

단일심정 지열히트펌프의 수치적 모델링

Part II: 단일심정 지열히트펌프의 성능평가를 위한 매개변수 연구

Numerical Simulation of Standing Column Well Ground Heat Pump System

Part II: Parametric Study for Evaluation of the Performance of Standing Column Well

박 두 회 ¹	Park, Du-Hee	김 광 균 ²	Kim, Kwang-Kyun
곽 동 엽 ³	Kwak, Dong-Yeop	장 재 훈 ⁴	Chang, Jae-Hoon
나 상 민 ⁵	Na, Sang-Min		

Abstract

The SCW numerical model described in the companion paper was used to carry out a comprehensive parametric study to evaluate 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. Two types of numerical simulations were performed. The first type was used to perform short-term (24-hour) simulation, while the second type 14 day 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. The thermal conductivity had the most important influence on the performance of the SCW. With the increase in the geothermal gradient, the performance increased in the heat mode, but decreased in the cooling mode. The hydraulic conductivity influenced the performance when the value was larger than 10^{-4} m/s. The depth of the well increased the performance, but at the cost of increased cost of boring. The bleeding had an important influence on SCW, greatly enhancing the performance at a limited increased cost of operation. 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.

요 지

본 논문에서는 동반논문에서 구축된 수치해석 모델을 이용하여 SCW의 성능을 평가하기 위한 매개변수연구를 수행하였다. 매개변수연구에는 공극률, 투수계수, 열전도도, 비열, 지열경사 등 5개의 지반환경변수와 유량, 심정심도, 심정 직경, 유입관 직경, 블리딩율의 설계변수가 적용되었다. 수치해석은 24시간 연속가동과 가동·중지를 반복하는 14일간의 가동 두 가지로 수행되었다. 해석결과 SCW 성능에 중요한 영향을 미치는 변수는 열전도도, 수리전도도, 지열경사, 유량, 심정 심도, 블리딩율인 것으로 나타났다. 열전도도가 높을수록 SCW의 효율이 향상되는 것으로 나타났다. 지열

1 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ., dpark@hanyang.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사 후 과정 (Member, Post Doc., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ.)

3 UCLA 건설환경공학과 박사 과정 (Ph.D Course, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Univ. of California, Los Angeles)

4 한양대학교 건설환경공학과 석사 과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ.)

5 GS건설(주) (Ph.D., GS E&C Corp.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

경사가 클수록 심정 저부의 온도가 증가하여 난방모드에서는 효율이 향상되지만, 냉방모드에서는 유입수의 온도가 증가하여 오히려 효율이 감소하는 것으로 나타났다. 수리전도도도는 10^{-4} m/s 이상일 경우에는 큰 영향을 미칠 수 있으나 10^{-6} m/s 이하에서는 영향이 적은 것으로 나타났다. 심정심도가 증가할수록 SCW의 효율이 향상되는 것으로 나타났지만 심정심도를 높일수록 시공비가 증가하게 된다. 블리딩을 적용하며 추가적인 비용 없이 심정온도를 조절할 수 있으며 성능을 향상시킬 수 있는 매우 효과적인 방법인 것으로 나타났다. 단, 블리딩은 유출수를 배출할 공간이 확보되며 지하수량이 풍부한 경우에만 적용할 수 있다. 본 매개변수 연구결과, SCW의 성능에 영향을 미치는 요소는 매우 다양하며 이들의 복합적인 영향을 정확하게 규명하기 위해서는 수치적 모델을 수행해야 할 필요가 있는 것으로 나타났다.

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

1. 서론

최근 들어 에너지 파일, 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 에너지 화하는 시스템으로 에너지 효율, 설치공사비용 및 설치면적 등이 우수하여 여러 가지 측면에서 실용화에 근접한 지열 히트펌프 시스템이다. 지하수 열원 히트펌프 시스템 중 가장 보편적인 방식은 단일심정(SCW, Standing Column Well)이며 이는 심정에서 지하수를 펌핑하여 열을 추출·배출한 후, 이를 동일한 심정에 다시 방출하는 방식으로 현재 해외에서 활용실적이 크게 증가하고 있는 추세이다.

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

2. 매개변수 연구

본 연구에서 수행된 매개변수 연구는 1차와 2차에 나

누어 수행되었다. 1차 매개변수 연구에서는 SCW의 성능에 영향을 미치는 변수들의 중요도를 평가하고자 단 시간 연속(24시간) 시뮬레이션을 수행하여 각각의 영향정도를 평가하였다. 1차 매개변수 연구에서 영향이 큰 것으로 나타난 변수들에 대해서는 2차 매개변수 연구를 수행하여 좀 더 세밀하게 각각의 영향을 분석하였다. 2차 매개변수 연구에서는 장기간 불연속(14일) 시뮬레이션을 수행하였으며 최대한 사실적으로 SCW를 모델링하였다.

매개변수에서는 동반논문(박두희 등, 2009)에서 검증된 SCW 수치적 모델을 사용하였다. 매개변수에 사용된 SCW 시스템의 해석영역과 요소망은 그림 1에 도시하였다. 해석 반경은 160m이며 수직방향 영역은 심정 심도 + 50m이다. 지하수위는 지표면에 위치한다고 가정하였다. 해석에 사용된 심정 심도, 유입관 직경은 해석별로 다르게 적용하였으나 유출관의 단면은 고정하였다. 유출관은 동반논문(박두희 등, 2009)에서와 같이 링형상으로 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, 심정직경, 유입관 직경, 블리딩 등이다. 지반의 단위중량과 심정 벽면 표면저칠기는 각각 2.7kN/m^3 과 1.5mm 로 가정하였다(박두희 등, 2009). 해석에서 유입관 및 유출관의 물성은 고밀도 폴리에틸렌 소재의 물성을 적용하였으며 밀도, 비열, 열전도율은 각각 952kg/m^3 , $1670\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$, $0.22\text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$

이다.

SCW 운영 시 유출수의 온도는 유입수의 온도에 의하여 결정되며 이는 가동시간에 따라서 변화하므로, 매개변수 연구에서는 유출수와 유입수 온도간의 상호관계

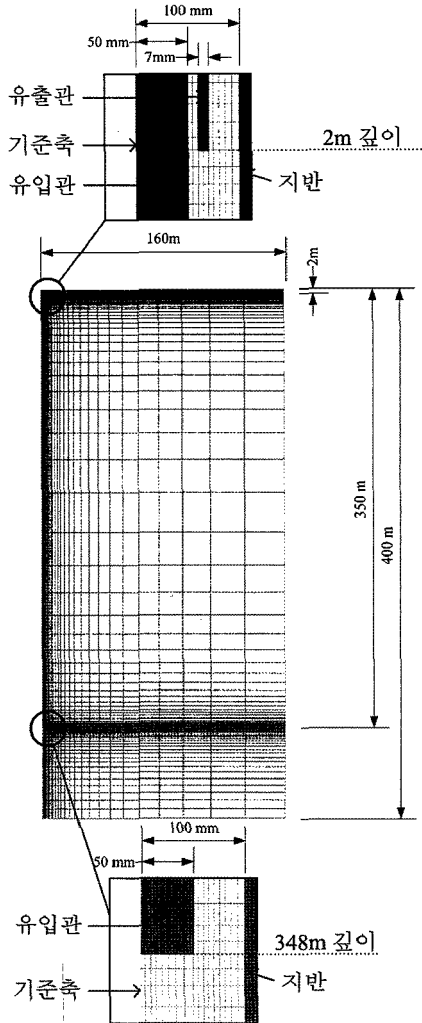


그림 1. 매개변수연구에 사용된 해석영역과 요소망(기준값 적용)

를 모사한 해석을 수행하였다. 동반논문(박두희 등, 2009)에서 제시된 의령 체육센터에 설치된 SCW 계측자료에 의하면 유출수와 유입수간의 온도차는 대략 7°C인 것으로 나타났다. 즉, 펌핑된 순환수가 열교환기를 통과하면 난방모드에서는 7°C만큼의 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°C만큼 가감하였다. 여기서 7°C는 절대적인 수치가 아닌 평균값이며 냉·난방 모드, 히트펌프 종류, 유입수 온도에 따라서 변화할 수 있으나 본 연구에서는 이를 고정하였음을 밝혀둔다.

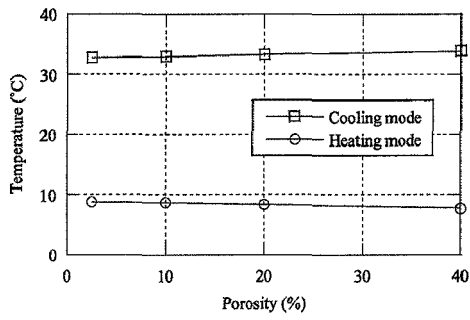
3. 1차 매개변수 연구

1차 매개변수 연구는 전술한 바와 같이 SCW의 성능에 영향을 미치는 변수들의 중요도를 평가하고자 단기간(24시간) 시뮬레이션을 수행하였다. 1차 매개변수 연구에 적용된 변수는 지반환경과 관련된 변수 5개(공극률, 수리전도도, 열전도도, 비열, 지열경사)와 설계변수 5개(유량, 심정심도, 심정직경, 유입관 직경, 블리딩율) 총 9개이며 이들은 표 1에 정리하였다. 표 1에서 각각 매개변수의 기준값은 회색바탕으로 차별화하였다.

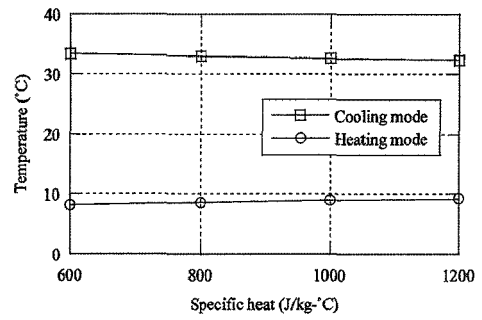
해석에 사용된 지반환경 변수들은 국내외 포괄적인 자료 조사를 기반으로 산정되었다. 암반의 공극률은 Hellstrom (1991)과 이인모(2001)의 자료를 근거로 2.5% 부터 40.0% 까지 총 4개를 적용하였으며 기준값으로는 10.0%를 적용하였다. 암반의 수리전도도는 농어촌진흥공사(1996), 이인모(2001), Goodman(1989) 자료에 근거하여 $1.0 \times 10^{-3} \text{ m/s} \sim 1.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 를 적용하였다. 수리전도도는 총 5가지 값을

표 1. 1차 매개변수 연구에 사용된 변수값들

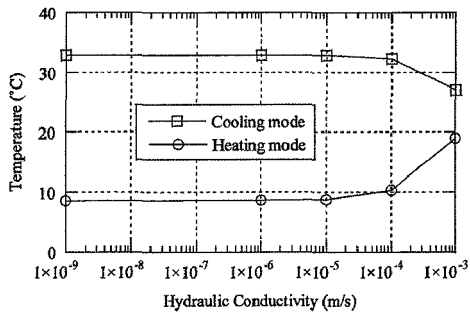
매개변수	단위	Case				
		1	2	3	4	5
공극률	%	2.5	10	20	40	
수리전도도	m/s	1×10^{-9}	1×10^{-6}	1×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-3}
열전도도	W/m-°C	1.5	3.5	4.5	5.5	
비열	J/kg-°C	600	800	1000	1200	
지열경사	°C/m	16 + 0.015×깊이	16 + 0.025×깊이	16 + 0.035×깊이		
유량	kg/s	1.5	2	3	4.5	
심정 심도	m	250	300	350	400	
심정 직경	mm	150	175	200		
유입관 직경	mm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



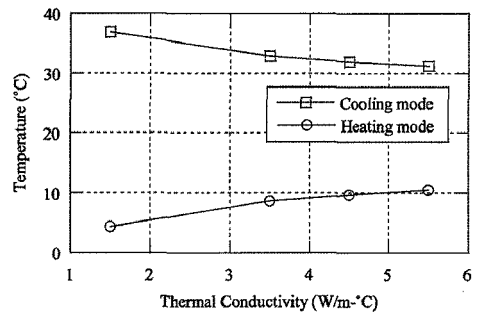
(a)



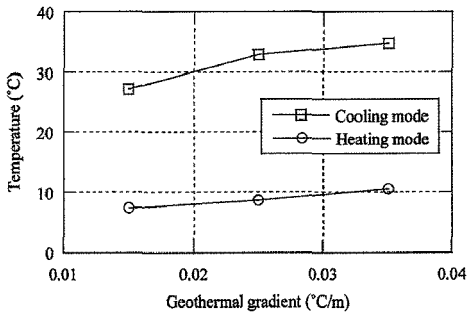
(b)



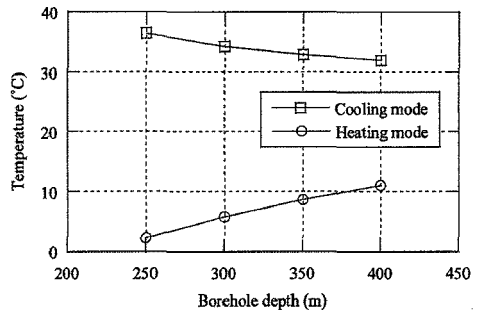
(c)



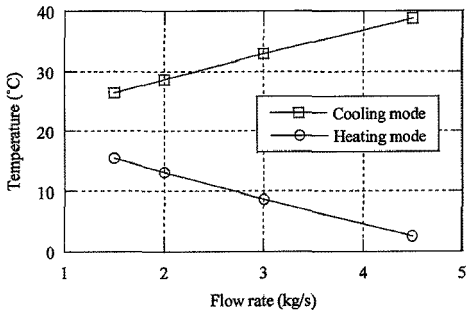
(d)



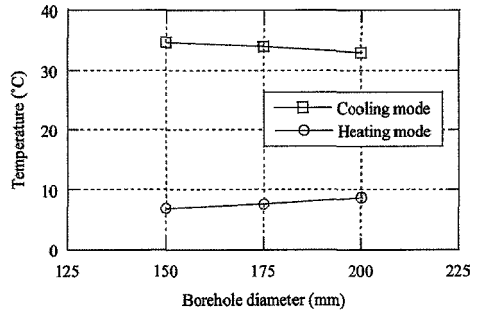
(e)



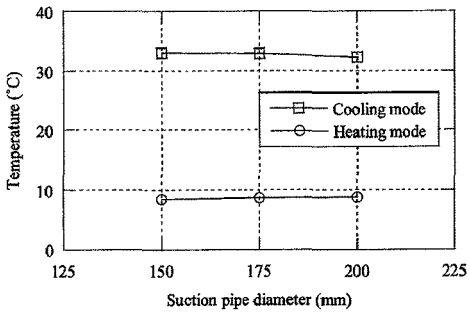
(f)



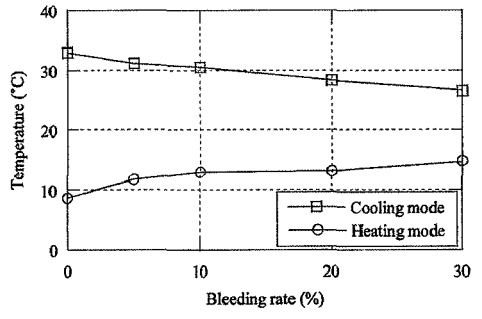
(g)



(h)



(i)



(j)

그림 2. 1차 매개변수 연구 결과

변수로 적용하였으며 기준값으로는 $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 를 사용하였다. 암반의 열전도도는 송윤호 등(2008)의 자료를 기반으로 $2.5 \text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, $3.5 \text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, $4.5 \text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, $5.5 \text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ 총 4가지 값을 채택하였으며 기준값으로 $3.5 \text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ 을 적용하였다. 암반의 비열은 선행 연구자(권오일 등, 2006; 최병윤, 2004; Hellstrom, 1991; Salomone 등, 1989)의 자료를 토대로 $800 \text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ 를 기준값으로 사용하였으며 600부터 $1200 \text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ 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, 심정직경, 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. 심정심도는 국내에서 일반적으로 적용하는 심도 350m를 기준값으로 적용하였으며 이에 250, 300, 400m 3가지 경우를 추가하여 영향을 평가하였다. 심정직경은 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.

1차 매개변수 연구결과는 그림 2에 도시하였다. 그림 2는 24시간 가동 후 계산된 유입수의 온도를 나타낸다. 기준값들을 적용하였을 경우 계산된 유입수의 온도는 9.5°C 로 350m 심도에서의 초기온도인 23°C 에 비하여 13.5°C 감소하였다. 계산된 유입수의 총 범위는 2 - 10°C 이었다. 냉방 모드에서 계산된 유입수 온도는 기준값을 적용하였을 경우 32°C 이었으며 이는 초기 온도에 비하여 9°C 상승한 수치이다.

다음에는 매개변수 각각의 영향정도를 분석하였다. 먼저, 지반환경과 관련된 변수들의 영향을 조사하였다. 공급률은 SCW의 온도변화에 영향이 매우 미비한 것으로 나타났다(그림 2(a)). 비열의 경우, 비열이 증가함에 따라 난·냉방 모드에서 각각 유입수의 온도가 증가·감소하여 결과적으로 SCW의 성능이 향상되는 것을 볼 수 있다(그림 2(b)). 하지만, 비열의 영향정도는 크지 않은 것으로 나타났다. 그림 2(c)는 수리전도도에 따른 유입수

의 온도 차이를 도시하였다. 수리전도도는 $10^{-9} \sim 10^{-5} \text{m/s}$ 까지는 영향정도가 제한적이지만 10^{-4}m/s 이상인 경우에만 결과에 영향을 더 10^{-3}m/s 에서는 영향이 매우 큰 것을 알 수 있다. 난·냉방모드에서 10^{-3}m/s 에서의 온도는 10^{-9}m/s 에 비하여 각각 200% 상승 및 18% 하강하여 성능이 크게 향상되는 것으로 나타난다. 그림 2(d)는 열전도도의 영향을 나타낸다. 열전도도가 1.5에서 $5.5 \text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ 까지 증가하면서 난방모드에서 유입수의 온도는 4.3°C 에서 10.5°C 로 약 2.5배 증가하였다. 지열경사가 증가할수록 지중의 온도가 증가하므로 난방모드와 냉방모드에서 유입수의 온도변화에 큰 영향을 미치는 것으로 계산되었다(그림 2(e)).

다음은 SCW 설계변수의 영향을 분석하였다. 설계변수 중 심정 심도(그림 2(f)), 유량(그림 2(g)), 블리딩율(그림 2(j))은 주목할만한 영향을 미치는 반면 심정 직경(그림 2(h))과 유입관 직경(그림 2(i))은 영향이 미비한 것으로 나타났다. 심정 심도는 지열경사와 마찬가지로 난방모드에서는 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 이들에 대한 2차 매개변수연구는 다음 절에 설명하였다.

4. 2차 매개변수 연구

2차 매개변수 연구에서는 열전도도, 수리전도도, 지열경사, 심정 심도, 블리딩율, 유량의 영향정도를 보다 사실적인 해석을 통하여 분석하였다. 1차 매개변수 연구에서는 SCW의 24시간 연속적으로 가동하였으나 실제 운영 시에는 냉·난방 모드와 건물의 운영시간에 따라서 가동과 정지를 반복하게 된다. 2차 매개변수 연구에서는 의령 체육진흥센터 평균 운영시간을 근거로 SCW 가동시간을 결정하였다. 가동시간은 1일 10시간 가동, 14시간 휴지를 반복하는 패턴으로 1주 5일 연속 가동하였으며 주말에 2일의 휴지기간을 적용한 후 다시 5일 가동-휴지를 반복하여 총 2주간 해석을 수행하였다. 또

한, 1차 매개변수연구와 같이 유입수 온도에 따라서 결정되도록 하여 유출수와 유입수 온도와의 상호관계를 모사한 해석을 수행하였다.

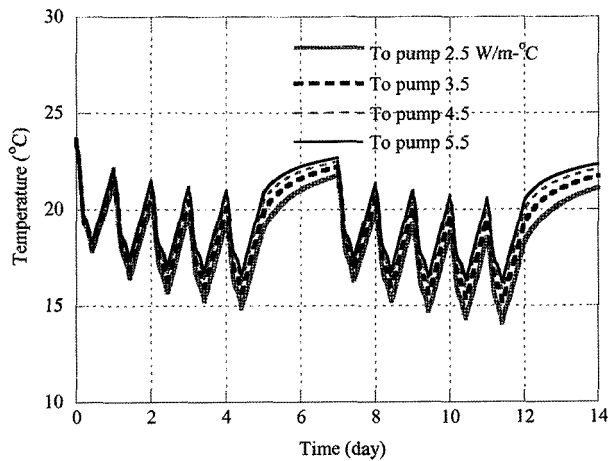
4.1 열전도도

14일 동안 SCW를 수치적으로 가동하여 열전도도의 영향을 평가한 결과는 그림 3에 도시하였다. 난방모드의 경우 그림 3(a)와 같이 가동기간 동안은 유입구에서의 순환수 온도가 점차적으로 하강하며 가동 중지기간 동안 온도를 회복한다. 10시간/일 SCW를 가동하였을 경우, 14시간의 가동중지기간에 초기 온도를 완벽하게 회복하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서, 5일 동안 가동주기를 반복하였을 경우, 유입수의 온도가 17.8°C에서 14.9°C로 지속적으로 하강하는 것으로 나타났다. 이를 기간의 가동 휴지기 동안 순환수의 온도는 다시 비선

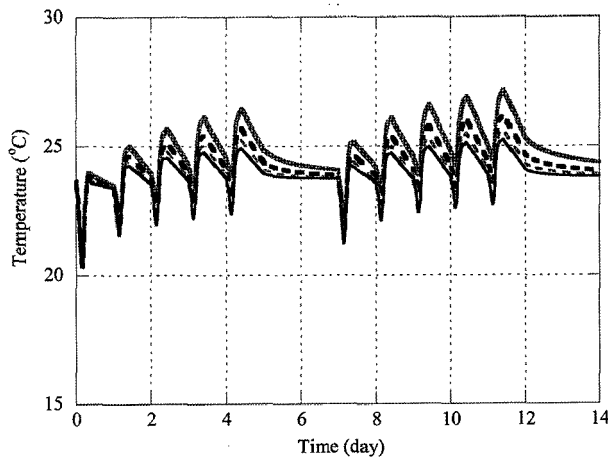
형적 패턴으로 상당 부분 회복되지만 초기온도에는 미치지 못하며 다시 5일간 SCW를 가동하면 지속적으로 온도가 하강하는 것을 확인할 수 있다. 열전도도가 높을수록 가동 중에 온도하강율이 완만해지고 가동중지기간 동안 온도회복은 오히려 가속되어 2주 후에는 열전도도에 따라 심정 내에 상당한 온도차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 열전도도가 높을수록 순환수가 심정벽면을 타고 흐를 때 발생하는 열대류와 전도가 증가하여 순환수의 온도가 지반과 가까워지기 되기 때문이다.

한편 냉방모드에서는 난방모드와 반대로 유입수의 온도가 유출수의 온도보다 7°C 높게 설정되어 해석되었으며 그림 3(b)와 같이 온도가 지속적으로 상승하는 것을 볼 수 있다. 냉방모드에서는 난방모드와는 다르게 온도변화가 복잡한 패턴을 보이고 있다. SCW를 가동하면 점차적으로 심정상부의 물이 유입관으로 흡입된다. 심정저부에 비하여 상부의 순환수는 온도가 낮으므로 초기에는 지속적으로 온도가 하강한다. 유입수가 열교환기를 통과하면서 온도가 상승한 후, 심정으로 환수된 후 다시 심정저부에 위치한 유입관으로 펌핑되면 한 사이클을 완성하게 된다. 이 때 열교환기를 통과한 유출수는 온도가 높으므로 유출수가 유입관에 도달하면 유입수의 온도가 급격하게 상승하게 된다. 가동중지 기간 동안은 완만하게 다시 온도가 하강한다. 난방모드와 동일하게 휴지기 동안 지반은 초기온도를 충분히 회복하지 못한다. 따라서 이와 같은 가동을 반복하게 되면 심정온도가 지속적으로 상승하게 된다.

그림 4는 12일 가동 후에 계산된 최대 및 최소 유입수를 나타낸다. 난방모드에서는 열전도도가 2.5W/m-°C에서 5.5W/m-°C로 증가할수록 유입수의 온도는 14.1°C에서 16.2°C로 증가하였고, 냉방모드에서는 27.2°C에서 25.2°C



(a) 난방모드



(b) 냉방모드

그림 3. 열전도도에 따른 유입수의 온도의 경시변화

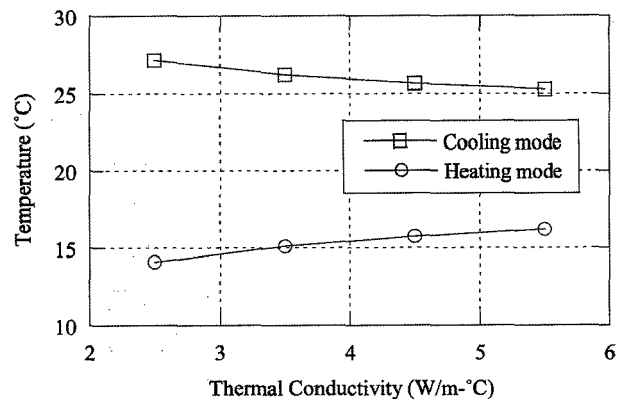
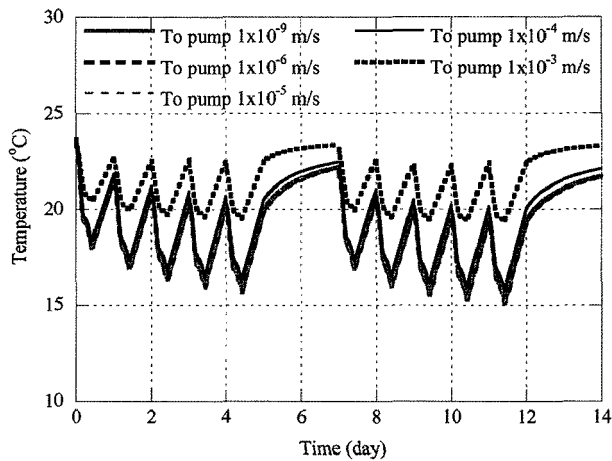


그림 4. 열전도도에 따른 12일 후 유입수의 온도변화

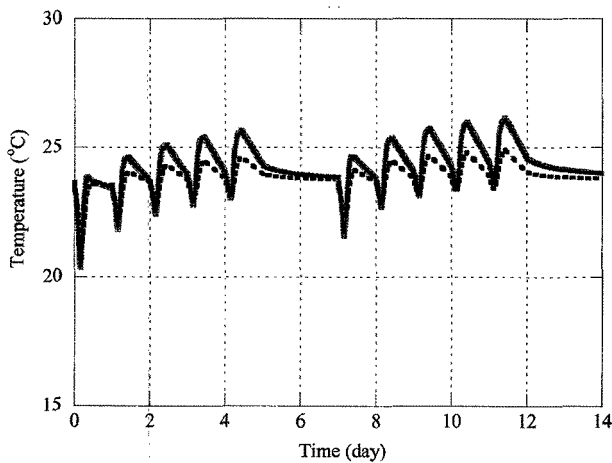
로 감소하였다. 이와 같은 온도차이는 가동기간이 증가할수록 더욱 벌어지게 된다.

4.2 수리전도도

SCW를 수치적으로 14일 동안 가동하여 수리전도도의 영향을 평가한 결과는 그림 5에 도시하였다. 난방모드의 경우 그림 5(a)에 나타나듯이 수리전도도 $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 에서 유입수의 온도가 5일 가동으로 20.4°C 에서 19.5°C 로 지속적으로 하강하지만 휴지기 동안 초기온도를 완전히 회복하고 있다. 반면 수리전도도가 $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 에서 $1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 인 경우에는 지속적으로 하강한 온도는 휴지기 동안 초기온도를 충분히 회복하지 못한다. 이는 다음 7일 동안에도 동일한 패턴을 보이고 있다. 냉방모드의 경우도 마찬가지로 5일 가동으로 지속적으로 상승한 유입수의 온도는 수리전도도 $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 에서 휴지기 동



(a) 난방모드



(b) 냉방모드

그림 5. 수리전도도에 따른 유입수의 온도의 경시변화

안 온도가 하강하면서 초기온도를 완전히 회복하고 있다. 반면 수리전도도가 $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 에서 $1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 인 경우에는 지속적으로 상승한 온도가 가동 휴지기 동안 충분한 회복을 못하고 있다.

난방모드와 냉방모드 두 경우 모두 수리전도도에 따른 유입수의 온도변화는 유사한 경향을 나타내고 있다. 이는 수리전도도가 증가할수록, 지반에서의 지하수 흐름이 증가하기 때문에 이로 인한 열이류가 활성화 되어 SCW의 성능이 향상되는 것이다. 전술한 지반과 심정내부 상호간의 지하수 흐름 증가는 그림 6에 도시하였다. 그림 6은 수리전도도의 변화에 따른 지반에서의 반경방향 유속을 나타낸다. $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 까지는 반경방향 유속이 $4.3 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 로 매우 작지만, $1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 에서는 유속이 $4.1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 로 급격하게 증가하며 $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 에서는 유속이 $3.1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 로 $1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 의 경우에 비하여 7.5배 증가하는 것으로 계산되었다.

그림 7은 수리전도도를 적용하여 계산된 12일 가동 후에 계산된 최대 및 최소 유입수의 온도를 나타낸다. 난방모드에서는 수리전도도가 $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 에서 $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 까지는 수리전도도가 증가하여도 유입수의 온도가 약

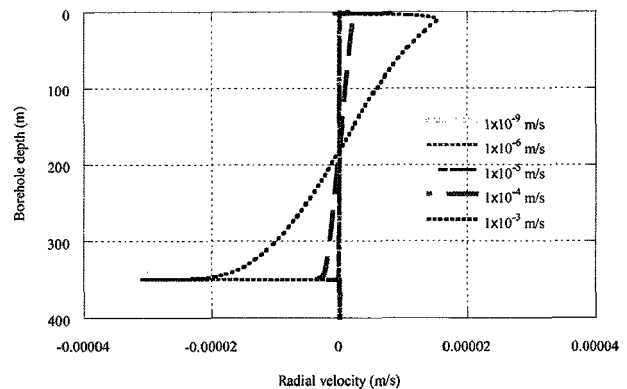


그림 6. 수리전도도에 따른 심정과 지반의 이류속도

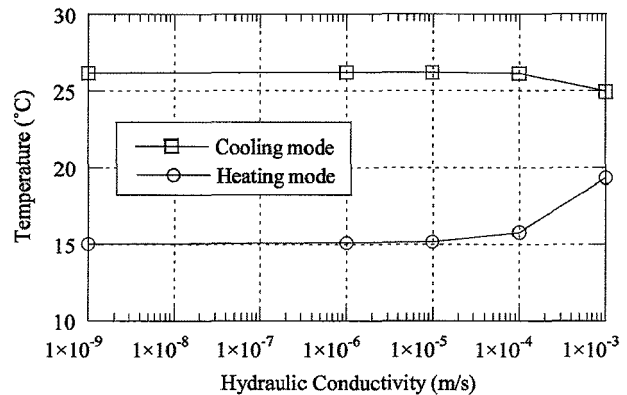


그림 7. 수리전도도에 따른 12일 후 유입수의 온도변화

15.0°C로 거의 변화가 없지만 1×10^4 m/s에서는 15.7°C로 미세하게 증가하고 1×10^3 m/s에서는 19.3°C로 급격하게 증가하며 1×10^4 m/s의 경우에 비하여 약 23% 증가하는 것으로 계산되었다. 냉방모드에서도 마찬가지로 1×10^9 m/s와 1×10^5 m/s 범위내에서는 유입수의 온도변화가 거의 없지만 1×10^4 m/s에서는 미세하게 감소하며 1×10^3 m/s에서는 1×10^4 m/s의 경우에 비하여 약 5% 감소하는 것으로 계산되었다.

4.3 지열경사

지열경사는 0.015, 0.025, 0.035°C/m 총 3가지를 적용하여 이의 영향을 분석하였다. 그림 8에는 지열경사의 변화에 따른 유입수의 온도변화를 도시하였다. 지열경사가 증가할수록 지반의 온도가 상승하므로 유입관 입구가 위치한 심정 저부에서의 온도는 높아진다. 따라서 난방 모드에서는 유입수의 온도가 증가하므로 효율이 향상되게 된다. 반대로 냉방 모드 사용에는 유입수의 온도가 높아짐으로 효율이 오히려 감소한다. 12일 가동직후 난방 모드에서는 지열경사가 0.015°C/m에서 0.035°C/m로 증가함에 따라 유입수온이 13.6°C에서 22.7°C로 급격하게 상승하였으며 냉방모드에서는 21.4°C에서 26.7°C로 증가한 것으로 나타났다.

4.4 심정 심도

그림 9는 심정의 심도에 따른 SCW 시스템의 온도변화를 나타낸다. 심정 심도가 증가함에 따라 심정저부에서의 온도가 증가하므로 난방모드에서는 효율이 향상되게 된다. 난방모드에서는 심도가 250m에서 400m로 증가함에 따라, 유입수의 온도가 12일 후 40%이상 증

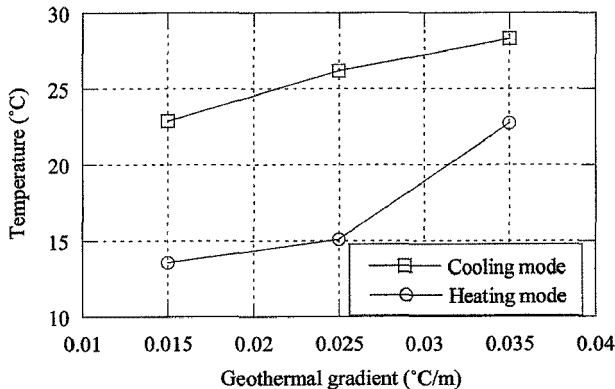


그림 8. 지열경사에 따른 12일 후 유입수의 온도변화

가하였다. 냉방모드에서는 난방모드에 비하여 심정 심도의 영향이 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 심정 심도가 증가할수록 유입구 주변의 온도가 높아져 효율이 감소하지만, 반면 순환수가 심정을 따라서 유입구 방향으로 흐르면서 심정 벽면과 열교환이 증가한다. 이와 같이 상호 영향이 상쇄되면서 심정 심도의 영향이 줄어들며 냉방모드에서는 유입수의 온도에 민감하지 않은 것으로 나타났다.

4.5 블리딩율

블리딩율의 변화에 따른 유입수의 온도변화는 그림 10에 도시하였다. 냉·난방모드 모두에서 블리딩율이 증가할수록 온도변화율이 증가하여 효율이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 이는 블리딩율이 증가할수록 주변지반에서 흡입하는 지하수의 양과 범위가 증가하여 열이류가 활성화되고 보다 효율적인 열교환이 이루어지기 때문이다. 블리딩율 0%와 30%에서의 심정주변의 수두 변화는 그림 11에 비교하였다. 블리딩 0%일 경우, 최대 수두차가 0.01atm이며 반경방향 유속이 4.3×10^{-8} m/s인

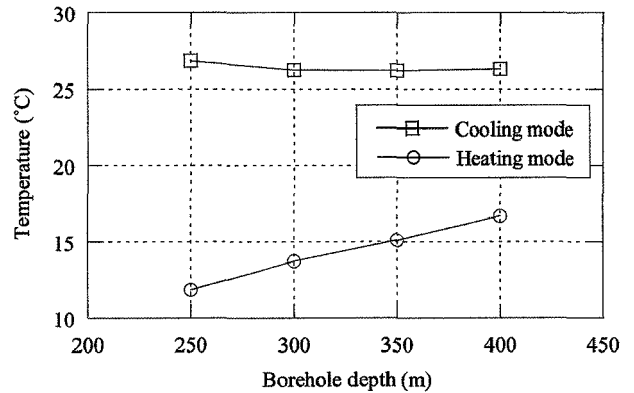


그림 9. 심정심도에 따른 12일 후 유입수의 온도변화

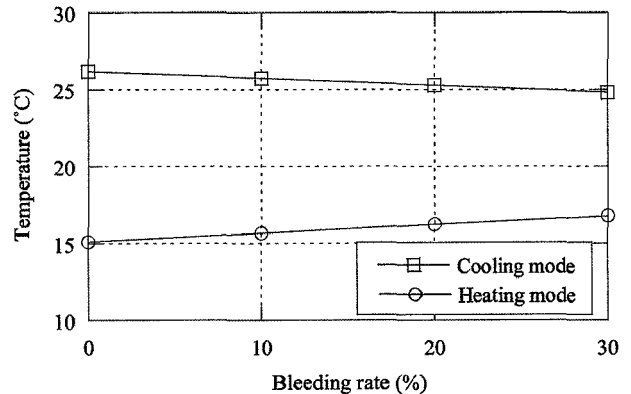
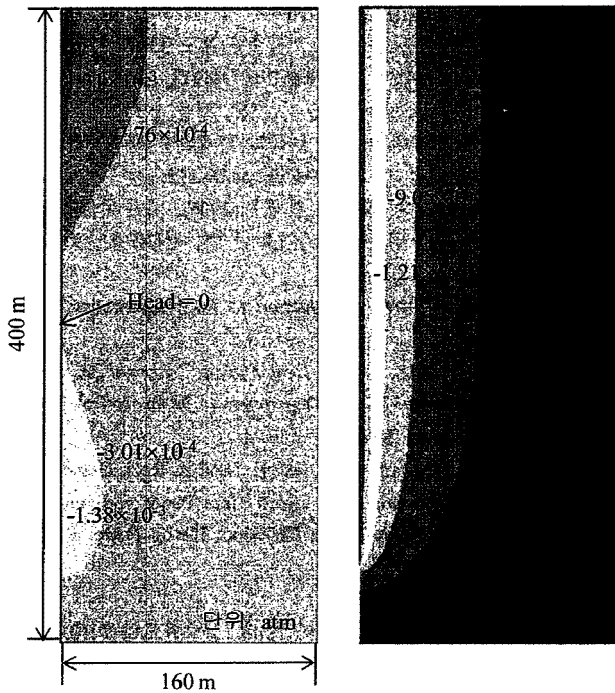


그림 10. 블리딩율에 따른 12일 후 유입수의 온도변화 비교



(a) 블리딩율 0% (b) 블리딩율 30%

그림 11. 블리딩율에 따른 수두변화

반면, 블리딩 30%일 경우 유속이 $7.9 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 로 증가한다. 블리딩율이 0%에서 30%까지 증가하였을 때 냉방 모드에서는 5%, 난방 모드에서는 15%의 온도변화가 발생하는 것으로 나타났다.

4.6 유량

그림 12에 나타나듯이 유량이 증가할수록 냉방 모드에서는 유량이 2kg/s에서 4.5kg/s로 증가할 때, 온도는 약 25°C에서 33°C로 증가하고 난방 모드에서는 약 16.5°C에서 9.4°C로 감소하고 있다. 그림 12에서 알 수 있듯이 온도 변화는 비교적 선형적으로 나타나고 있으며, 냉난방 효율이 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 유량이 증가하면서, 열교환을 위한 심정 내 잔류시간이 줄어들기 때문으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 동반논문(박두희 등, 2009)에서 구축된 SCW 수치해석 모델을 이용한 포괄적인 매개변수 연구를 수행하였다. 매개변수 연구에는 공극률, 투수계수, 열전도도, 비열, 지열경사 등 5개의 지반환경변수와 유량, 심정심도, 심정직경, 유입관 직경, 블리딩율의 설계

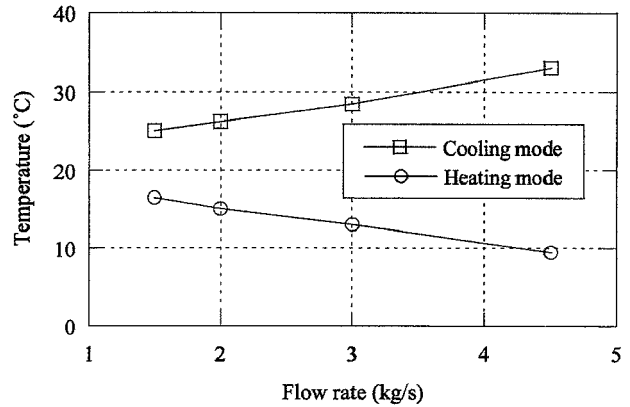


그림 12. 유량에 따른 12일 후 유입수의 온도변화 비교

변수가 적용되었다. 수치해석은 24시간 연속가동과 가동·중지를 반복하는 14일간의 가동 두 가지로 수행되었다. 다음은 연구에서 도출한 결론이다.

- (1) SCW 성능에 중요한 영향을 미치는 변수는 열전도도, 수리전도도, 지열경사, 유량, 심정 심도, 블리딩율인 것으로 나타났다.
- (2) 열전도도가 높을수록 SCW의 효율이 향상되는 것으로 나타났다. 심정으로 유입된 지하수로부터 심정벽면을 통해 전이된 열 에너지가 좀 더 빠르고 광범위하게 지반내로 흡수되므로 온도변화에 미치는 열전도도의 영향이 큰 것으로 나타났다.
- (3) 수리전도도도는 10^{-4}m/s 이상일 경우에는 큰 영향을 미칠 수 있으나 10^{-4}m/s 이하에서는 흡입되는 수량이 매우 작아서 영향이 제한적인 것으로 나타났다.
- (4) 지열경사가 커질수록 깊이별 지반온도가 증가하므로 난방모드에서는 효율이 증가한다. 반면, 냉방 모드에서는 순환수의 온도가 증가하여 효율이 오히려 감소하는 것으로 나타났다.
- (5) 심정 심도가 증가할수록 난방모드에서는 SCW의 효율이 향상되는 것으로 나타났지만 냉방모드에서는 영향이 작은 것으로 나타났다.
- (6) 블리딩을 적용하면 심정과 주변지반과의 압력차가 증가하여 심정 방향으로 침투되는 지하수의 유량이 증가하게 된다. 즉, 열이류가 지배적인 열교환 메커니즘이 되어 심정온도가 지반과 유사해진다. 블리딩은 적은 비용으로 SCW의 성능을 향상시킬 수 있는 매우 효과적인 방법인 것으로 나타났다.
- (7) 유량이 증가할수록 난방모드와 냉방모드에서 모두 SCW의 효율이 감소되는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 GS 건설(주)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 권오일, 백용, 서용석, 임성빈 (2006), “국내 기온분포와 암종에 따른 암반의 열화심도 추정에 관한 연구”, *한국지반환경공학학회 학술발표회논문집*, pp.135-140.
2. 농어촌진흥공사 (1996), *한국지하수총람* 농어촌진흥공사, 의왕, p.1097.
3. 박두희, 김광균, 박동엽, 장재훈, 박시삼 (2009), “단일심정 지열 히트펌프의 수치해석 모델링 Part I: 수치해석 모델 검증”, *한국지반공학회*, 제26권, 제2호, pp.33-43.
4. 송윤호, 김형찬, 심병완, 김형수 (2008), *지하 열 자원 부존·활용 정보 시스템 구축*, 2005-R-GH01-P-01, 지식경제부, 과천, pp.44-56.
5. 이영민, 김형찬, 송윤호 (2006), “시추공 온도자료를 이용한 고기후 연구에 대한 개관”, *자원환경지질*, 제39권, 제1호, pp.95-102.
6. 이인모 (2001), *암반역학의 원리*, 새론, 서울, p.372.
7. 최병운 (2004), “국내 열펌프 보급의 문제점 및 해결방안”, *대한설비공학회 강연회 및 기타간행물*, pp.89-113.
8. 한정상, 한혁상, 한찬, 김형수, 전재수 (2006), “수주지열정(SCW)을 이용한 천부지열 냉난방시스템 설계지침”, *자원환경지질*, Vol.39, No.5, pp.607-613.
9. Goodman, R.E. (1989), *Introduction to Rock Mechanics*, Wiley, p.562.
10. Hellstrom, G. (1991), *Ground Heat Storage. Thermal Analyses of Duct Storage Systems-Theory*, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.
11. 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.

(접수일자 2009. 12. 8, 심사완료일 2010. 2. 18)