

<응용기술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2016.4.1.049>

ISSN 2288-3991(Online)

【특집섹션: ICT와 지열에너지 융합】

지표수 열교환기의 용량과 적용 효과에 대한 설계 인자의 영향

손 병 후*† . 민 경 천**

*한국건설기술연구원 건축도시연구소, **코텍엔지니어링(주) 기술연구소

Impact of Design Parameters on Length and Application Effect of Surface Water Heat Exchanger(SWHE)

Byonghu Sohn*† and Kyong-Chon Min**

* Building and Urban Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

** Research Development Division, KOTEC Engineering

(Received December 22, 2015 ; Revised January 12, 2016 ; Accepted February 3, 2016)

Key Words: Geothermal Heat Pump(지열 히트펌프), Surface Water Heat Exchanger(지표수 열교환기), Shallow Pond(저심도 연못), Design Length(설계 길이), Application Effect(적용 효과)

초록: 본 연구에서는 설계 인자가 지표수 열교환기 길이에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 수직 밀폐형 지중열교환기와 지표수 열교환기를 같이 이용한다고 가정한 후, 지중 순환수의 온도 변화를 분석하였다. 지표수 열교환기 출구 온도와 연못 온도의 차이를 크게 하면, 열교환기 파이프 길이는 줄어들었다. 아울러 연못 온도가 높을수록 파이프 길이는 감소하지만, 파이프 바깥지름의 영향은 상대적으로 적었다. 또한 파이프 두께가 얇을수록 전도 열전달에서 열저항의 영향이 감소하기 때문에 파이프 길이는 감소하였다. 수직 밀폐형 시스템에 지표수 열교환기를 추가 적용하면, 지중열교환기 순환수 온도는 시간이 지날수록 감소하였다.

Abstract: Commercial buildings are generally cooling-dominated and therefore reject more heat to a vertical ground heat exchanger(GHE) than they extract over the annual cycle. Shallow ponds can provide a cost-effective means to balance the thermal loads to the ground and to reduce the length of GHE. The objective of this work has been to develop a design tool for surface water heat exchanger(SWHE) submerged in shallow pond. This paper presents the analysis results of the impact of design parameters on the length of SWHE and its application effect on geothermal heat pump(GHP) system using vertical GHE. In order to analysis, We applied ϵ -NTU method on designing the length of SWHE. Analysis results show that the required pipe length of SWHE was decreased with the increase of approach temperature difference and with the decrease of pipe wall thickness. In addition, when the SWHE was applied to the GHP system, the temperature of vertical GHE was more stable than that of standalone GHE system.

1. 서 론

지열 히트펌프 시스템은 지중의 항온성을 활용하기 때문에 효율이 높은 시스템이다. 아울러 기존 냉난방 설비와 비교했을 때, 이산화탄소와 같은 온실효과 가스를 상대적으로 적게 배출하기 때문에 친환경적이다. 지열 히트펌프 시스템은 또한 건물 부문의 에너지를 크게 줄일 수 있는 재생 가능 에너지원으로 주목받고 있다. Lund와 Boyd⁽¹⁾는 지열 에너지를 직접 활용하는 82개 국가 중, 43개 국가에서 지열

† Corresponding Author, byonghu@kict.re.kr

히트펌프 시스템을 보급하였다고 밝혔다. 또한 2014년 기준 전 세계 지열 히트펌프 설치 용량은 약 49.9 GWth이고, 2010년(33.1 GWth)과 비교했을 때 50.8% 증가하였다고 제시하였다.

지열 히트펌프 시스템은 대상 건물의 냉난방 에너지 사용량이 균형을 이룰 때 효과를 크게 본다. 반면, 냉방 에너지 사용량이 큰 건물(Cooling-dominated building)에서는 지중 순환수의 온도가 지속적으로 상승할 것이며, 이는 시스템의 성능 저하로 이어진다. 난방주도 건물(Heating-dominated building)에서는 이와 반대 현상이 발생하며, 이는 시스템의 난방 성능 저하를 야기한다. 이에 대한 대안으로 하이브리드 지열 히트펌프 시스템이 주목받고 있다.^(2,3)

하이브리드 지열 히트펌프 시스템은 보조 열원(난방주도 건물)이나 보조 히트싱크(냉방주도 건물)를 활용한다. 보조 설비로 냉각탑과 지표수(이상 냉방) 그리고 보일러와 태양열(이상 난방) 등을 이용할 수 있다. 이러한 설비를 연계함으로써 지중 온도(또는 지중 순환수 온도)는 장기간에 걸쳐 균형을 맞출 수 있다. 지열 시스템 시공 시, 일반적으로 냉난방 부하 중 큰 쪽에 맞춰 지중열교환기를 시공하기 때문에, 어느 한 쪽은 필요 이상이 된다. 냉방주도 건물(냉방용 지중열교환기>난방용 지중열교환기)은 난방부하에 맞춰 지중열교환기를 설치하고, 부족한 냉방부하를 냉각탑이나 지표수(Surface water)에서 처리할 수 있다.⁽⁴⁾ 하이브리드 지열 히트펌프 시스템은 초기 시공비를 줄이면서, 동시에 시스템의 성능을 안정적으로 유지할 수 있는 것으로 간주된다.

본 연구에서는 설계 인자가 지표수 열교환기(Surface water heat exchanger, SWHE) 설계 길이에 미치는 영향을 분석하였으며, 또한 지표수 열교환기의 적용 효과를 분석하였다. 지표수는 용량에 따라 호수와 연못으로 구분할 수 있다. 본 연구는 저심도 인공 연못(Shallow pond)으로 한정하였으며, 설계 인자로 연못 온도와 열교환기 파이프 사양 등을 고려하였다. 먼저 열교환기 설계 기법(유용도-NTU 법)과 열전달 상관식 등을 적용하여 파이프 길이를 계산하였다. 다음으로 수직 밀폐형 지중열교환기를 이용하는 지열 시스템에 지표수 열교환기를 적용한다고 가정한 후, 효과를 분석하였다.

2. 지표수 열교환기 설계

Fig. 1은 저심도 인공 연못을 활용하는 지열 히트펌프 시스템을 개략적으로 나타낸 그림이다. 지열 히트펌프의 열원이나 히트싱크가 연못인 점을 제외하면, 국내외에서 주로 설치하는 수직 밀폐형 지열 시스템과 차이는 크게 없다. 지표수 열교환기는 개방형(Open loop)과 밀폐형(Closed loop)으로 구분한다. 개방형은 호수나 연못의 물을 직접 이용하고, 밀폐형은 지표수 안에 잠긴 고밀도 폴리에틸렌 파이프를 이용한다. 그림에서 보듯이 밀폐형은 슬링키(Slinky), 번들(Loose-bundle), 스파이럴-헬리컬(Spiral-helical) 등

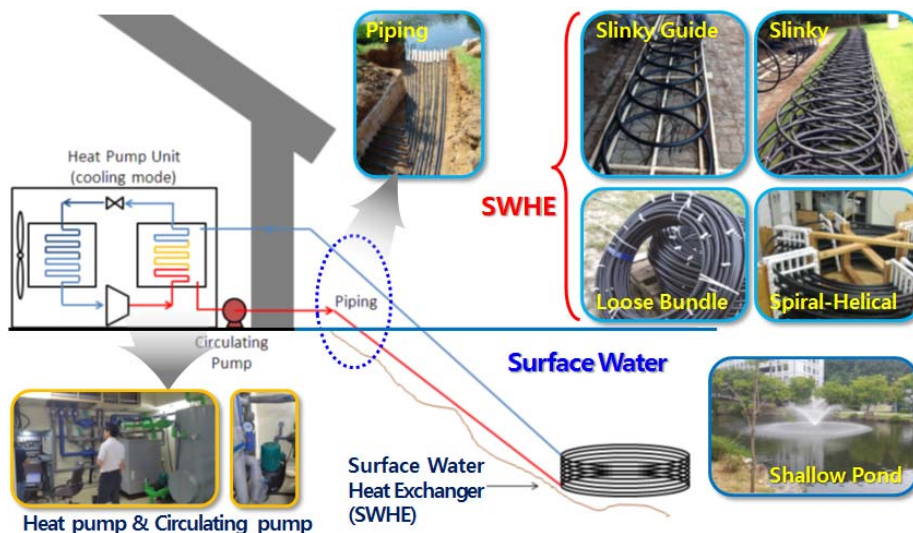


Fig. 1 Surface water heat exchangers submerged in shallow pond and their application on GHP system

다양한 형상을 적용할 수 있으며, 본 연구는 밀폐형 중 슬린키 방식으로 한정하였다.

슬린키 형상의 지표수 열교환기 설계는 일반적인 열교환기 설계와 같다. 즉 열교환기 파이프 입·출구 온도, 파이프 주변의 온도(연못 온도) 변화, 파이프 유량 등을 알 때, 열교환기 파이프의 길이를 결정하는 문제다. Fig. 2에 열교환기 유체와 열교환기 주변(연못) 사이의 열전달 과정을 나타내었다. 본 논문에서는 냉방 운전으로 한정하였기 때문에, 그림에서 고온 유체는 파이프를 유동하는 유체이고 저온 유체는 파이프 주변의 연못물이다. 여기서 고온 유체의 파이프 입구 온도($T_{h,i}$)는 히트펌프에서 나오는 온도를 의미한다. 아울러 고온 유체의 파이프 출구 온도($T_{h,o}$)는 히트펌프로 들어가는 온도이고, 이는 지표수 열교환기 설계에서 기준(Design criteria) 온도가 된다. 저온 유체인 연못의 열용량이 고온 유체인 열교환기 순환수의 열용량보다 상대적으로 크다. 따라서 저온 유체의 온도 변화는 거의 없다고 볼 수 있다.⁽⁵⁾ 또한 저온 유체의 유량 변화 역시 거의 없다고 가정할 수 있다.

유용도(Effectiveness, ϵ)- NTU (Number of transfer units) 법을 적용하여 지표수 열교환기를 설계하였다. 여기서 유용도와 NTU 는 식 (1)과 식 (2)로 계산한다.⁽⁶⁾

$$\epsilon = \frac{q_a}{q_{max}} \tag{1}$$

$$NTU = -\ln(1 - \epsilon) \tag{2}$$

식 (1)에서 실제 열전달률(q_a)와 최대 열전달률(q_{max})은 다음과 같다.

$$q_a = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \tag{3}$$

$$q_{max} = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{c,o}) \tag{4}$$

식 (2)의 NTU 를 총괄 열전달계수(UA)와 열용량을 이용하여 식 (5)와 같이 표현할 수 있다. UA 는 관 내측 대류열전달계수(h_i), 파이프의 열전도도(k_t), 관 외측 자연대류 열전달계수(h_o) 등을 이용하여 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}} \tag{5}$$

$$UA = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_i A_i}\right) + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k_t L_t} + \left(\frac{1}{h_o A_o}\right)} \tag{6}$$

식 (6)에서 보듯이 지표수 열교환기 설계는 대류열전달계수와 파이프의 열전도도를 알 때, 사양(길이 L_t 또는 면적 A)을 구하는 문제다. 식 (6)에서 관 내측 대류열전달계수는 누셀수(Nusselt number) 등으로 표현된다. 이때 직관인 경우 잘 알려진 Dittus-Boelter 식을 적용할 수 있다.⁽⁶⁾ 하지만 본 연구의 대상은

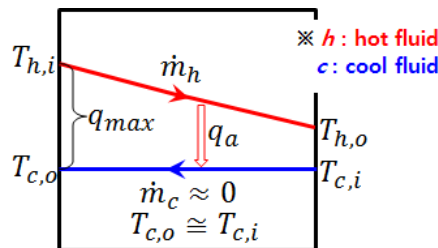


Fig. 2 Heat exchanger fluids in cooling mode of SWHE

슬린키 파이프, 즉 곡관(Curved pipe)이기 때문에 원심력의 영향을 고려해야한다. 따라서 식 (7)과 같이 원심력의 영향이 반영된 Rogers와 Mayhew⁽⁷⁾의 상관식을 이용하였다. 또한 관 외측 대류열전달계수 계산에는 Churchill과 Chu⁽⁸⁾가 제안한 상관식인 식 (8)을 이용하였다.

$$Nu_i = 0.021 Re^{0.85} Pr^{0.4} \left(\frac{D_i}{D_{c,avg}} \right)^{0.1} \quad (7)$$

$$Nu_o = \left[0.6 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{\left\{ 1 + \left(\frac{0.559}{Pr} \right)^{9/16} \right\}^{8/27}} \right]^2 \quad (8)$$

식 (7)에서 D_i 는 파이프 안지름이고, $D_{c,avg}$ 는 코일의 평균 지름이다. 또한 식 (8)에서 무차원 수 Ra 는 Rayleigh수다.

3. 결과 및 고찰

3.1 설계 인자에 따른 지표수 열교환기 길이 변화

연못 온도가 지표수 열교환기 길이에 미치는 영향을 Fig. 3에 도시하였다. 그림에서 x 축은 접근 온도차(Approach temperature difference)이고 y 축은 히트펌프의 단위 냉방 용량 당 필요한 길이이다. 여기서 접근 온도차는 파이프 출구 온도와 연못 온도의 차이를 의미한다. 수직 밀폐형 시스템에서는 통상 열교환

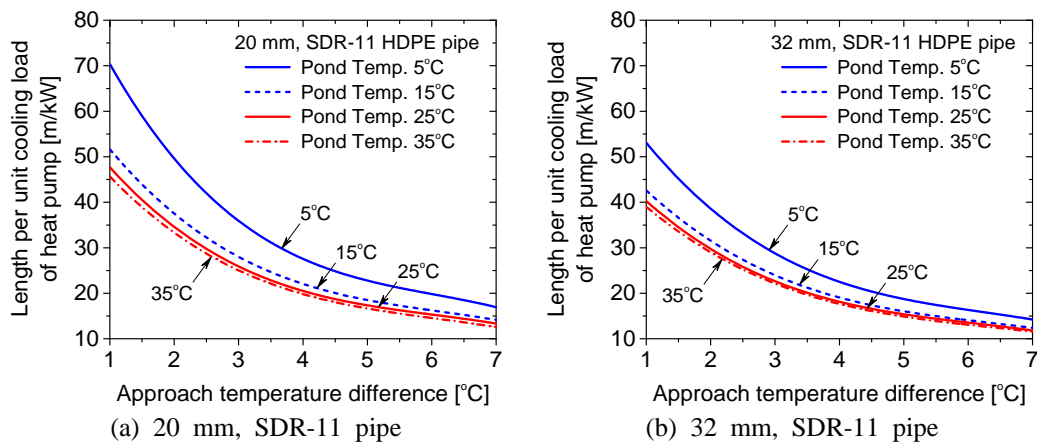


Fig. 3 Pond temperature effect on the length of surface water heat exchanger

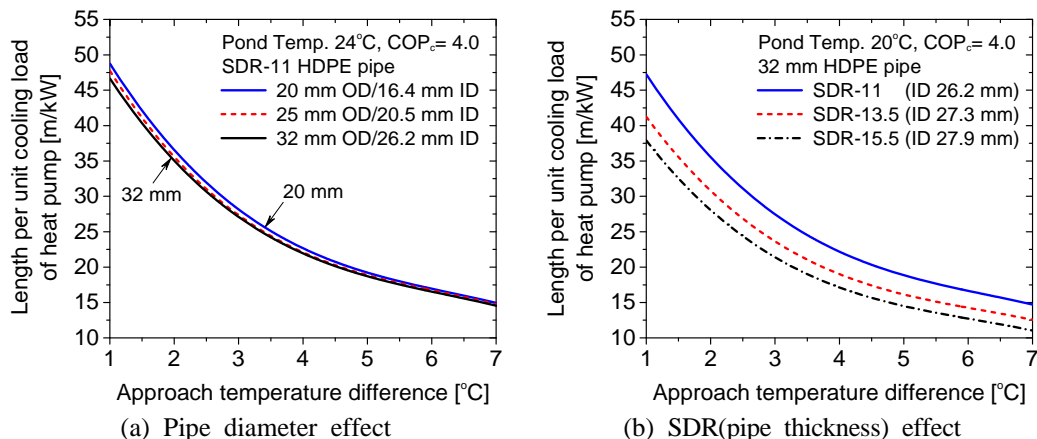


Fig. 4 Effects of pipe diameter and pipe thickness on the length of surface water heat exchanger

기 출구 온도로 표현하지만, 지표수 이용 시스템에서는 연못 온도가 중요한 변수이기 때문에 두 온도의 차이로 표현하였다.

Fig. 3의 (a)와 (b)에서 보듯이 파이프 바깥지름을 달리하였을 때 정량적인 값은 차이가 있지만, 전체적인 경향은 비슷하다. 또한 접근 온도차를 작게 할수록 필요한 길이는 증가한다. 여기서 접근 온도차를 작게 한다는 것은 파이프 출구 온도를 연못 온도에 근접시킨다는 것과 같은 의미다. 예를 들어 냉방 운전 중 히트싱크인 연못의 온도가 25℃일 때 접근 온도차가 2℃이면 파이프 출구 온도는 27℃이고, 접근 온도차가 5℃이면 출구 온도는 30℃라는 의미다. 따라서 지표수 열교환기 설계 시 기준 온도인 출구 온도를 낮추면 필요한 길이는 증가하게 된다. 이는 수직 밀폐형 지중열교환기를 설계할 때, *EST*(Entering source temperature)를 낮게 설정할수록 열교환기가 더 필요하다는 것과 같은 의미다. 마지막으로 연못 온도가 높을수록 필요한 길이는 감소하는데, 이 역시 파이프 출구 온도가 높아지기 때문이다.

열교환기 파이프의 바깥지름과 두께가 길이에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 4(a)는 파이프 바깥지름이 설계 길이에 미치는 영향을 보여준다. 이때 연못 온도는 24℃, 히트펌프 냉방 COP는 4.0을 기본 조건으로 길이를 계산하였다. 접근 온도차가 같을 때, 파이프 바깥지름이 클수록 길이는 다소 줄어든다. 아울러 접근 온도차가 커질수록 파이프 바깥지름의 영향은 줄어든다. 이는 내부 열전달보다 전도 열전달과 자연대류 열전달이 파이프 길이에 더 크게 영향을 미치기 때문이다.

파이프 두께(SDR)에 따른 지표수 열교환기 길이 변화를 Fig. 4(b)에 도시하였다. 여기서 SDR(Standard dimension ratio)은 파이프 바깥지름을 두께(Wall thickness)로 나눈 값이다. 따라서 SDR 값이 크다는 것은, 파이프 바깥지름이 같을 때, 두께가 얇다는 의미다. Fig. 4(b)에서 보듯이, 접근 온도차가 같을 때 SDR이 클수록 파이프 길이는 감소한다. 이는 파이프 두께가 얇으면, 전도 열전달에서 열저항의 영향이 감소하기 때문이다.

3.2 지표수 열교환기 적용 효과

지표수 열교환기와 수직 밀폐형 지중열교환기를 함께 이용하는 것으로 가정한 후, 지표수 열교환기의 적용 효과를 분석하였다. 일반적으로 지열 히트펌프의 성능은 지중 순환수의 온도에 영향을 받는다. 따라서 본 논문도 지중 순환수의 온도 변화에 초점을 맞추었으며, 이때 온도 변화 시뮬레이션은 기존 문헌⁽⁹⁾에서 제시한 방법을 따랐다. 먼저 상용 프로그램(Design Builder V3.0)⁽¹⁰⁾을 이용하여 실제 건물의 시간대별 에너지 부하와 최대 부하를 계산하였다. 이어서 수직 밀폐형 지중열교환기를 이용하는, 가상 지열 히트펌프 시스템을 설계하였다.⁽¹¹⁾ 이때 앞서 계산한 에너지 부하와 최대 부하를 적용하였다. 대상 건물은 지상 3층이며, 냉난방 면적은 1,022 m²이다. 대상 건물의 외관과 시간대별 에너지 부하 등을 Fig. 5에 나타내었다.

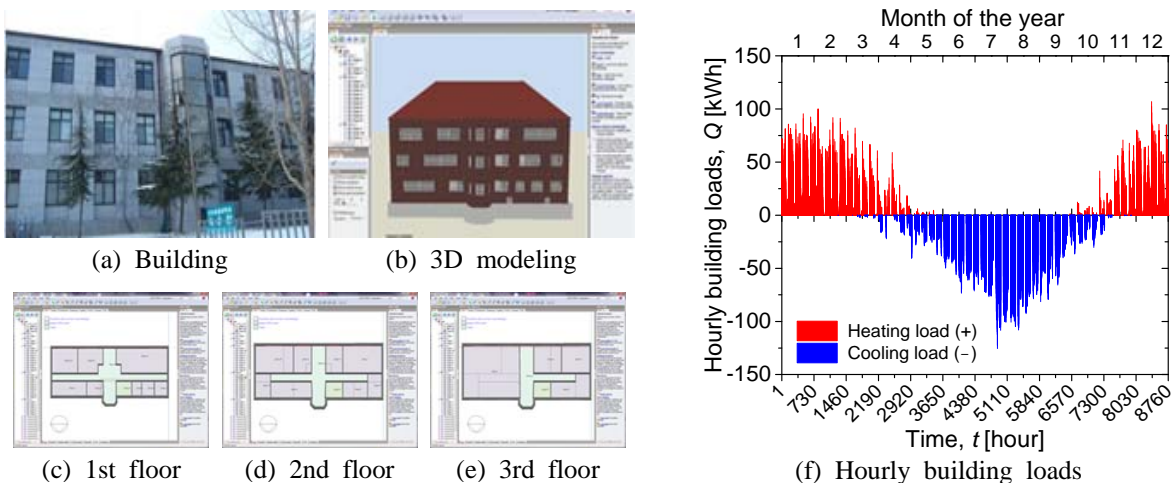


Fig. 5 Target building, 3D modeling, and hourly building loads for analyzing application effects

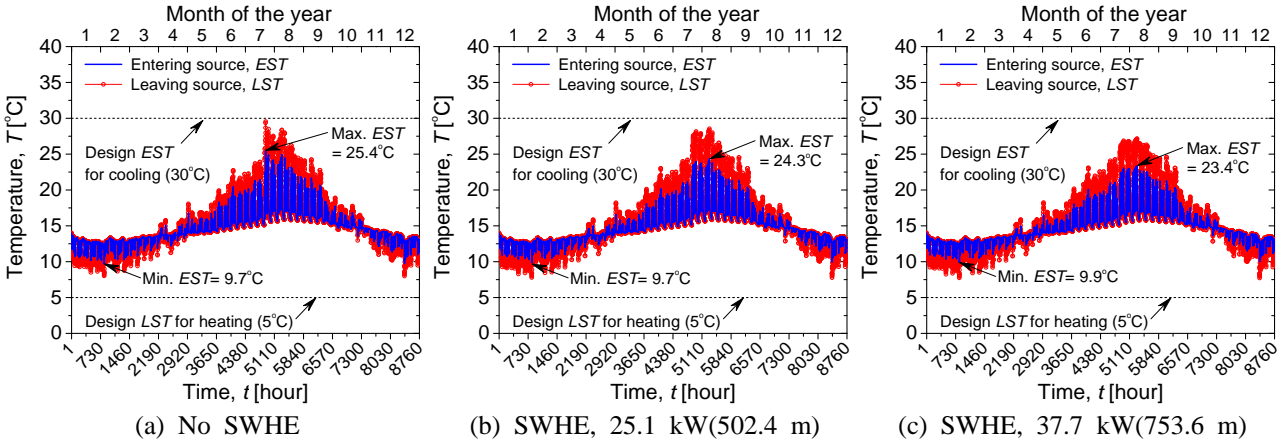


Fig. 6 Hourly variation of *EST* and *LST* in GHP system with SWHE

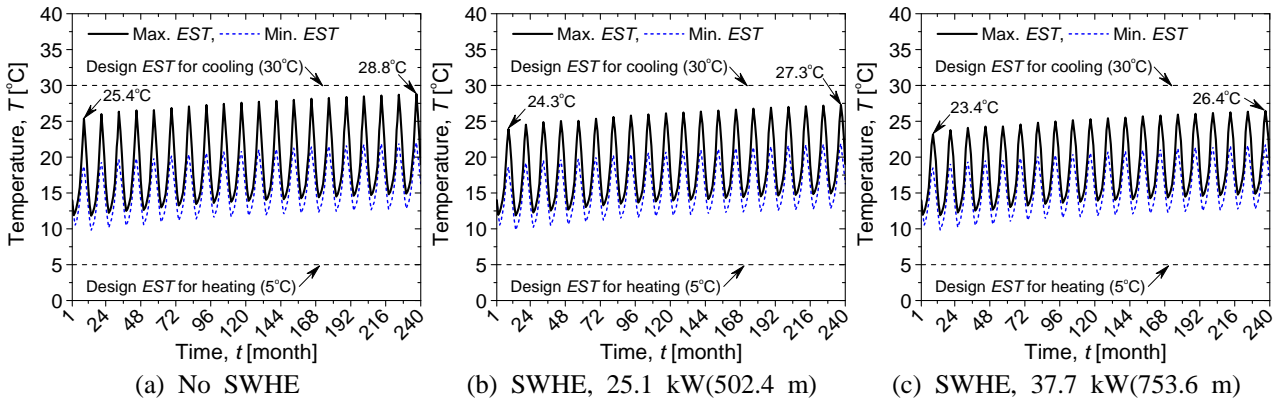


Fig. 7 Long term variation of maximum *EST* in GHP system with SWHE

수직 밀폐형 지중열교환기 순환수 온도의 연중 시간대별(8760시간) 변화와 장기(20년) 변화를 분석하였다. Fig. 6(a)와 Fig. 7(a)에서 수직 밀폐형 지중열교환기만 이용할 경우, *EST*는 첫 해 25.4°C에서 20년이 지나면 28.8°C까지 상승한다. 이는 대상 건물의 냉방 부하가 난방 부하보다 커서 수직 밀폐형 지중열교환기 주변 지반에 열이 축적되기 때문이다. 반면 지표수 열교환기를 보조 히트싱크로 활용하면 Fig.

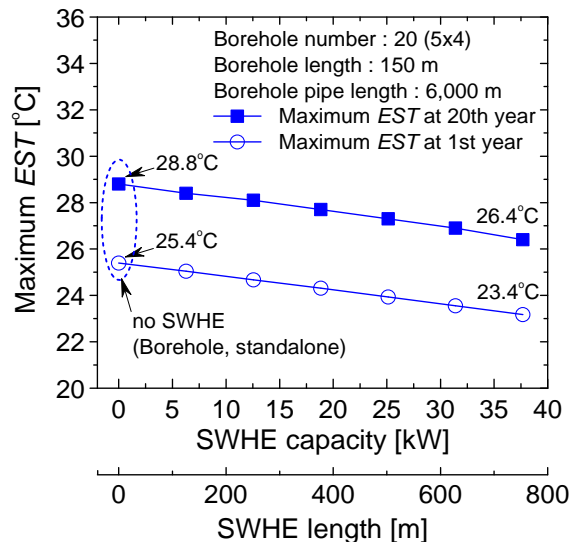


Fig. 8 Application effect of SWHE on GHP system in terms of maximum *EST* of borehole heat exchanger

6(b)와 Fig. 6(c)에서 보듯이 최고 EST 는 내려간다. 이는 장기 시뮬레이션 결과인 Fig. 7(b)와 Fig. 7(c)에서도 확인할 수 있다. 전체적으로 지표수 열교환기의 용량(길이)이 증가할수록 최고 EST 는 내려간다. 냉방 운전에서 EST 가 낮아진다는 것은 시스템의 냉방 성능이 증가한다는 의미다.

이상의 결과를 지표수 열교환기의 용량과 길이의 함수로 Fig. 8에 정리하였다. 장기(20년) 시뮬레이션 결과를 보면, 최고 EST 는 28.8°C 에서 26.4°C 까지 내려간다. 이는 지표수 열교환기를 적용할 수 있는 여건, 즉 건물 주변에 연못과 같은 지표수가 있을 때, 지중열교환기를 더 시공하지 않으면서 지중 온도를 안정적으로 유지할 수 있다는 의미로 해석할 수 있다. 하지만 지표수 열교환기 파이프를 더 설치하기 때문에, 성능 향상과 경제성 사이에서 균형을 맞추는 작업(trade off)이 선행되어야 한다.

5. 결론

본 연구에서는 설계 인자가 지표수 열교환기 길이에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 수직 밀폐형 지중열교환기와 지표수 열교환기를 같이 이용한다고 가정한 후, 지중 순환수의 온도 변화를 분석하였다. 지표수 열교환기 출구 온도와 연못 온도의 차이(접근 온도차)를 크게 하면, 열교환기 파이프 길이는 줄어든다. 아울러 연못 온도가 높을수록 파이프 길이는 감소하지만, 파이프 바깥지름의 영향은 상대적으로 적었다. 접근 온도차가 같을 때, 파이프 바깥지름이 클수록 길이는 다소 줄어든다. 또한 파이프 두께가 얇으면, 전도 열전달에서 열저항의 영향이 감소하기 때문에 SDR 이 클수록 파이프 길이는 감소한다. 수직 밀폐형 시스템에 지표수 열교환기를 추가 적용하면, 시간이 지날수록 지중열교환기 순환수의 온도는 내려간다. 지표수 열교환기를 설계할 때, 관 외측 자연대류 열전달계수가 중요한 인자다. 따라서 다양한 조건에서 실험을 수행한 후, 이 인자의 영향을 규명할 예정이다.

후 기

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 20143030111010)

참고문헌 (References)

- (1) Lund, J. W. and Boyd, T. L., 2015, "Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review," *World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia.
- (2) Sarbu, I. and Sebarchievici, C., 2014, "General Review of Ground-Source Heat Pump Systems for Heating and Cooling of Buildings," *Energy and Buildings*, Vol. 70, pp. 441~454.
- (3) Kavanaugh, S., 1998, "A Design Method for Hybrid Ground-Source Heat Pump," *ASHRAE Transactions*, Vol. 104, pp. 691~698.
- (4) Kavanaugh, S. and Rafferty, K., 2014, *Geothermal Heating and Cooling: Design of Ground-Source Heat Pump Systems*, ASHRAE, Atlanta.
- (5) McCrary, B. H., Kavanaugh, S. P., and Williamson, D. G., 2006, "Environmental Impacts of Surface Water Heat Pump Systems," *ASHRAE Transactions*, Vol. 112, pp. 102~110.
- (6) Saha, R. K. and Sekulic, D. P., 2003, *Fundamentals of Heat Exchanger*, John Wiley&Sons, New Jersey.
- (7) Rogers, G. F. C. and Mayhew, Y. R., 1964, "Heat Transfer and Pressure Loss in Helically Coiled Tubes with Turbulent Flow," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 7, pp. 1207~1216.
- (8) Churchill, S. W. and Chu, H. H. S., 1975, "Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Horizontal Cylinder," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 18, pp. 1049~1053.
- (9) Sohn, B. and Kwon, H. S., 2014, "Performance Prediction on the Application of a Ground-Source Heat

Pump(GSHP) System in an Office Building,” *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 26, No. 9, pp. 409~415.

(10) DesignBuilder Software, 2011, DesignBuilder V3.0

(11) Gaia Geothermal, 2014, Ground Loop Design-Geothermal Design Studio User’s Manual, Gaia Geothermal.