

스탠딩칼럼웰(SCW)을 적용한 지열히트펌프의 수치적 모델링과 검증 A numerical simulation and validation 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 : Geothermal energy is gaining wide attention as a highly efficient renewable energy and being increasingly used for heating/cooling systems of buildings. The standing column well (SCW) is especially efficient, cost-effective, and suitable for Korean geological and hydrological conditions. However, a numerical model that simulates the SCW has not yet been developed and applied in Korea. This paper describes the development of the SCW numerical model using a finite-volume analysis program. The model performs the hydro-thermal coupled analyses and simulates heat transfer through advection, convection, and conduction. The accuracy of the model was verified through comparisons with field data measured at SCWs in Korea. Comparisons indicated that the SCW numerical model can closely predict the performance of a SCW.

Keywords : Standing column well, Geothermal Heat Pump, Numerical model, Hydro-thermal coupled analysis, Finite-volume method

1. 서론

지열은 고효율 신재생에너지로 각광을 받고 있으며 건축물의 냉난방 설비 시스템으로 활용이 점차 확산되고 있다. 이중 지하수 열원 히트펌프인 스탠딩칼럼웰(SCW)은 에너지 효율, 설치공사비용 및 설치면적 등이 우수하여 여러 가지 측면에서 실용화에 가장 근접한 지열 히트펌프 시스템이며 현재 해외에서 활용실적이 크게 증가하고 있는 추세이다. 이중 지하수 열원 히트펌프인 스탠딩칼럼웰(SCW, Standing Column Well)은 에너지 효율, 설치공사비용 및 설치면적 등이 우수하여 여러 가지 측면에서 실용화에 가장 근접한 지열 히트펌프 시스템이며 현재 해외에서 활용실적이 크게 증가하고 있는 추세이다. SCW는 단일 수직 심정에서 지하수를 뽑아서 히트펌프에 통과시켜 열을 추출 배출한 후, 이를 동일한 심정에 다시 재주입하는 방식이다. 국내는 일반적으로 기반암 심도가 얕고(대략 50m 미만) 지하수위가 높으며(지표면으로부터 약 5~10m, 국가 지하수정보센터 자료: <http://www.gims.go.kr>), 지하수량이 풍부하여 SCW를 적용하기 위한 이상적인 조건을 가지고 있다(한정상 등, 2006). 반면 현재 국내에는 SCW 관련된 활용 실적이 많지 않고 연구 성과 또한 미비한 실정이다. SCW의 활용 증대를 위해서는 광범위한 계측결과와 수치해석 결과를 기초로 국내지반특성을 반영한 설계기준이 수립되어야 하지만 아직 현장계측결과도 부족하고 수치해석모델 또한 개발되어 있지 않는 상황이다. 본 연구에서는 SCW 성능을 평가하기 위한 수치해석 모델을 구축하였다. 구축된 SCW 수치해석 모델의 정확성은 국내 의령에서 계측된 데이터를 통하여 검증하였다.

2. 스탠딩컬럼웰(SCW, Standing Column Well)의 메커니즘

SCW는 깊이가 약 300 m 정도로 일정깊이 이하에서 연중 온도가 일정한 지하열원을 이용하는 시스템이다. 히트펌프를 이용하여 여름에는 지상에 비해 상대적으로 차가운 지중 수직심정에 냉각수를 순환, 냉각시켜 냉방을 하며 겨울에는 순환수에 의해 따뜻한 지중열을 흡수하여 난방을 하게 된다. 그림 1은 SCW를 개략적으로 도시한 구성도이다. 그림 1에서와 같이 단일심정의 지표면 부근에 유출관(Discharge tube)을 설치하고 심정의 바닥부분에 히트펌프로의 유입관(Suction tube)을 설치하여 냉각수를 순환시키는 방식이다. 이때, 유입관으로부터 히트펌프로 펌핑되는 지하수를 유입수라고 하며 유출관으로 방출되는 물을 유출수라고 한다. 유입수와 유출수를 통합하여 순환수라고 한다. 심정내에서 물이 유출관으로부터 유입관까지 이동하는 동안 지하수와 심정의 벽체간에 열이동이 일어나며 이 열전달에 의해 SCW는 에너지를 얻게된다. 겨울에는 지상에 비해 상대적으로 따뜻한 순환수를 채수하여 히트펌프의 열교환기를 통과시킨 후 온도가 상승한 냉매의 열에너지는 난방용으로 이용하고 열이 추출되어 차가워진 순환수는 심정으로 환수된다. 여름에는 반대로 냉방용으로 이용되며 열이 흡수되어 따뜻해진 순환수로 재주입된다.

심정내의 온도가 과도하게 상승하거나 떨어지면 SCW를 멈추거나 일부분의 유출수를 심정 외부로 배출하여 온도를 조절할 수 있으며 이를 블리딩(bleeding)이라 한다. 블리딩을 하게 되면 유입수가 유출수보다 많아져 심정 내에 압력차가 증가하여 심정 내부로 지하수의 흡입이 증가하여 열교환이 더욱 활발해진다.

이와 같이 SCW를 모델링하기 위해서는 전술한 다양한 열교환 메커니즘을 모사해야 한다. SCW의 수치해석 모델은 여러 연구자들에 의해 개발되었다(Braud 등, 1983; Deng, 2004; Mikler, 1993; Oliver 등, 1981; Orio, 1995; Rees 등, 2004).

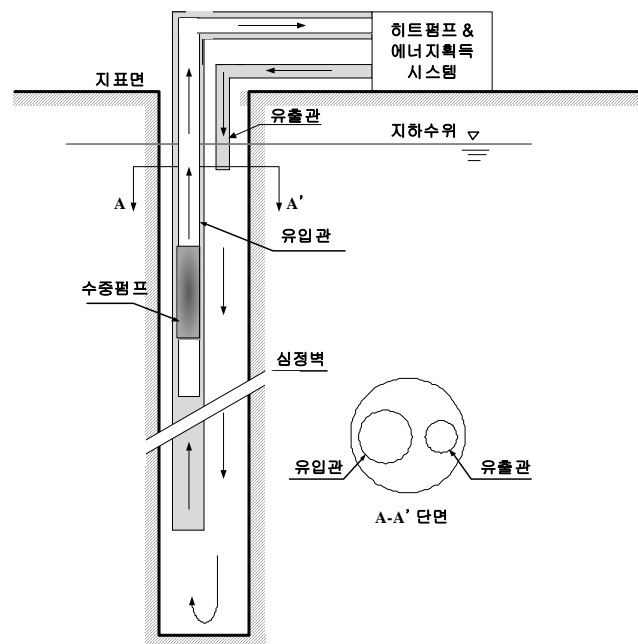


그림 1. 스탠딩컬럼웰의 개략도

3. SCW 시스템 수치해석 모델

3.1 재료 모델 및 경계 조건

SCW 시스템의 수치 모델은 심정과 심정을 둘러싼 지반 두 구역으로 구성되어 있다. 심정은 모델 중앙에 위치하며 심정경계, 유입관, 유출관, 유입구, 유출구로 구성되어 있다. 지반은 다공성 매체(porous

medium)로 모델링 하였고 지하수위는 지표면에 위치하는 것으로 가정하였다. 실제의 우물관 내 유입관 및 유출관의 단면형상은 그림 2a와 같지만 축대칭 해석을 수행하기 위해서 유입관과 유출관의 형상을 그림 2b와 같이 수정하여 나타내었다. 수정된 유출관은 링 형상이며 실제 형상과는 다르지만 실제 유출관의 단면적과 동일하도록 링의 두께를 결정하였다. 수치 모델의 측면, 상부 및 하부 경계면은 압력 입력 경계를 적용하였고 지표면에서의 전체수두는 대기압으로 초기화하였다. 지반의 온도는 주어진 지열 경사에 상응하도록 초기 온도 경계조건을 적용하였다. 지반 입력물성은 수리전도도, 열전도도, 밀도, 비열 및 공극률이며, 파이프의 입력물성치는 밀도, 비열, 열전도도이다. SCW 설계변수는 심정 심도, 심정 직경, 유입 및 유출관의 직경, 유입 및 유출구의 심도이다. 심정과 주변지반에서의 물의 흐름은 유입관과 유출관의 유량을 적용함에 따라 활성화된다. 블리딩을 사용하지 않을 경우에는 유입관—유출관의 유량을 동일하게 적용하며, 블리딩을 적용할 경우에는 유출관의 유량을 블리딩울만큼 감소시켜 유입수의 양을 상대적으로 크게 적용하여 지하수의 흡입량을 증가시킨다. 해석 시, 유입구의 유입유량과 유출구의 유출수 온도 및 유출유량을 경계조건으로 적용하였으며 이로 인한 유입구의 유입온도를 계산하였다.

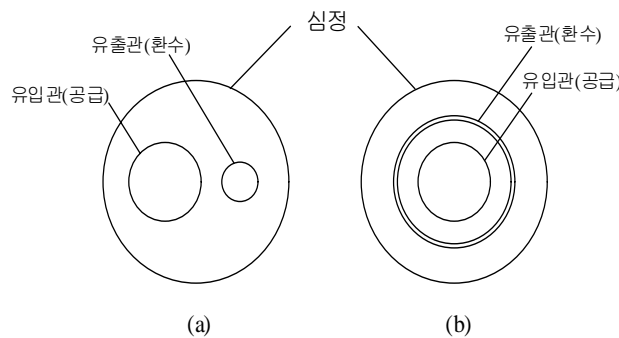


그림 2. SCW 단면 (a) 실제형상, (b) 축대칭해석에서 적용된 등가환산형상

3.2 수치 해석 모델링 검증

본 연구에서 제안된 수치해석 모델의 정확성을 검증하기 위하여 국내 의령 체육진흥센터에 설치된 SCW의 현장 계측 데이터와 수치해석 결과를 비교하였다. 그림 3은 체육진흥센터 SCW의 개략적인 단면을 나타낸다. SCW의 심도는 350m이며 심정의 직경은 45m까지는 약 25cm이며 이후에는 17.5cm로 줄어든다. 지하수위는 약 18m이며 연암층 심도인 20m까지 케이싱이 설치되었다. 유출구와 유입구의 깊이는 각각 18m 와 345m 이다. 지반구성은 인접 관측정 자료(국가 지하수정보센터 자료: <http://www.gims.go.kr>)를 근거로 산정하였다. 대상지반은 심도 20m 하부는 대부분 세일로 구성된 암반이다. 심도 18~20m까지는 풍화암, 풍화암 하부로 약 53m까지는 연암, 그리고 그 하부는 경암으로 분류되었다. SCW 심정, 유입관, 유출관의 물성은 표 1에 정리하였다.

그림 4는 시스템의 2D 축대칭 수치해석을 위한 해석영역과 요소망을 보여준다. SCW 수치해석에서는 지하수위 하부만 모델링하였다. 따라서 유출구의 위치는 해석영역에서는 심도 2m이며 심정 심도는 332m가 된다. 유입구는 심정 저면으로부터 5m 위에 위치한다. 해석영역의 반경방향 폭은 160m이며 수직방향 길이는 362m이다. 2D 축대칭 해석에는 총 22873개의 8절점 사각형 요소가 사용되었다.

지반에 적용된 물성치는 표 2에 정리하였다. 세일의 열전도도는 송윤호 등(2008)의 자료를 근거로 2.5 ~ 5.8W/m-°C를 적용하였다. 퇴적암인 세일은 심도에 따라서 공극률이 감소하며 열전도도가 증가할 것으로 예측하여 풍화암층에는 2.5W/m-°C를 적용하였으며 연암층과 경암층에는 각각 3.5와 4.5W/m-°C를 적용하였다. 지반의 수리전도도는 의령 지역 관측정의 계측자료를 이용하였으며(국가 지하수정보센터 자료: <http://www.gims.go.kr>), 비열, 비중 및 공극률은 Hellstrom(1991)이 제안한 세일의 대표값을 적용하였다.

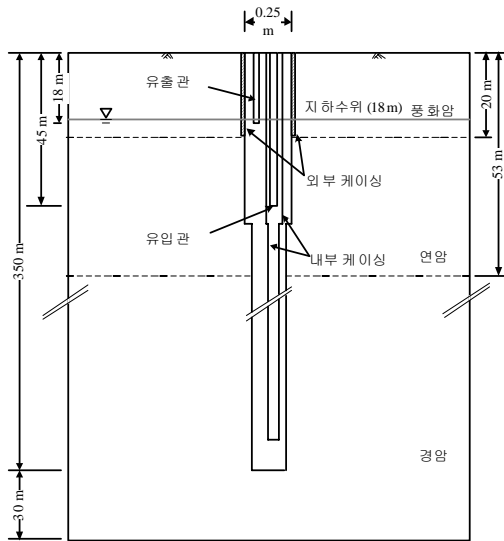


그림 3. 의령 체육진흥센터 SCW 개략도

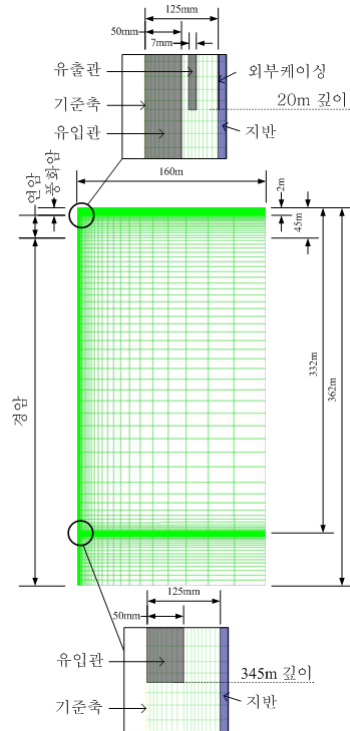


그림 4. 의령 체육진흥센터 자료 검증에 적용된 해석영역과 요소망

표 1. 의령군 현장 계측 데이터 검증에 적용한 심정과 유입, 유출관의 치수 및 물성치

	심정	유출관	유입관/유출관
깊이	350m	2m	345m
지름	250mm	60mm	100mm
벽두께	—	5.5mm	5.5mm
열전도도	—	0.22W/m-°C	0.22W/m-°C

표 2. 의령군 현장 계측 데이터 검증에 적용한 지반의 열적 및 수리적 물성치

열적 물성			수리적 물성	
열전도도 (W/m-°C)	풍암	2.5	수리전도도 (m/s)	3.52×10 ⁻⁷
	연암	3.5		
	경암	4.5		
지열경사	T(°C) = 16.0+0.0225×depth(m)		공극률(%)	5.25
밀도	2.7kN/m ³		비중(m ⁻¹)	1×10 ⁻⁵
비열	1000J/kg-°C		—	—

의령 체육진흥센터 SCW의 가동시간은 평균 10시간/일이다. 해석 시에는 측정된 유출수의 온도를 심정 내에 위치한 관 입구의 온도라고 가정하여 입력자료로 적용하였으며 이로 인한 유입수의 온도 변화를 계산하였다. 신뢰성 있는 비교분석을 위해 계측자료 중에서 가장 연속적인 데이터를 선택하여 검증에 사용하였다. 사용된 계측치는 냉방 모드의 경우 2008년 6월 5일 9시부터 22시까지 13시간 동안 측정된 데이터가 이용되었고, 난방 모드의 경우 2008년 11월 4일 23시부터 2008년 11월 5일 9시까지 10시간 동안 계측된 자료가 이용되었다. 시스템 상에서 시간별 펌프유량은 관측되지 않았으므로 평균 펌프 용

량(180l/min 3kg/s)을 해석유량으로 적용하였다.

계측된 데이터와 수치해석결과는 그림 5에 비교하였다. 난방모드의 경우 그림 5a와 같이 가동이 지속됨에 따라 유출수의 온도가 감소하고 또한 시스템의 효율이 저하되면서 유입수의 온도가 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다. 계측된 유입수의 온도와 해석결과는 100분 이후에는 매우 유사한 것으로 나타났다. 즉, 계측치와 해석결과는 가동시간이 경과됨에 따라 점점 근접해가며 200분 이후에는 1°C 이내의 차이를 보여준다. 냉방모드(그림 5b)에서는 SCW 가동에 따라 유출수의 온도가 증가하고 시스템 내의 온도 또한 열교환에 의해 증가하므로 유입수의 온도도 시간경과에 따라서 지속적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 현장에서 측정된 유입수의 온도와 계산된 수치는 초기에는 상당한 차이를 보이지만 200분 이후에는 매우 유사한 것을 확인할 수 있다.

SCW 시스템은 실제 냉·난방의 목적으로 사용될 때 연속적으로 가동되는 것이 아니라 일반적으로 하루 중 일정시간 동안만 가동되며 나머지 가동중지 기간 중에는 온도를 회복하게 된다. 이와 같은 가동—중지를 반복하는 장기거동을 수치해석 모델이 정확하게 모사할 수 있는지를 평가하기 위하여 계측 데이터 중 2008년 11월 6일 23시부터 11월 10일 9시까지 총 4일간 평균 10시간/일 가동되는 난방구간을 선택하여 동일한 조건으로 수행한 수치해석결과와 비교해 보았다. 그림 6에는 계측된 유입수 유출수 온도와 수치해석으로 계산된 유입수 온도를 비교하였다. 그림 6의 공백구간은 가동중지 기간을 나타낸다. 가동기간 중에는 온도가 하강하지만 가동이 중지된 시간 동안 어느 정도 지하수 및 주변지반의 온도가 회복되어 초기온도에 가깝게 상승하는 것을 볼 수 있다. SCW 가동에 따라서 이와 같이 온도 하강 회복 패턴이 반복되게 된다. 그림 6은 수치해석 모델이 펌프 중지기간 동안 시스템의 온도 회복 정도를 상당히 유사하게 예측함을 보여주고 있다. 즉, 수치해석 모델에서 적용된 열물성치는 적절하며 수치해석 모델은 열대류와 열전도 메커니즘을 정확하게 모사하는 것을 입증한다.

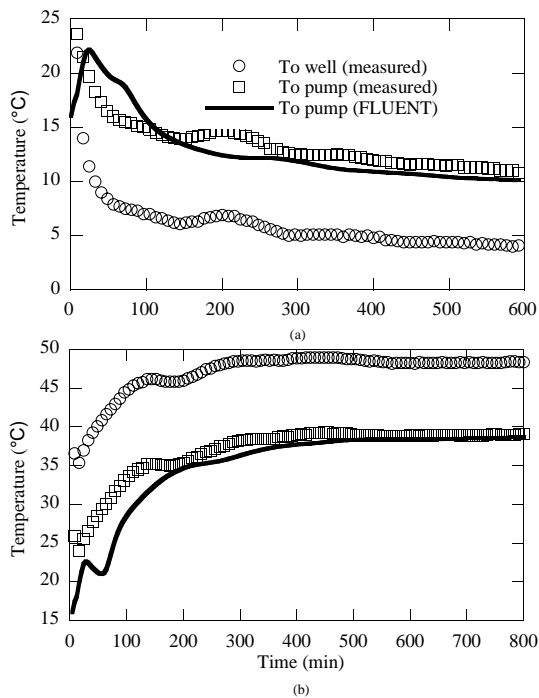


그림 5. 의령군 현장 계측 데이터와 해석결과 비교: (a) 난방 모드, (b) 냉방 모드

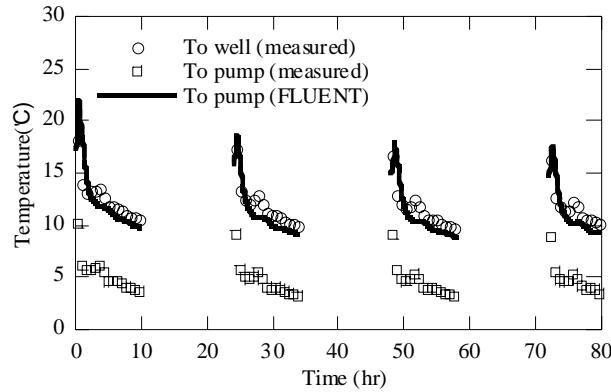


그림 6. 80시간 가동주기 동안의 의령군 현장 계측 데이터와 수치해석결과 비교

5. 결론

본 연구에서는 지열 히트펌프 시스템의 대표적인 방식인 스탠딩컬럼웰(SCW) 시스템의 수치해석 모델을 구축하였다. 수치해석 모델의 정확성은 국내 의령 체육진흥센터의 SCW에서 계측된 데이터와의 비교를 통하여 검증되었다. 비교결과 수치해석 모델은 SCW의 가동에 따른 순환수의 온도를 비교적 정확하게 예측하는 것으로 나타났다. 나아가 SCW 수치해석 모델은 가동중지를 반복하는 장기거동 예측에 적용되었다. 비교 결과, SCW는 가동뿐만 아니라 가중중지 기간의 온도회복을 상당히 정확하게 예측하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 송운호, 김형찬, 심병완, 김형수 (2008), *지하 열 자원 부존·활용 정보 시스템 구축*, 2005-R-GH01-P-01, 지식경제부, 과천, pp.44-56.
2. 한정상, 한혁상, 한찬, 김형수, 전재수 (2006), "수주지열정(SCW)을 이용한 천부지열 냉난방시스템 설계지침", *자원환경지질*, Vol. 39, No. 5, pp.607-613.
3. Braud, H., Klimkowski, H., and Oliver, J. (1983), "Earth-source heat exchanger for heat pumps", *Transactions of ASAE*, Vol. 26, pp.1818-1822.
5. Deng, Z. (2004), *Modeling of standing column wells in ground source heat pump systems*, Ph.D. Thesis, Oklahoma State University, pp.1-303
6. Fluent, I. (2006), *FLUENT 6.3 User's Guide*, Lebanon, NH.
7. Hellstrom, G. (1991), *Ground Heat Storage. Thermal Analyses of Duct Storage Systems-Theory*, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.
8. Mikler, V. (1993), *A theoretical and experimental study of the "energy well" performance*, Masters thesis, The Pennsylvania State University, pp.
9. Oliver, J., and Braud, H. (1981), "Thermal exchange to earth with concentric well pipes", *Transactions of ASAE*, Vol. 24, pp.906-910.
10. Orio, C. (1995), "Design, use and examples of standing column wells", *IGSPHA Technical Meeting*, Vol., pp.15-17.
11. Rees, S., Spitler, J., Deng, Z., Orio, C., and Johnson, C. (2004), "A study of geothermal heat pump and standing column well performance", *Transactions of ASAE*, Vol. 109(1), pp.3-13.