

<응용기술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2016.4.1.035>

ISSN 2288-3991(Online)

【특집섹션: ICT와 지열에너지 융합】

제어 방식에 따른 지열 히트펌프 시스템의 성능 시뮬레이션

이두영*, 최재호*, 민경천*, 손병후**†

*코텍엔지니어링(주) 기술연구소, **한국건설기술연구원 건축도시연구소

Performance Simulation of Geothermal Heat Pump (GHP) System with Different Control Schemes

Doo-Young Lee*, Jae-Ho Choi*, Kyong-Chon Min* and Byonghu Sohn**†

* Research Development Division, KOTEC Engineering

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

(Received December 21, 2015 ; Revised January 18, 2016 ; Accepted February 3, 2016)

Key Words: Geothermal Heat Pump System(지열 히트펌프 시스템), Transient Simulation(동적 시뮬레이션), TRNSYS(트란시스), Temperature Compensation Control(온도보상제어), Performance(성능)

초록: 지열 히트펌프 시스템에서 히트펌프 등 시스템 구성 요소의 에너지 소비량을 효율적으로 관리하면, 냉난방 성능을 더 높일 수 있다. 본 논문은 외기온도 제어 방식이 지열 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 분석 결과를 현재 국내에서 주로 적용하는 제어 방식(Control-A)과 비교하였다. 이를 위해 상용 소프트웨어(TRNSYS 17)를 이용하여 가상 지열 시스템의 모델을 구축한 후, 시뮬레이션을 수행하였다. 외기 온도 제어 방식(Control-B)은 버퍼 탱크의 온도를 외기 온도에 따라 제어하기 때문에, 간절기 때 효과적이었다. 기존 제어 방식과 비교했을 때, 외기 온도 제어 방식은 히트펌프 전력 소비량을 7.7%(147 kWh 절감) 그리고 순환펌프 전력 소비량을 7.5%(28.1 kWh 절감) 줄일 수 있었다.

Abstract: Geothermal heat pump (GHP) systems have been proved to be one of the most efficient systems for heating and cooling in buildings. However, an optimal energy performance depends on a good control of the system components, including heat pumps and circulation pumps, which affect to the total energy consumption of system. This paper presents the simulation results of the heat pump performance for two different control schemes, i.e. constant setting temperature (Control-A) and variable setting temperatures (Control-B) in buffer tank. A dynamic simulation tool, TRNSYS 17, was used to model the entire system and to assess the performance of the system. Simulation results show that the Control-B, which controls the temperature in buffer tank with outdoor air temperature, is a effective way to reduce the energy consumptions in heat pump (7.7%) and circulation pump (7.5%).

1. 서론

여러 신·재생에너지 시스템 중, 지열 히트펌프(geothermal heat pump, GHP) 시스템은 땅(지중)이 보유한 에너지를 활용하여 건물 냉난방 에너지와 온수를 공급한다. 이러한 지열 히트펌프 시스템(이하 ‘지열 시스템’)은 지열 히트펌프, 지중열교환기(ground heat exchanger), 순환수 펌프(circulation pump) 등 각종 부속 설비 등으로 구성된다. 아울러 지열 시스템은 지중의 항온성을 활용하기 때문에 연중 냉난방 성능이 우수하고 이산화탄소와 같은 온실효과 가스를 적게 배출한다.⁽¹⁾

† Corresponding Author, byonghu@kict.re.kr

최근 지열 시스템의 최적 운전제어가 주목을 받고 있다.^(2~3) 지열 히트펌프와 순환수 펌프 등 시스템 구성 요소의 전력 소비량을 효율적으로 관리하면 시스템의 냉난방 성능을 더 높일 수 있기 때문이다. Cervera-Vazquez 등⁽²⁾은 지중열교환기 순환수 펌프의 전력 소비량에 주목하고, 펌프 제어 방식을 다르게 적용할 때 시스템 에너지 소비량을 33%까지 줄일 수 있다고 밝혔다. 또한 Jung 등⁽³⁾은 지중 순환수 펌프를 순차적으로 제어(sequential control)하면 시스템 성능을 높일 수 있다고 제시하였다.

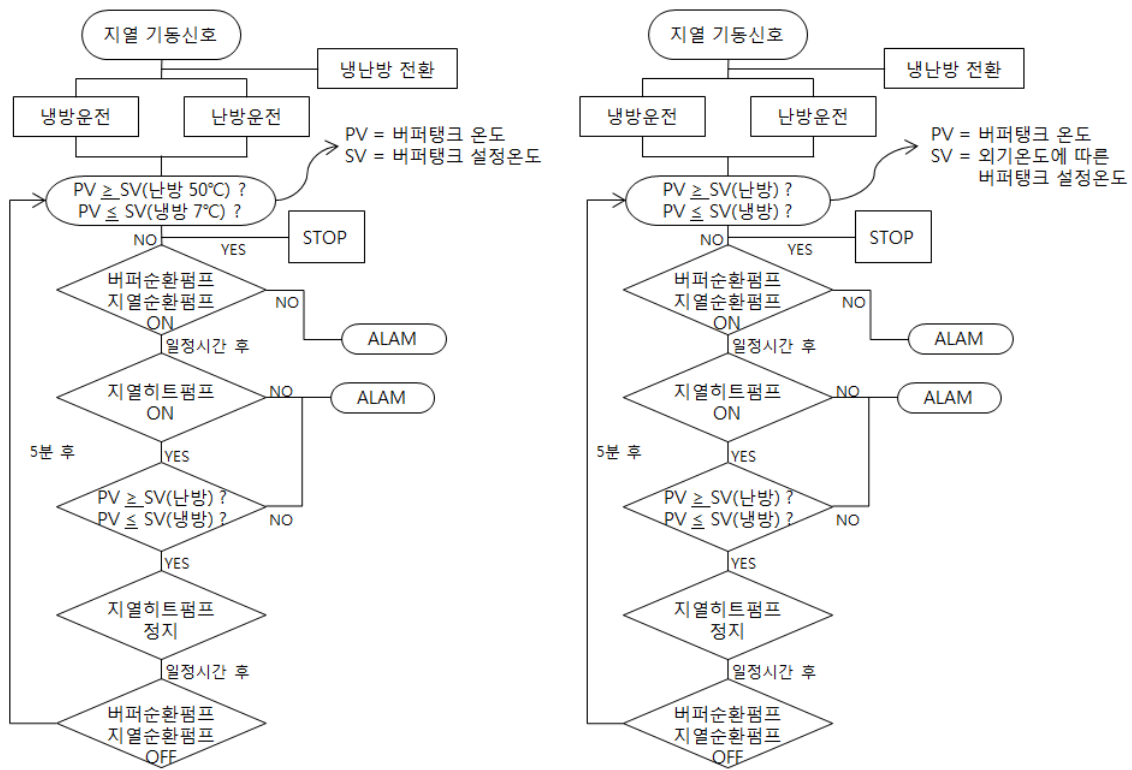
본 논문은 외기 온도 보상 제어 방식(이하 ‘외기온 제어’)이 지열 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 분석 결과를 현재 국내에서 주로 적용하는 제어 방식(이하 ‘기존 제어’)과 비교하였다. 이를 위해 상용 소프트웨어⁽⁴⁾로 지열 시스템의 모델을 구축한 후, 동적 시뮬레이션(transient simulation)을 수행하였다. 이를 통해 냉·온수 온도, 시스템의 전력 소비량, 성능계수(COP) 변화 등을 계산하였으며, 본 논문에서는 부하(건물) 측 순환수의 온도와 실내 온도 변화에 대한 분석 결과로 한정하였다.

2. 지열 히트펌프 시스템 제어 방식

지열 시스템은 통상 지중열교환기, 지열 히트펌프, 순환수 펌프, 버퍼 탱크(buffer tank), 부하 설비로 구성된다. 국내에서는 주로 물 대 물 지열 히트펌프(water-to-water GHP)를 설치하고 있으며, 이 장비가 생산한 냉·온수를 부하 측 설비(공조기 또는 FCU)로 순환시켜 냉난방을 수행한다. 이때 시스템은 실내 설정 온도와 버퍼 탱크(또는 냉·온수 저장 탱크)의 온도에 따라 운전(ON)과 정지(OFF)를 반복한다. 또한 버퍼 탱크를 기계실에 설치하여 시스템 배관의 압력을 유지한다.

2.1 기존 제어 방식

기존 제어(Control-A)와 외기온 제어 방식을 Fig. 1에 순서도로 표현하였다. Fig. 1(a)는 기존 제어 방식



(a) Constant setting temperature in buffer tank (Control-A) (b) Variable setting temperature in buffer tank (Control-B)

Fig. 1 Control schemes applied in this simulation study

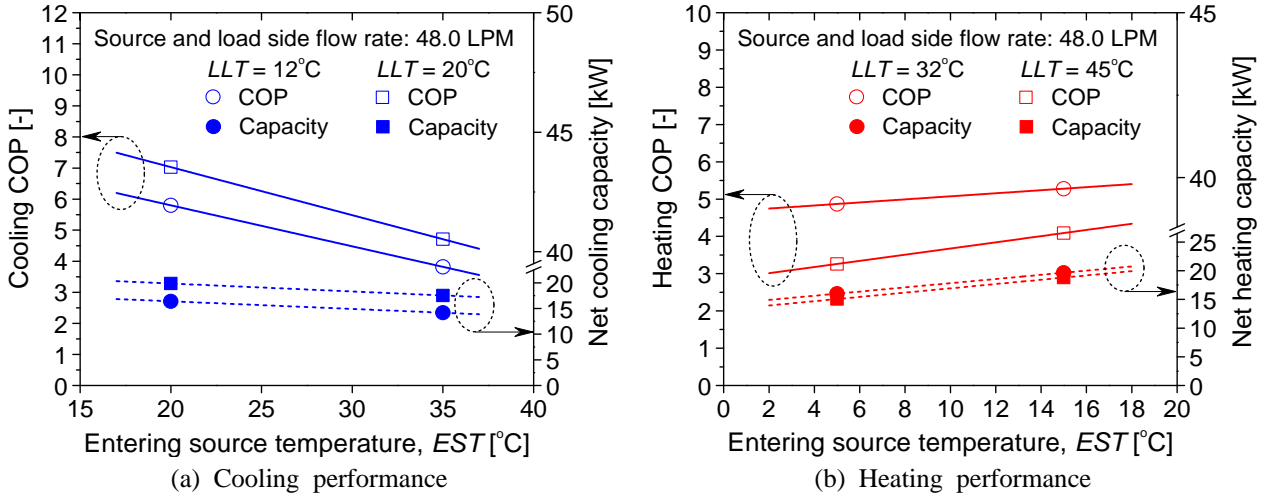


Fig. 2 Cooling and heating performance of geothermal heat pump used in this simulation study

이며, 현재 국내에서 주로 적용하는 방식이다. 지열 시스템이 기동(ON) 신호를 받으면, 실내 설정 온도에 따라 냉방 또는 난방 모드로 전환된다. 다음으로 열원과 부하 측 순환수 펌프들이 순차적으로 가동되고 이어서 지열 히트펌프가 가동된다. 이때 시스템 제어 프로그램의 설정 온도(본 연구에서는 냉방 7°C/난방 50°C)를 기준으로 히트펌프가 운전과 정지를 반복한다.

2.2 외기 온도 제어 방식

외기온 제어 방식(Control-B)은 실외 온도에 따라 버퍼 탱크의 냉온수 설정 온도에 변화를 준다는 점이 기존 방식과 다른 점이다.(Fig. 1(b)) 지열 히트펌프의 성능은 부하 측 공급 온도, 즉 히트펌프에서 건물로 나가는 온도(leaving load temperature, LLT)에 따라 변한다. 온수 온도(난방 운전)를 낮출 때 그리고 냉수(냉방 운전) 온도를 높일 때 히트펌프는 에너지를 덜 사용하기 때문에 냉난방 COP가 향상된다.(Fig. 2) 또한 건물 냉난방 부하는 외기 온도에 따라 비례(냉방)하거나 반비례(난방)한다. 그런데 기존 제어는 부하 크기에 상관없이 버퍼 탱크 온도를 일정하게 유지한다. 따라서 부하 크기에 따라 온수 온도를 낮추거나 또는 냉수 온도를 높이면 지열 시스템의 성능은 향상된다.

버퍼 탱크의 냉·온수 설정 온도 범위를 Table 1에 정리하였다. 난방 운전에서 외기 온도가 -15°C 이하로 떨어지면, 온수 설정 온도는 50°C로 기존 제어와 같다. 그리고 외기 온도가 올라가면 설정 온도를 낮

Table 1 Setting temperatures in buffer tank with outdoor air temperature range

Heating mode		Cooling mode	
Outdoor air temperature range	Hot water setting temperature	Outdoor air temperature range	Chilled water setting temperature
-15°C lower	50°C	21°C lower	13°C
-14.9°C ~ -10°C	48°C	21°C ~ 22°C	12°C
-9.9°C ~ -5°C	46°C	22°C ~ 23°C	11°C
-4.9°C ~ -0°C	44°C	23°C ~ 24°C	10°C
0.1°C ~ 5°C	42°C	24°C ~ 25°C	9°C
5.1°C ~ 10°C	40°C	25°C ~ 26°C	8°C
10.1°C ~ 15°C	39°C	26°C higher	7°C
15°C higher	38°C		

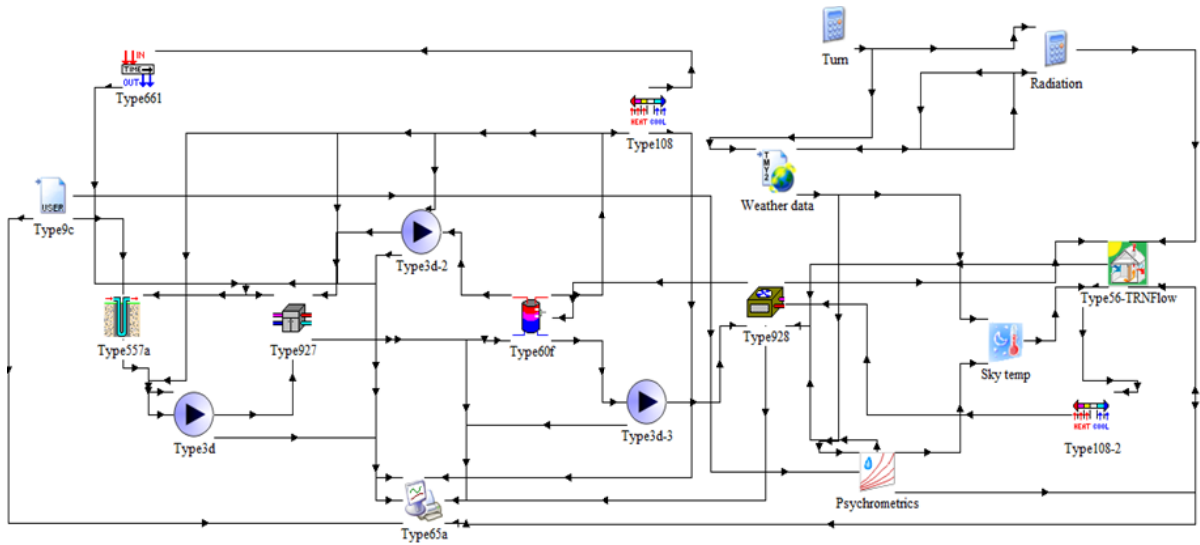


Fig. 3 System modeling built in TRNSYS

취 건물에 공급한다. 외기 온도가 15°C 이상이면서 난방이 필요할 경우, 온수를 38°C로 공급한다. 여기서 Table 1의 외기온 범위는 시뮬레이션을 위해 임의로 설정한 범위다. Fig. 2의 지열 히트펌프를 이용하여 실증용 시스템을 구축한 후, 외기온 제어 방식을 적용하여 성능을 측정하고 있다. 측정 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하면, 외기온 제어 방식의 가능성과 시뮬레이션 모델의 타당성을 검증할 수 있을 것이다. 이러한 검증 결과를 이용하여 외기온의 최적 범위를 도출할 예정이다.

3. 시스템 모델링과 시뮬레이션

시스템 모델링과 동적 시뮬레이션에 건물 에너지 해석 프로그램인 TRNSYS 17⁽⁴⁾을 이용하였으며, Fig. 3에 모델링 결과를 도시하였다. 그림에서 보듯이 지중열교환기(type 557a), 지열 히트펌프(type 927), 순환 펌프(type 3d), 대상 건물(type 56) 등으로 전체 시스템을 구성하였다. 여기에 외기 온도와 제어 알고리즘 등을 추가하였다. 모델링은 필요한 구성 요소를 선택한 후, TRNSYS의 Simulation Studio에서 요소들을 물리적으로 연결하는 작업이다. 이때 모든 요소에 대한 입력 정보와 요소 간 물리적 관계를 명확하게 파악하는 것이 중요하다.

지열 히트펌프를 포함한 시스템 구성 요소의 사양을 Table 2에 정리하였다. 지열 시스템에서 히트펌프는 에너지를 가장 많이 소비한다. 지열 히트펌프 모델링에 TRNSYS TESS Library의 type 927을 적용하였다. 이 모듈은 물 대 물 히트펌프의 모델링이 가능하다. 이때 Fig. 2의 성능 데이터, 즉 지중 순환수의 히트펌프 입구 온도

Table 2 Specification of GHP system in this simulation study

Components		Specification
Geothermal heat pump unit	Heating capacity [W]	15,400
	Cooling capacity [W]	15,600
Circulation pump in source side (ground heat exchanger)	Flow rate [LPM]	48
	Rated Power [W]	0.75
Circulation pump of between heat pump and buffer tank	Flow rate [LPM]	48
	Rated Power [W]	0.4
Circulation pump in load side (buffer tank to FCU)	Flow rate [LPM]	48
	Rated Power [W]	0.75
Buffer tank	Capacity [Liter]	300
Ground heat exchanger	Depth/number of boreholes	150 m/5 holes

(EST)와 부하 순환수의 히트펌프 입구 온도(ELT)에 따른 히트펌프 용량(capacity)과 COP, 전력 소비량, 유량 등을 입력하였다. 여기서 히트펌프 성능은 정격 조건에서 측정한 성능이다. 따라서 다양한 온도 조건에서 성능을 측정한 후, 시뮬레이션 결과와 비교할 필요가 있다. 대상 건물의 에너지부하 모델링에 type 56을 이용하였으며, 이때 건물(공간) 사양은 기존 문헌⁶⁾을 참고하였다. 참고로 이 건물에 외기온 제어 방식을 적용한 시스템을 설치하였다. 시뮬레이션 간격은 4분으로 설정하였다.

4. 결과 및 고찰

모델링 결과를 이용하여 지열 시스템의 냉난방 성능과 각종 온도 변화 등을 계산하였다. 이때 1년으로 시뮬레이션 기간을 설정하였다. 시뮬레이션 기간은 1년이지만 분석 결과를 쉽게 확인할 수 있도록 전체 결과에서 2월 결과만 본 논문에 도시하였다. Fig. 4는 기존 제어 방식(Control-A)을 적용했을 때, 버퍼 탱크의 온수 온도를 나타낸 그림이고, Fig. 5는 외기온 제어(Control-B)에 대한 결과다. 또한 두 그래프에서 시뮬레이션에 적용한 외기 온도와 버퍼 탱크 설정 온도도 함께 표시하였다. 두 결과에서 보듯이, 설정 온도에 따라 온수 온도(B/T 온도)는 변한다.

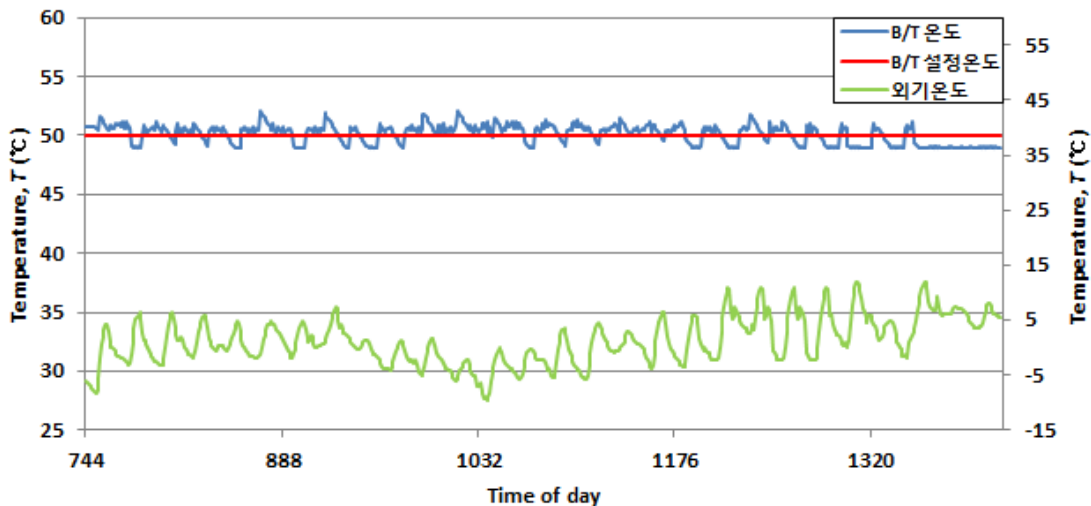


Fig. 4 Temperature variations with constant setting temperature of 50°C in buffer tank (Control-A)

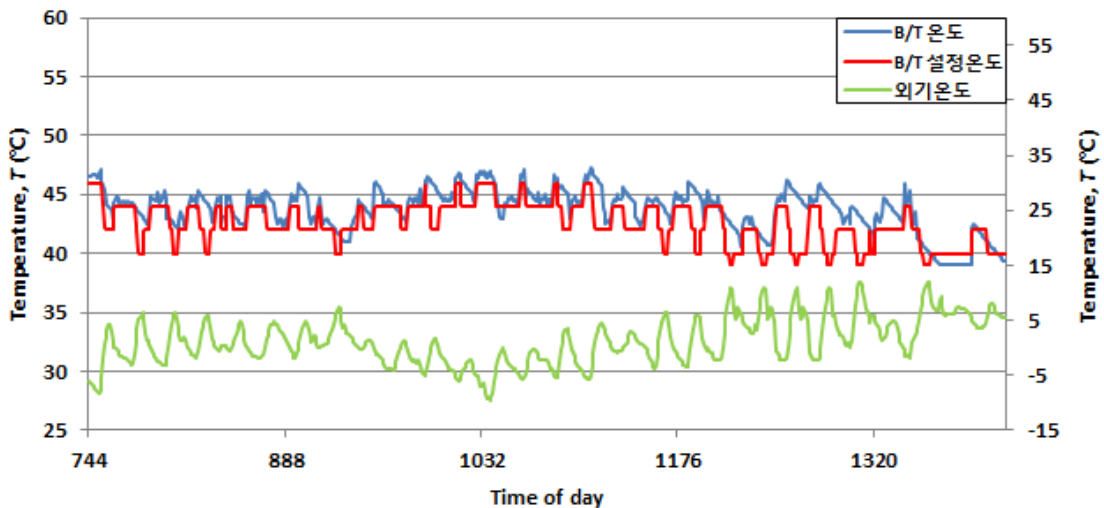


Fig. 5 Temperature variations with variable setting temperature in buffer tank (Control-B)

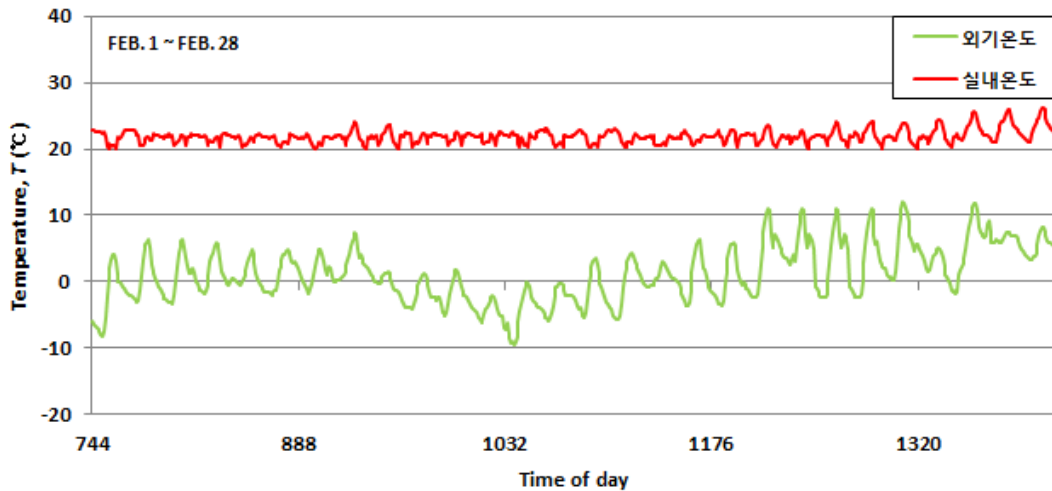


Fig. 6 Variation in indoor and outdoor air temperature using Control-A

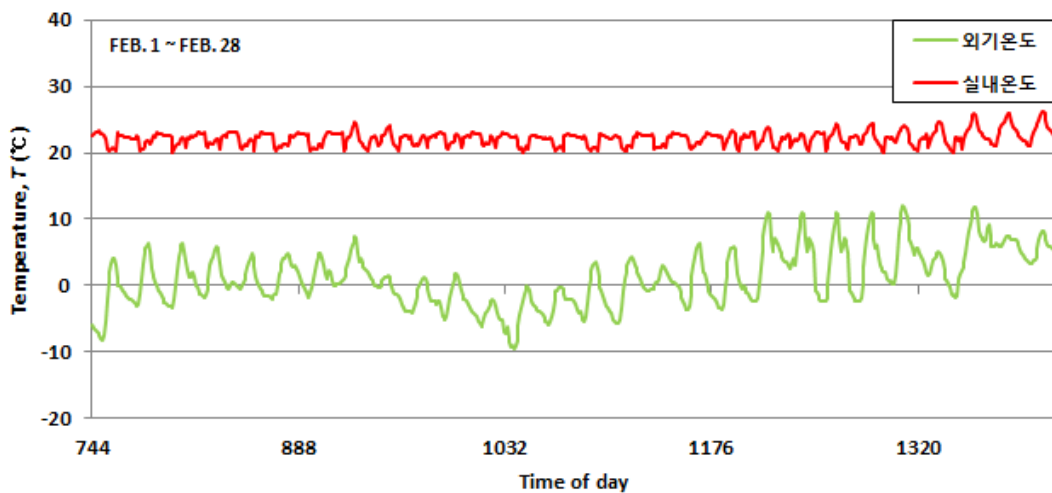


Fig. 7 Variation in indoor and outdoor air temperature using Control-B

기존 제어 방식에서 온수 온도는 설정 온도인 50°C 를 최대한 유지한다.(Fig. 4) 설정 온도와 함께 시스템 운전/정지 기준($50\pm 1^{\circ}\text{C}$)을 적용했기 때문에, 변화는 다소 있다. 반면, Fig. 5에서 보듯이, 외기온 제어 방식을 적용하면 버퍼탱크의 온수 온도는 외기 온도에 따라 변한다. 또한 설정 온도가 변하면서 온수 온도도 설정 온도를 따라 변하는 것을 확인할 수 있다. 참고로 2월 한 달 동안 외기 온도는 -10°C 에서 15°C 사에서 변화였다.

두 제어 방식이 대상 건물의 난방 부하를 감당할 수 있는지 확인하기 위해, 실내 온도 변화를 분석하였다.(Fig. 6과 Fig. 7) 앞선 결과와 마찬가지로 전체 결과 중 2월 한 달 결과만 제시하였다. 이때 난방 운전 중 실내 온도는 22°C 를 유지하는 것으로 설정하였다. 두 경우 모두 설정 온도를 전후로 실내 온도가 변화하였다. Fig. 7에서 보듯이 외기온 제어 방식도 실내 설정 온도인 22°C 를 잘 유지하기 때문에, 부하를 감당할 수 있는 것으로 판단하였다.

본 논문에 그림으로 제시하지는 않았지만, 외기온 제어 방식을 적용했을 때 히트펌프 전력 소비량을 7.7%(147 kWh 절감) 그리고 순환펌프 전력 소비량을 7.5%(28.1 kWh 절감) 줄일 수 있었다. 이는 기존 제어 방식은 건물 부하의 크기에 상관없이 냉·온수를 일정하게 공급하지만, 외기온 제어 방식은 부하에 따라 적절한 온도로 냉·온수를 공급하기 때문이다. 또한 냉난방 부하가 큰 기간보다, 버퍼 탱크의 온도를 낮

추거나 높일 수 있는 간절기에 더 효과적이었다. 참고로 간절기인 4월, 히트펌프 COP는 4.06에서 4.31로 6.4% 증가하였고, 10월에는 4.59에서 4.70으로 2.44% 증가하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 기존 제어 방식과 외기온 제어 방식이 지열 히트펌프 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 상용 소프트웨어를 이용하여 지열 히트펌프 시스템의 모델을 구축한 후, 동적 시뮬레이션을 수행하였다. 외기온 제어 방식을 적용하면 지열 히트펌프 시스템의 전력 소비량은 감소하며 이는 시스템 COP 향상으로 이어졌다. 실내 설정 온도를 같게 유지하는 조건(22℃)에서 외기온 제어 방식은 기존 방식보다 히트펌프 전력 소비량을 7.7%(147 kWh 절감) 그리고 순환펌프 전력 소비량을 7.5%(28.1 kWh 절감) 줄일 수 있었다. 또한 외기온 제어 방식은 버퍼 탱크 안의 냉·온수 온도를 외기 온도에 따라 제어하기 때문에, 간절기 때 더 효과적이었다. 간절기인 4월, 히트펌프 COP는 4.06에서 4.31로 6.4% 증가하였고, 10월에는 4.59에서 4.70으로 2.44% 증가하였다. 본 연구는 외기 온도 범위와 이에 부합하는 냉·온수 설정 온도를 임의로 설정하였다. 따라서 온도 범위와 설정 온도에 대한 최적화 분석을 수행할 예정이다. 아울러 히트펌프 성능 시험 데이터와 실제 측정 결과를 비교한 후, 최종적으로 시뮬레이션 결과와 비교할 예정이다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 20133010111750)

참고문헌 (References)

- (1) Atam, E. and Helsen, L., 2016, "Ground-Coupled Heat Pumps: Part 1 - Literature Review and Research Challenges in Modeling and Optimal Control," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 54, pp. 1653~1667.
- (2) Cervera-Vazquez, J., Montagud, C. and Corberan J. M., 2015, "In Situ Optimization Methodology for Ground Source Heat Pump Systems: Upgrade to Ensure User Comfort," *Energy and Buildings*, Vol. 109, pp. 195~208.
- (3) Jung, Y., Jo, J., Kim, Y. and Cho, Y., 2014, "A Study on the Geothermal Heat Pump System Performance Analysis According to Water Flow Rate of the Geothermal Water Circulation Pump," *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 34, No. 6, pp. 103~109.
- (4) Klein, S., Beckman, W., Mitchell, J., Duffie, J., Duffie, N. and Freeman, T., 2008, TRNSYS 17-A Transient System Simulation Program, Madison, Wisconsin, USA.
- (5) Kong, H. J., Kang, S. J., Yun, K. S. and Lim, H. J., 2013, "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.