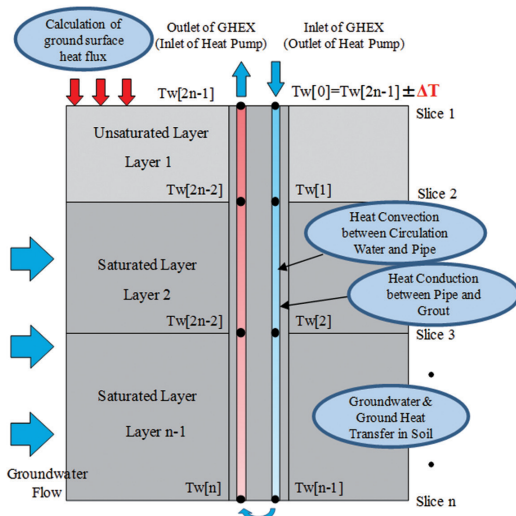
델을 작성하고 지중 채열량 예측 수법을 이용하여 난방 시의 채열 성능을 분석하였다.

시뮬레이션 개요

시스템 설계에 있어 적절한 기기 용량 산정이 중요하며, 지열 시스템에서도 용량 산정을 위한 정확한 지중 채열량 예측이 필요하다. 지중 열교환기 내 순환수와 토양과의 열교환을 정확하게 해석하기 위해, 지중열 이동 모델과 지중 열교환기 모델, 지표면열 이동 모델을 연성(Coupling)한 시뮬레이



[그림 2] 시뮬레이션 모델 개념도⁸⁾



[그림 3] 해석 수법 개요도⁷⁾

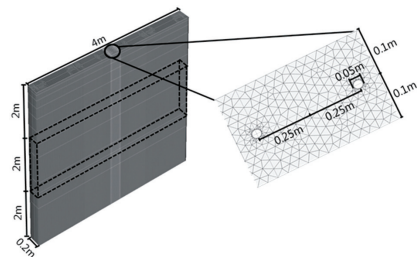
션 수법^{6, 7)}을 이용하여 해석을 실시하였다. 특히, 저심도로 인한 지표면 부근의 온도 변화를 보다 정확하게 해석하기 위해, 도입지의 태양 장파복사, 단파복사, 지표면 단파복사, 대류 열전달, 잠열 이동량을 도입지 표준기상데이터에 근거하여 비정상 계산 모델에 입력하였다.

그림 3은 해석 수법의 개요를 나타낸다. 지중 열교환기내 순환수 온도의 계산은, 건물의 냉난방 부하량에 따라 ΔT 를 설정한 후, 각 케이스에 있어서 냉방 시는 열교환기 출구 온도에 ΔT 를 가산 ($T_{w(2n-1)} + \Delta T$)하고, 난방 시는 반대로 ΔT 를 감산한 온도($T_{w(2n-1)} - \Delta T$)를 열교환기 입구 온도 $T_{w(0)}$ 로 주어 계산하였다. 이 때, 지중 열교환기 내의 순환수 온도는 각 Slice의 파이프 내벽 온도 및 토양 온도에 의해 순차적으로 결정된다. 본 해석 방법에 대한 상세 수식은 저자의 선행 연구^{6, 7)}에서 소개하고 있어 생략한다.

해석 조건

그림 2는 시뮬레이션 모델 개념도를 나타낸다. 지중 열교환기 사이 간격을 a , 지중 열교환기 간 거리를 d , 깊이를 l 로 설정하여 케이스 스터디를 실시하였다. 반복계산을 피하기 위해, 단위 파이프 해석모델을 무차원화하여 계산을 수행하였다.

그림 4는 본 연구에서 개발한 유닛형 지중 열교환기를 모의한 시뮬레이션 모델을 나타낸다. 4m



[그림 4] 해석 모델⁸⁾

〈표 1〉 케이스 조건

구분	a(m)	d(m)	l(m)	단열 유무
Case 1	0.5	0.1	2	X
Case 2	0.5	0.2	2	X
Case 3	0.5	0.3	2	X
Case 4	2	0.2	2	X
Case 5	2	0.2	2	O(1.5 m)

×0.2 m×6 m의 영역 심도 2 m 지점 중심에 지중 열교환기(U-tube, 40 A, 내경 44 mm, 외경 50 mm)를 설치하였다. 운전 기간은 동계 3개월(12~2월)간 09:00~18:00로 가정하였으며, 순환수 입·출구 온도는 장기운전 시, 과도한 채열로 인한 시스템 성능 하락을 방지하기 위하여 5°C로 제한온도를 설정하였다. 출구 열원온도가 5°C 미만이면 온도차를 줄여 채열을 적게 하게 되는 운전 로직을 입력하였다. 또한, 순환수의 유속은 0.292 m/s이며, 그라우트는 콘크리트(열전도율 : 1.5 W/mK, 열용량 2.8 MJ/mK)로 하였다. 한편, 지질 조건은 화강암으로 가정하였다.

표 1은 케이스 스터디의 상세 조건을 나타낸다. 본 원고에서는 파이프 간격과 상부 단열 시트의 설치 유무만 소개하고자 한다. Case 1~3은 지중 열교환기 간 거리를 0.1, 0.2, 0.3 m로 변경하였으며, Case 4와 Case 5는 지표면으로부터 깊이 1.5 m 위치에 단열 시트를 설치하는 것을 가정한 조건에서 채열량을 분석하였다. 이것은 지표면으로부터의

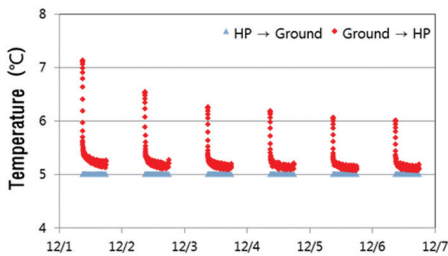
열손실을 최소화하고 지중으로부터의 열을 최대한 얻으려는 방법으로 그 효과를 정량적으로 확인하고자 하였다.

결과 및 분석

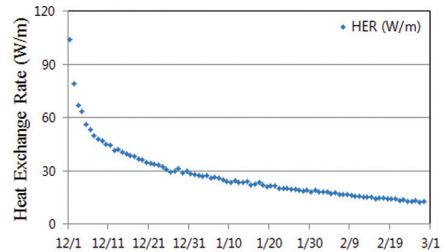
그림 5 (a)는 Case 2의 결과로서 순환수 입·출구 온도 변화를 나타낸다. 출구 온도는 최초 7.13°C에서 채열 운전이 진행됨에 따라 점차 감소하여 5.16°C까지 떨어졌으나, 다음날 운전 시작 시 온도가 회복되었음을 알 수 있다. 하지만, 시작 온도는 6.54°C에서 운전 개시 5일 후 6.01°C로 점차 하강하는 것을 확인하였다. 이것은 비운전 시간에 지중온도의 회복이 충분하지 못하다는 것을 의미한다.

한편, 그림 5 (b)는 난방 3개월간의 일평균 채열량(Heat Exchange Rate, HER) 변화를 나타낸다. 장기 운전에 따른 채열 성능 감소를 확인하였으며, 3개월 일평균 채열량은 27.45 W/m로 산출되었다. 장기 운전에 따른 열원 온도 저하는 지중 열교환기의 채열 성능 저하로 직결되는 것을 알 수 있다.

그림 6은 지중 열교환기 사이의 거리를 변화시킨 Case 1, 2, 3의 3개월간 일평균 채열량 및 출구 온도를 나타낸다. 기간 평균 채열량은 Case 1부터 3까지 각각 15.72 W/m, 27.45 W/m, 36.42 W/m로 나타났으며, 파이프 간격이 커질수록 채열 성능

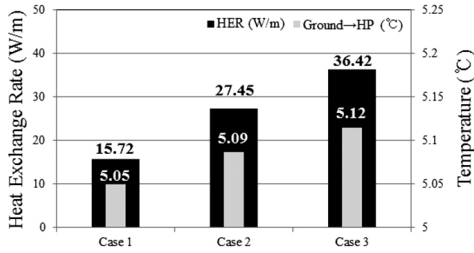


(a) 파이프 내 열원수 온도 변화

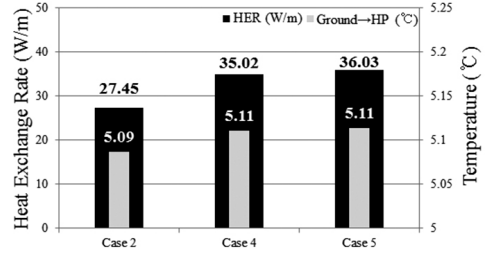


(b) 일평균 채열량 변화

〈그림 5〉 해석 결과



[그림 6] 파이프 간격에 따른 채열량 변화



[그림 7] 단열 시트 유무에 따른 채열량 변화

[표 2] 해석 결과

Case	a (m)	d (m)	l (m)	단열 시트 (m)	지중열 교환기 총 길이(m)	HER (W/m)	Total HER (W)
1	0.5	0.1	2	X	90	15.72	1,414.80
2	0.5	0.2	2	X	45	27.45	1,235.25
3	0.5	0.3	2	X	27	36.42	983.34
4	2	0.2	2	X	30	35.02	1,050.60
5	2	0.2	2	O	30	36.03	1,080.90

이 향상되는 것으로 나타났다.

그림 7은 베이스 케이스와 상부 단열 조건을 변화시킨 Case 4와 5의 비교 결과로서 기간 평균 채열량 및 출구 온도를 나타낸다. 기간 평균 채열량은 Case 2, 4, 5순으로 각각 27.45 W/m, 35.02 W/m, 36.03 W/m로 나타났다. 상부 단열 조건을 삽입한 Case 5가 Case 4보다 채열 성능이 높게 나타났으나, 그 차이는 미미하였다.

표 2는 시뮬레이션 결과를 종합하여 나타낸 것으로서 각 Case의 기간 평균 채열량을 나타낸다. 지중 열교환기 간 거리에 따른 단위길이 당 평균 채열량은 0.1 m의 15.72 W/m에서 0.3 m의 36.42 W/m로 증가하여, 약 57%의 차이를 나타냈다.

심도 1.5 m 위치에 단열 조건의 삽입에 따른 단위길이 당 평균 채열량은 단열 조건이 없을 때 35.02 W/m, 단열 조건이 있을 시 36.03 W/m로 단위길이 당 1 W/m의 차이를 나타내, 중간 단열 조건이 채열 성능에 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

결론

본 연구에서는 지열 시스템의 초기 시공비 절감을 위한 대안으로 저심도 유닛형 지중 열교환기를 개발하고, 채열 성능을 예측하기 위한 시뮬레이션을 실시하였다.

- (1) 지중 열교환 파이프의 이격 거리를 0.1 m, 0.2 m, 0.3 m로 변화시켰을 경우, 이격 거리가 커질수록 단위 길이당 채열량은 증가하며 최대 57% 차이가 발생함을 확인하였다. 하지만, 전체 채열량의 관점에서 보면, 0.1 m 간격으로 설치한 경우가 1414.80 W로 가장 큰 용량을 가질 수 있어, 도입지의 조건에 적합한 열교환기 설계가 필요할 것이다.
- (2) 지표면 열플럭스를 차단하기 위해 깊이 1.5 m에 단열 시트를 설치할 경우, 채열 성능은 향상되었으나, 그 차이는 미미함을 확인하였다.
- (3) 지중 열교환 파이프 이격 거리(d)의 차이가 지중 열교환기 사이 간격(a)의 차이보다 채열량에 더 큰 영향을 미침을 확인하였다. 이것은 파이프 가로 및 세로의 이격거리 중 상대적으로 거리가 가까운 쪽이 채열 성능에 대한 지배 인자가 된다는 것을 시사한다.

본 연구는 저시공비로 도입이 가능한 지중 열

교환기의 제품 개발에 기여하였으며, 단독주택이나 소규모 건물에 대한 지열 보급 가능성을 높였다. 또한, 수평형 지열 시스템을 포함한 저심도 지열 시스템의 성능 예측을 위한 근거 자료를 제시하였으며, 향후 지열 시스템의 정확한 성능 예측을 통한 신뢰성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Hwang, S.H. and Nam, Y.J., 2010, A Study on Development of a Ground-Source Heat Pump System Utilizing Cast-in-place Concrete Pile Foundation of a Building, Journal of SAREK, Vol. 22, pp. 641-647.
2. Hwang, Y.H., Lee, K.H., and Cho, S.W., 2012, Ground-Pipe Type and Length for Applicability of Geothermal Heat Pump in Small Residential Houses, Journal of KIAEBS, Vol. 6, pp. 216-221.
3. Naili, N., Hazami, M., Kooli, S., and Farhat, A., 2015, Energy and exergy analysis of horizontal ground heat exchanger for hot climatic condition of northern Tunisia, Geothermics, Vol. 53, pp. 270-280.
4. Park, S.W., Lee, D.S., Choi, H.J., Jung, K.S., and Choi, H.S., 2014, Relative constructability and thermal performance of cast-in-place concrete pile : Coil-type GHEX(ground heat exchanger), Energy, pp. 1-11.
5. Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Shan, K., and Yang, J., 2008, Thermal performance and ground temperature of vertical pile-foundation heat exchangers : A case study, Applied Thermal Engineering, Vol. 28, pp. 2295-2304.
6. Nam, Y.J., Ooka R., and Hwang S.H., 2008, Development of a numerical model to predict heat exchange rates for a ground-source heat pump system, Energy and Buildings, Vol. 40, pp. 2133-2140.
7. Nam, Y.J., 2011, Numerical analysis for the effect of ground and groundwater conditions on the performance of ground source heat pump system, Journal of SAREK, Vol. 23, No. 5, pp. 321-326.
8. Oh, J.H., Seo, J.H., and Nam, Y.J., 2015, Performance analysis of a low-depth unit-type ground heat exchanger using numerical Simulation, Journal of SAREK, Vol. 27, No. 3, pp. 230-239.
9. Hwang S.H., Ooka R.Z., and Nam Y.J., 2010, Evaluation of estimation method of ground properties for the ground source heat pump system, Renewable Energy, Vol. 35, pp. 2123-2130.
10. Nam, Y.J. and Chae, H.B., 2013, Prediction of the Heat Exchange Rate for a Horizontal Ground Heat Pump System Using a Ground Heat Transfer Simulation, Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 25, pp. 297-302.
11. Sohn, B.H., 2012, Performance analysis of ground-coupled heat pump system with slinky-type horizontal ground heat exchanger, Journal of SAREK, Vol. 24, No. 3, pp. 230-239.
12. Gonzalez, R.G., Verhoef, A., Vidale, P.L., Main, B., and Gan, G., 2012, Interactions between the physical soil environment and a horizontal ground coupled heat pump, for a domestic site in the UK, Renewable Energy, Vol. 44, pp. 141-153. 