

스탠딩컬럼웰(SCW)을 적용한 지열히트펌프의 성능에 대한 매개변수 연구 A parametric study on the performance of heat pump using standing column well(SCW)

장재훈¹⁾, Jae-Hoon Chang, 박두희²⁾, Duhee Park

¹⁾ 한양대학교 건설환경공학과 석사과정, Graduate Student Post doctoral researcher, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

²⁾ 한양대학교 건설환경공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

SYNOPSIS : Parametric study was performed using the SCW numerical model for evaluating the performance of the SCW. The five ground related parameters, which are porosity, hydraulic conductivity, thermal conductivity, specific heat, geothermal gradient, and five SCW design parameters, which are pumping rate, well depth well diameter, dip tube diameter, bleeding rate, were used in the study. Numerical simulations were performed for short-term (24-hour) simulation. The study results indicate that the parameters that have important influence on the performance of SCW were hydraulic conductivity, thermal conductivity, geothermal gradient, pumping rate, and bleeding rate. Overall, this study showed that various factors had a cumulative influence on the performance of the SCW, and a numerical simulation can be used to accurately predict the performance of the SCW.

Keywords : Standing column well, Geothermal heat pump, Numerical analysis, Design parameters, Parametric study

1. 서론

최근 들어 에너지 과일, 지중 열원 히트펌프, 지하수 열원 히트펌프 등 다양한 형태의 지열 히트펌프들이 도심지역 주거건물의 냉·난방 시스템으로 각광을 받고 있다. 이중 지하수 열원 히트펌프는 지하수의 열을 에너지화하는 시스템으로 에너지 효율, 설치공사비용 및 설치면적 등이 우수하여 여러 가지 측면에서 실용화에 근접한 지열 히트펌프 시스템이다. 지하수 열원 히트펌프 시스템 중 가장 보편적인 방식은 스탠딩컬럼웰(이하 SCW)이며 이는 심정에서 지하수를 펌핑하여 열을 추출 배출한 후, 이를 동일한 심정에 다시 방출하는 방식으로 현재 해외에서 활용실적이 크게 증가하고 있는 추세이다.

국내에는 지하수가 풍부하며 지하수위가 높으며 기반암층 심도가 낮아 SCW를 적용하기에 이상적임에도 불구하고 SCW 관련된 활용 및 연구 실적이 제한적이며 설계기준이 아직 정립되지 않았다. SCW을 보다 널리 활용되기 위해서는 SCW의 성능에 미치는 요소들을 규명하며, 각각의 영향 정도를 평가하며 이를 기반으로 가장 이상적인 설계기준이 도출되어야 한다. 본 연구에서는 수치적 모델을 이용한 매개변수연구를 수행하여 SCW 성능에 중요한 영향을 미치는 변수를 산정하였으며 각각의 영향 정도를 분석하였다.

2. 매개변수 연구

본 연구에서 수행된 매개변수 연구에서는 SCW의 성능에 영향을 미치는 변수들의 중요도를 평가하고자 단시간 연속(24시간) 시뮬레이션을 수행하여 각각의 영향정도를 평가하였다.

매개변수에서는 검증된 SCW 수치적 모델을 사용하였다. 매개변수에 사용된 SCW 시스템의 해석 영역과 요소망은 그림 1에 도시하였다. 해석 반경은 160m이며 수직방향 영역은 심정 심도 + 50m이다. 지하수위는 지표면에 위치한다고 가정하였다. 해석에 사용된 심정 심도, 유입관 직경은 해석 별로 다르게 적용하였으되 유출관의 단면은 고정하였다. 유출관은 동반논문(박두희 등, 2009)에서와 같이 링 형상으로 모델링 하였으며 두께는 7mm를 적용하였다(등가직경 = 외경 68mm, 내경 61mm, 벽두께 = 7mm). 유출관 입구는 지하수위(지표면)로부터 2m 하부에 위치하며 유입관 입구는 심정 저부 2m 위에 위치한다.

연구에 적용된 매개변수는 공극률, 수리전도도, 열전도도, 비열, 지열경사, 유량, 심정심도, 심정 직경, 유입관 직경, 블리딩율 등이다. 지반의 단위중량과 심정 벽면 표면거칠기는 각각 2.7 kN/m^3 과 1.5mm로 가정하였다. 해석에서 유입관 및 유출관의 물성은 고밀도 폴리에틸렌 소재의 물성을 적용하였으며 밀도, 비열, 열전도율은 각각 952kg/m^3 , $1670\text{J/kg}^\circ\text{C}$, $0.22 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ 이다.

SCW 운영 시 유출수의 온도는 유입수의 온도에 의하여 결정되며 이는 가동시간에 따라서 변화하므로, 매개변수 연구에서는 유출수와 유입수 온도간의 상호관계를 모사한 해석을 수행하였다. 의령 체육센터에 설치된 SCW 계측자료에 의하면 유출수와 유입수간의 온도차는 대략 7°C 인 것으로 나타났다. 즉, 펌핑된 순환수가 열교환기를 통과하면 난방모드에서는 7°C 만큼의 열을 배출되어 온도가 낮아지게 되며 냉방모드에서는 7°C 열을 추출하여 그만큼 온도가 상승하게 된다. 매개변수 연구에서는 유출수의 온도를 심정 하부에서 펌핑된 순환수의 온도에서 냉난방 모드에 따라서 7°C 만큼 가감하였다. 여기서 7°C 는 절대적인 수치가 아닌 평균값이며 냉·난방 모드, 히트 펌프 종류, 유입수 온도에 따라서 변화할 수 있으나 본 연구에서는 이를 고정하였음을 밝혀둔다.

매개변수 연구는 전술한 바와 같이 SCW의 성능에 영향을 미치는 변수들의 중요도를 평가하고자 단시간(24시간) 시뮬레이션을 수행하였다. 매개변수 연구에 적용된 변수는 지반환경과 관련된 변수 5개(공극률, 수리전도도, 열전도도, 비열, 지열경사)와 설계변수 5개(유량, 심정심도, 심정 직경, 유입관 직경, 블리딩율) 총 10개이며 이들은 표 1에 정리하였다. 표 1에서 각각 매개변수의 기준값은 회색바탕으로 차별화하였다.

해석에 사용된 지반환경 변수들은 국내외 포괄적인 자료조사를 기반으로 선정되었다. 암반의 공극률은 Hellstrom(1991)과 이인모(2001)의 자료를 근거로 2.5% 부터 40.0%까지 총 4개를 적용하였으며 기준값으로는 10.0%를 적용하였다. 암반의 수리전도도는 농어촌진흥공사(1996), 이인모(2001), Goodman(1989) 자료에 근거하여 $1.0 \times 10^{-3} \text{ m/s} \sim 1.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 를 적용하였다. 수리전도도는 총 5가지 값을 변수로 적용하였으며 기준값으로는 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 를 사용하였다. 암반의 열전도도는 송윤호 등(2008)의 자료를 기반으로 $2.5\text{W/m}^\circ\text{C}$, $3.5\text{W/m}^\circ\text{C}$, $4.5\text{W/m}^\circ\text{C}$, $5.5\text{W/m}^\circ\text{C}$ 총 4가지 값을 채택하였으며 기준값으로 $3.5\text{W/m}^\circ\text{C}$ 을 적용하였다. 암반의 비열은 선행 연구자(권오일 등, 2006; 최병윤, 2004; Hellstrom, 1991; Salomone 등, 1989)의 자료를 토대로 $800\text{J/kg}^\circ\text{C}$ 를 기준값으로 사용하였으며 600부터 1200 $\text{J/kg}^\circ\text{C}$ 까지 총 4종류를 적용하였다. 지열경사 범위는 선행 연구자(송윤호 등, 2008; 이영민 등, 2006; 한정상 등, 2006) 자료를 기초로 기준값으로 0.025°C/m 를 적용하였으며, 0.015°C/m 와 0.035°C/m 를 추가적으로 적용하였다.

유량, 심정심도, 심정 직경, 유입관 직경 등의 설계변수들은 실제 SCW 시스템에서 사용되는 일반적인 수치를 적용하였다. 유량은 1.5, 2.0, 3.0, 4.5kg/s 4가지(기준: 3.0kg/s)를 적용하였다. 심정 심도는 국내에서 일반적으로 적용하는 심도 350m를 기준값으로 적용하였으며 이에 250, 300, 400m 3가지 경우를 추가하여 영향을 평가하였다. 심정 직경은 150, 175, 200mm 3가지를 해석에 적용하였으며(기준: 200mm) 유입관 직경은 75, 100, 120mm(기준: 100mm)를 적용하였다. 국내에서는 블리딩을 적용한 사례가 제한적이므로 기준은 0%를 적용하였으며 10%, 20%, 30% 총 4개의

블리딩율을 적용하였다. 기준값을 포함하여 총 29개의 매개변수 대한 해석이 수행되었으며 난방 모드와 냉방 모드 두 개의 모드를 적용하여 총 58회의 해석이 수행되었다.

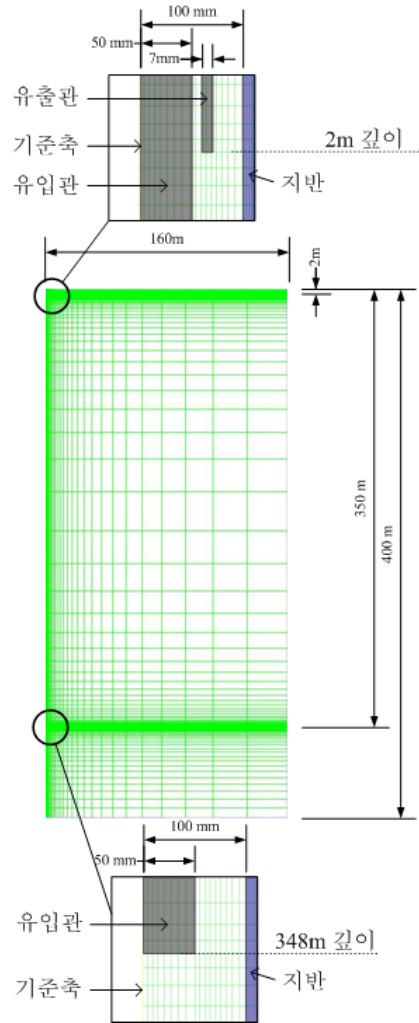


그림 1. 매개변수연구에 사용된 해석영역과 요소망(기준값 적용)

표 1. 1차 매개변수 연구에 사용된 변수값들

매개변수	단위	Case				
		1	2	3	4	5
공극률	%	2.5	10	20	40	
수리전도도	m/s	1×10^{-9}	1×10^{-6}	1×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-3}
열전도도	W/m-°C	1.5	3.5	4.5	5.5	
비열	J/kg-°C	600	800	1000	1200	
지열경사	°C/m	16 + 0.015×깊이	16 + 0.025×깊이	16 + 0.035×깊이		
유량	kg/s	1.5	2	3	4.5	
심정 심도	m	250	300	350	400	
심정 직경	mm	150	175	200		
유입관 직경	mm	75	100	120		
블리딩율	%	0	10	20	30	

3. 매개변수 연구 결과

매개변수 연구결과는 그림 2에 도시하였다. 그림 2는 24시간 가동 후 계산된 유입수의 온도를 나타낸다. 기준값들을 적용하였을 경우 계산된 유입수의 온도는 9.5°C로 350m 심도에서의 초기 온도인 23°C에 비하여 13.5°C 감소하였다. 계산된 유입수의 총 범위는 2 - 10 °C이었다. 냉방모드에서 계산된 유입수 온도는 기준값을 적용하였을 경우 32°C이었으며 이는 초기 온도에 비하여 9°C 상승한 수치이다.

다음에는 매개변수 각각의 영향정도를 분석하였다. 먼저, 지반환경과 관련된 변수들의 영향을 조사하였다. 공극률은 SCW의 온도변화에 영향이 매우 미비한 것으로 나타났다(그림 2a). 비열의 경우, 비열이 증가함에 따라 난 냉방 모드에서 각각 유입수의 온도가 증가 감소하여 결과적으로 SCW의 성능이 향상되는 것을 볼 수 있다(그림 2b). 하지만, 비열의 영향정도는 크지 않은 것으로 나타났다. 그림 2c는 수리전도도에 따른 유입수의 온도 차이를 도시하였다. 수리전도도는 10^{-9} - 10^{-5} m/s까지는 영향정도가 제한적이지만 10^{-4} m/s 이상인 경우에만 결과에 영향을 며 10^{-3} m/s에서는 영향이 매우 큰 것을 알 수 있다. 난 냉방모드에서 10^{-3} m/s에서의 온도는 10^{-9} m/s에 비하여 각각 200% 상승 및 18% 하강하여 성능이 크게 향상되는 것으로 나타났다. 그림 2d는 열전도도의 영향을 나타낸다. 열전도도가 1.5에서 5.5W/m-°C까지 증가하면서 난방모드에서 유입수의 온도는 4.3°C에서 10.5°C로 약 2.5배 증가하였다. 지열경사가 증가할수록 지중의 온도가 증가하므로 난방모드와 냉방모드에서 유입수의 온도변화에 큰 영향을 미치는 것으로 계산되었다(그림 2e).

다음은 SCW 설계변수의 영향을 분석하였다. 설계변수 중 심정 심도(그림 2f), 유량(그림 2g), 블리딩율(그림 2j)은 주목할만한 영향을 미치는 반면 심정 직경(그림 2h)과 유입관 직경(그림 2i)은 영향이 미비한 것으로 나타났다. 심정 심도는 지열경사와 마찬가지로 난방모드에서 큰 영향을 미치며 냉방모드에서는 상대적으로 영향이 작은 것으로 나타났다. 유량이 증가하면 심정 내 수직방향 유속이 증가하여 심정 내 잔류시간이 줄어들어서 열교환이 충분하게 이루어질 수 없어서 효율이 감소하게 된다. 블리딩의 경우 온도변화에 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

종합해보면 SCW의 성능에 중요한 영향을 미치는 매개변수는 열전도도, 수리전도도, 지열경사 등의 3개의 지반변수와 심정심도, 유량, 블리딩율 등의 3개의 환경변수로 나타났으며 공극률, 비열, 심정직경, 유입관 직경은 SCW의 성능에 미치는 영향이 적은 것으로 나타났다.

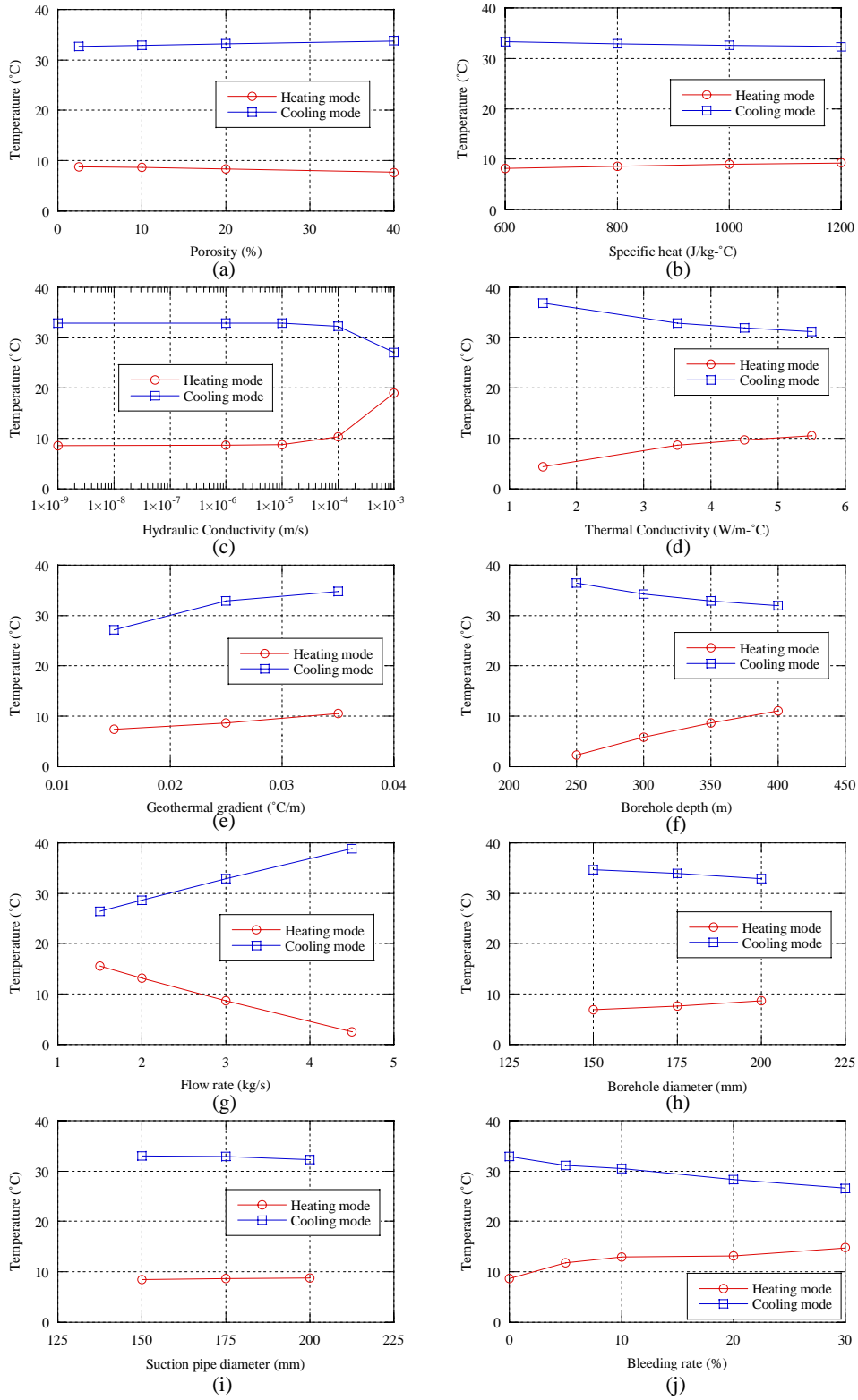


그림 2. 매개변수 연구 결과

4. 결론

본 논문에서는 SCW 수치해석 모델을 이용한 포괄적인 매개변수연구를 수행하였다. 매개변수연구에는 공극률, 투수계수, 열전도도, 비열, 지열경사 등 5개의 지반환경변수와 유량, 심정심도, 심정직경, 유입관 직경, 블리딩율의 설계변수가 적용되었다. 수치해석은 SCW의 24시간 연속가동을 모사하여 수행되었다. 연구 결과 SCW 성능에 중요한 영향을 미치는 변수는 열전도도, 수리전도도, 지열경사, 유량, 심정 심도, 블리딩율인 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 권오일, 백용, 서용석, 임성빈 (2006), "국내 기온분포와 암중에 따른 암반의 열화심도 추정에 관한 연구", *한국지반환경공학회 학술발표회논문집*, pp.135-140.
2. 농어촌진흥공사 (1996), *한국지하수총람*, 농어촌진흥공사, 의왕, p.1097.
3. 송윤호, 김형찬, 심병완, 김형수 (2008), *지하 열 자원 부존·활용 정보 시스템 구축*, 2005-R-GH01-P-01, 지식경제부, 과천, pp.44-56.
4. 이영민, 김형찬, and 송윤호 (2006), "시추공 온도자료를 이용한 고기후 연구에 대한 개관", *자원환경지질*, Vol. 제39권, No. 제1호, pp.95-102.
5. 이인모 (2001), *암반역학의 원리*, 새론, 서울, p.372.
6. 최병윤 (2004), "국내 열펌프 보급의 문제점 및 해결방안", *대한설비공학회 강연회 및 기타간행물*, pp.89-113.
7. 한정상, 한혁상, 한찬, 김형수, 전재수 (2006), "수주지열정(SCW)을 이용한 천부지열 냉난방시스템 설계지침", *자원환경지질*, Vol. 39, No. 5, pp.607-613.
8. Goodman, R.E. (1989), *Introduction to Rock Mechanics*, Wiley, p.562.
9. Hellstrom, G. (1991), *Ground Heat Storage. Thermal Analyses of Duct Storage Systems - Theory*, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.
10. Salomone, L., and Marlowe, J. (1989), "Soil & Rock Classification for the Design of Ground Coupled Heat Pump Systems: Field Manual", Special Report EPRI CU-6600, Electric Power Research Institute.