

열응답시험 데이터를 이용한 SCW형 지중열교환기 블리딩 효과 분석

장근선¹, 김민준^{2*}

¹선문대학교 기계공학과, ²선문대학교 기계공학대학원

An Analysis on the Bleeding Effect of SCW Ground Heat Exchanger using Thermal Response Test Data

Keun-Sun Chang¹, Min-Jun Kim^{2*}

¹Department of Mechanical Engineering, Sunmoon University

²Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Sunmoon University

요약 개방형 지중열교환기(SCW)는 수직 밀폐형 지중열교환기에 비해 높은 용량과 효율을 갖고 있어 최근에 우리나라에서 많이 보급되고 있는 추세이다. SCW형 지중열교환기의 여러 설계 및 운전변수 중 블리딩 운전이 지중 열전도율, 보어홀 열저항 등 열성능 개선에 가장 효과가 큰 것으로 보고되고 있다. 본 연구에서는 SCW형 지중열교환기가 설치된 현장의 열응답시험 결과를 기반으로 블리딩해석 모델을 정립하고 블리딩율 및 지하수 유입수의 위치변화가 SCW형 지중열교환기 열성능에 미치는 영향을 수치해석을 통하여 고찰하였다. 해석결과 지하수가 지중열교환기 상부에서 유입될 경우 지중열교환기 순환수의 시간에 따른 온도증가는 블리딩율이 증가함에 따라 낮아지는 경향을 보였으며, 지중 열전도율은 30% 블리딩율에서 179% 증가하는 결과를 보였다. 반면에 지하수가 지중열교환기 하부에서 유입될 경우 지중열교환기 순환수는 지중과 먼저 열교환을 한 후 유입수와 하단에서 혼합되기 때문에 지중열교환기 순환수의 온도증가는 상부 유입의 경우보다 적으며 블리딩율이 약 10%를 초과하면 일정하게 유지되는 경향을 보였다.

Abstract Recently, the applications of the standing column well (SCW) ground heat exchanger (GHX) have increased significantly in Korea as a heat transfer mechanism of ground source heat pump systems (GSHP) because of its high heat capacity and efficiency. Among the various design and operating parameters, bleeding was found to be the most important parameter for improving the thermal performance, such as ground thermal conductivity and borehole thermal resistance. In this study, a bleeding analysis model was developed using the thermal response test data, and the effects of bleeding rates and bleeding locations on the thermal performance of anSCW were investigated. The results show that, when the ground water flows into the top of anSCW, the time variation of circulating water temperature decreased with increasing bleeding rate, and the ground thermal conductivity increases by as much as 179% with a 30% bleeding rate. When the ground water flows into the bottom of the SCW, the circulating water temperatures become almost constant after the increase in the beginning time because the circulating water exchanges heat with the ground structure before mixing with the ground water at the bottom.

Keywords : Standing Column Well, Ground Heat Exchanger, Thermal Response Test, Effective Thermal Conductivity, Borehole Thermal Resistance, Bleeding Effect

*Corresponding Author : Min-Jun Kim(Sunmoon University)

email: mjkim@kraac.or.kr

Received October 1, 2019

Accepted January 3, 2020

Revised November 18, 2019

Published January 31, 2020

1. 서론

현재 국내에서는 개방형 지중열교환기(SCW)가 높은 용량과 효율로 인해 급격하게 보급이 증가하는 추세를 보이고 있다. SCW형 지중열교환기는 수직 우물공에 지하수를 상단까지 채우고 이 지하수가 순환수가 되어 심정 펌프에 의해 우물공을 하부 및 상부 방향으로 순환하면서 지중과 열교환을 하는 지중 열교환기 형태이다. 하단 방향과 상단 방향으로의 유로는 내부 케이싱에 의해 분리된다.

SCW형 지중열교환기의 다양한 설계 및 운전변수가 지중열교환기의 순환수 온도, 보어홀 열저항 및 지중 열전도율에 미치는 영향에 대한 연구가 진행되었으며, 그 중에서도 블리딩(Bleeding)이 SCW형 지중열교환기의 열전달 증진에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 보고되었다[1]. SCW형 지중열교환기를 적용한 지열 열펌프 시스템에서 블리딩이란 지열 우물공에서 추출된 지하수가 열펌프에 유입되어 열교환을 한 후 다시 동일한 우물공으로 주입되는 과정에서 일부의 지하수를 지표로 방출하는 운전방식을 말한다. 이때 지열 우물공에서 추출된 지하수의 양과 지표에 방출되는 지하수의 양과의 비율을 블리딩율이라 정의하며, 블리딩은 지중에서 지열 우물공 근처에 존재하는 지하수를 우물공 내부로 유입할 수 있도록 유도할 수 있다. 지하수가 풍부하게 존재하는 지역에서는 블리딩을 통한 SCW형 지중열교환기의 열교환 용량을 증가시킬 수 있으며, 한국에너지공단 신재생에너지 설비의 지원 등의 관한 지침에서는 SCW형 지중 열교환기의 경우 블리딩율을 최대 20%까지 허용해 주고 있다[2].

그러나 높은 비율의 블리딩 적용은 지열 열펌프 시스템이 적용된 주위 지하수를 고갈시킬 수 있을 뿐만 아니라 지하수량이 적은 지역에서는 지하수 수위가 심정펌프 아래로 낮게 형성되어 심정펌프의 공회전에 따른 고장의 원인이 되기도 한다.

현재 국내외적으로 열응답시험을 이용한 다양한 지중 열교환기에 대한 연구가 수행되었으며[3-7], 열응답시험 데이터를 이용한 에너지평형에 대한 연구도 수행되었다[1,8].

본 연구에서는 SCW형 지중열교환기가 설치된 현장의 지중열교환기에 대한 열응답시험 결과를 기반으로 블리딩 해석 모델을 정립하고 블리딩율 및 지하수 유입수의 위치변화가 SCW형 지중열교환기의 열성능에 미치는 영향을 수치해석을 통하여 고찰하였다.

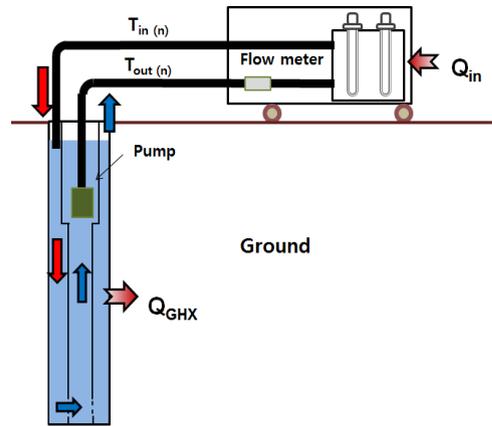


Fig. 1. Schematic diagram of TRT and concept of energy balance of SCW GHX.

2. 본론

2.1 열응답시험을 통한 지중열교환기 특성

SCW형 지중열교환기는 현지의 지중상태에 따른 특성이 가장 중요하므로 본 연구에서는 충주에 설치된 지중 열교환기의 지중상태를 공내영상촬영을 통하여 살펴보았으며, 열응답시험을 수행하여 지중열교환기의 특성을 살펴보았다. 본 연구에 사용된 지중열교환기는 지하수 수위 13 m, 흠막이 케이싱은 17.5 m가 삽입되었다. 지열 우물공 영상에서 지하수 대수층이 관찰되었으며, 위치는 지중 약 40 m, 215 m, 263~265 m, 394 m로 4군대로 관찰되었다. 특히 천공작업 중 확인한 것으로는 263~265 m, 394 m 대수층에서 지하수량이 많은 것으로 확인되었다.

또한 내부케이싱의 유공관 시작은 367 m, 끝단은 398 m로 확인되었으며, 내부케이싱 조립과정에서 케이싱이 이탈은 발견되지 않았다. 지열 우물공의 천공 깊이는 409 m로 확인되었으며, 지열 우물공 길이는 385 m로 측정되었다. 시험에 사용된 심정펌프는 우물공의 지중 약 50 m에 설치하였다.

Fig. 1은 SCW형 지중열교환기 열응답시험 장치의 개략도를 보여주고 있으며, Fig. 2는 열응답시험을 통해 얻은 지중열교환기의 시간변화에 따른 순환수 입출구 온도 변화와 투입열량 변화를 보여주고 있다. 지중초기온도는 지중 순환수를 4시간 이상 충분히 순환시켜 측정하였으며, 지중초기온도는 17.7 °C로 나타났다. 지중 순환수의 유량은 약 265 L/min으로 일정하게 제어하였다. 지중열

교환기로 투입된 열량은 단위 길이당 207 W/m (총 약 79.6 kW)가 투입되었으며, 시험이 진행되는 1,440분(24hr) 동안 투입열량은 표준편차가 1.5% 이하의 변동율을 보였다. 지중열교환기에 열량투입 후 240분(4hr) 이후의 온도곡선을 이용하여 기울기를 산정하였다.

Fig. 3은 로그시간에 대한 지중 순환수 평균온도 변화를 보여주고 있다. 순환수 평균온도 곡선을 이용하여 직선의 기울기를 구한 결과 기울기(a)는 4.72로 계산되었으며, 식 (1)에 대입하여 지중 열전도율(k)을 계산한 결과 3.49 W/(m·K)로 측정되었다.

$$k = \frac{Q}{4\pi \cdot a \cdot L_{SCW}} \quad (1)$$

여기서 L_{SCW} 는 지열 우물공의 길이로 지하수 안정수위에서부터 유공관 끝단까지의 거리를 말한다.

Fig. 4는 SCW형 지중열교환기 내에서 이루어지는 시간에 따른 열전달량의 변화를 보여주고 있다. 그래프에서 투입열량 Q_{in} 은 지중열교환기로 투입된 열량을 의미하며, 지중에서 열을 흡수하는 열량을 Q_{GHX} 로 나타내었다. 또한 순환수의 온도가 상승하여 엔탈피가 상승하는 부분을 ΔH_{Fluid} 로 하여 도식화 하였으며, 식 (2)-(4)와 같은 방식으로 계산을 진행하였다.

$$\Delta H_{Fluid} = \dot{m} C_p (T_{out(n+1)} - T_{out(n)}) \quad (2)$$

[$n = 1, 2, 3 \dots$]

여기서 n은 시험에서 측정된 데이터의 순번을 의미한다.

투입열량은 식 (3)을 이용하여 계산하였으며, 지중열교환기의 열전달량은 식 (4)로 계산하였다.

$$Q_{in} = \dot{m} C_p (T_{in(n)} - T_{out(n)}) \quad (3)$$

$$Q_{GHX} = Q_{in} - \Delta H_{Fluid} \quad (4)$$

따라서 SCW형 지중열교환기의 지중으로의 열교환량 (Q_{GHX})을 계산할 수 있다. 지중열교환기로 열량이 투입된 초기에는 열전달이 주로 우물공내부에서 이루어기 때문에 순환수의 에너지가 급격하게 증가하게 된다. Fig. 4에서 보듯이 초기에 순환수의 엔탈피 증가가 크게 나타나는 반면 지중으로의 열전달은 작게 나타난다. 이후 시간이 경과함에 따라 순환수의 엔탈피 증가는 감소하고 지중으로의 열전달이 급격히 증가하며 약 10시간 경과 이후 투입된 열량의 90% 이상이 지중으로 전달되는 것을 알 수 있다.

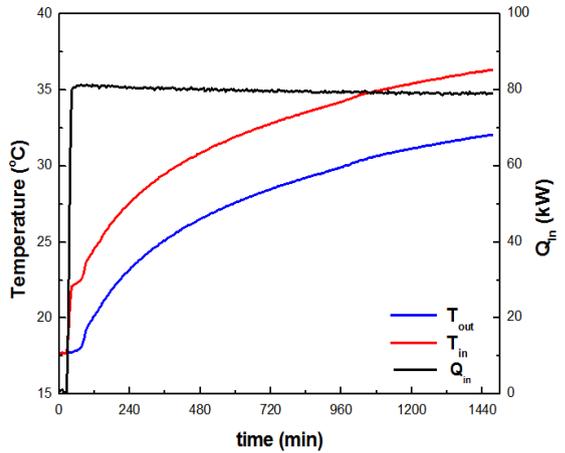


Fig. 2. Variation of the circulation water temperature, Q with operating time.

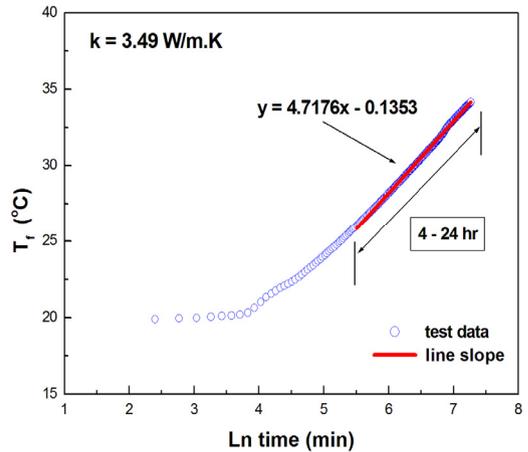


Fig. 3. $\ln t$ vs. T_f .

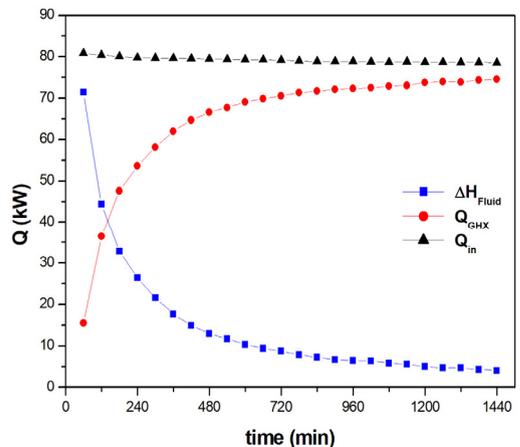


Fig. 4. Energy balance with time.

Table 1. Parameter value.

Parameter	Symbol	Unit	Value
Initial ground temperature	T_{in}, T_o	℃	17.7
Heat injection	$Q_{injection}$	kW	79.6
Circulation water flow rate	\dot{m}_{pump}	kg/min	265
Bleeding rate	$\eta_{bleeding}$	%	0, 5, 10, 20, 30
SCW GHX efficiency	η_{GHX}	%	Experimental value

블리딩율에 따른 지중열교환기의 해석 모델링은 다음과 같다. 지열 열펌프 시스템이 일정하게 가동된다는 가정하에 순환유량(\dot{m}_{pump})과 열펌프의 용량($Q_{injection}$)을 입력하게 되면 열펌프에서 토출되는 순환수의 온도는 식 (6)을 이용하여 계산할 수 있으며, 블리딩율에 따른 블리딩량 식 (7)과 블리딩을 통해 지표로 배출된 열량은 식 (8)으로 계산할 수 있다.

$$T_{in(n)} = T_{out(n)} + \frac{Q_{injection}}{\dot{m}_{pump} \times C_p} \quad (6)$$

$$\dot{m}_{bleeding} = \dot{m}_{pump} \times \eta_{bleeding} \quad (7)$$

$$Q_{bleeding} = \dot{m}_{bleeding} \times C_p \times (T_{in(n)} - T_{out(n)}) \quad (8)$$

블리딩에 의해 지표로 배출된 열량을 계산하면 실제 SCW형 지중열교환기로 투입된 열량을 식 (9)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$Q_{scw1} = Q_{injection} - Q_{bleeding} \quad (9)$$

본 해석에서는 블리딩에 의한 지하수의 유입이 두 가지 경우로 가정하여 살펴보았으며, 첫째는 지하수의 유입이 상부에서 이루어지는 경우(Fig. 5)와 두 번째는 지하수의 유입이 하부에서 이루어지는 경우(Fig. 6)로 살펴보았다.

Fig. 5와 같이 지하수가 상부쪽에서 유입되는 경우에 지열 우물공으로 유입된 순환수(\dot{m}_{SCW})와 유입된 지하수가 만나 섞이게 되는데 이때 순환수의 온도를 식 (10)을 이용하여 계산하였다.

$$T_{SCW} = \frac{(\dot{m}_{SCW} \cdot C_p \cdot T_{in}) + (\dot{m}_{bleeding} \cdot C_p \cdot T_o)}{(\dot{m}_{SCW} \cdot C_p) + (\dot{m}_{bleeding} \cdot C_p)} \quad (10)$$

여기서 $\dot{m}_{SCW} = \dot{m}_{pump} - \dot{m}_{bleeding}$ 로 계산된 순환수 유량을 의미한다.

지하수의 유입에 따른 이론적 열량(Q_{flash})은 식(11)을 이용하여 계산하였으며, 이때 유입수의 온도(T_o)는 지중 온도로 일정한 것으로 가정하였다.

$$Q_{flash} = \dot{m}_{bleeding} \times C_p \times (T_{scw} - T_o) \quad (11)$$

따라서 지중열교환기로 투입된 실제 열량(Q_{scw2})은 식 (12)와 같다.

$$Q_{scw2} = Q_{scw1} - Q_{flash} \quad (12)$$

지중열교환기 내에서 순환수의 열량과 지중 암반과의 열교환량(Fig. 4)은 실험값을 이용하여 계산하였다. 따라서 본 프로그램에서는 현지의 지중열교환기의 지중특성을 반영하여 열효율값을 프로그램에 적용하였으며, 열효율값은 식 (13)으로 표현하여 적용하였다.

$$\eta_{GHX} = a + bT_x + cT_x^2 \quad (13)$$

여기서 T_x 는 SCW형 지중열교환기의 시간 변화에 따른 지중순환수 평균온도와 지중 초기온도의 차를 말한다. 따라서 지중에서 흡수된 열량(Q_{GHX})은 식 (14)와 같이 계산하였으며, 식 (15)을 이용하여 지중 순환수에 축적된 열량(Q_{GHX2})을 계산하였다.

$$Q_{GHX} = Q_{scw} \times \eta_{GHX} \quad (14)$$

$$Q_{GHX2} = Q_{scw2} \times Q_{GHX} \quad (15)$$

지중열교환기로 투입된 열량과 지중에서 흡수한 열량의 차를 이용하여 심정펌프로 유입되는 순환수 온도를 식 (16)으로 계산하였다.

$$T_{in(n+1)} = T_{in(n)} + \frac{Q_{GHX2}}{\dot{m}_{SCW} \times C_p} \quad (16)$$

이러한 과정으로 우물공 순환수는 계속적으로 순환하면서 온도가 변화하게 되며, 1,440분(24hr) 동안 순환수 온도변화를 분석하였다.

Fig. 6과 같이 지하수가 하부에서 유입되는 경우에 지열 우물공으로 유입된 우물공 순환수는 기존 SCW형 지중열교환기의 열전달 과정과 같이 열전달이 이루어진 다음 하단에서 유입된 지하수와 만나 섞이게 된다. 따라서 지하수가 상부에서 유입되는 방식과 반대로 성능해석이 이루어진다. 즉 처음에 유입된 순환수는 지중 암반과 열교환을 한 후 하단에서 유입된 지하수와 열교환을 하는 방식으로 성능해석을 하였다.

Fig. 5는 지하수가 상부에서 유입되어지는 경우의 SCW형 지중열교환기의 성능해석 모델링을 도식화 하였으며 Fig. 6은 지하수가 하부에서 유입되어지는 경우의 SCW형 지중열교환기의 성능해석 모델링을 보여주고 있다. 또한 Table 1에 성능해석에 사용된 초기 입력값을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 블리딩이 이루어져도 지열 우물공 내부에서 지하수 수위변화 없이 새로운 유입수가 들어온다고 가정하여 해석하였다.

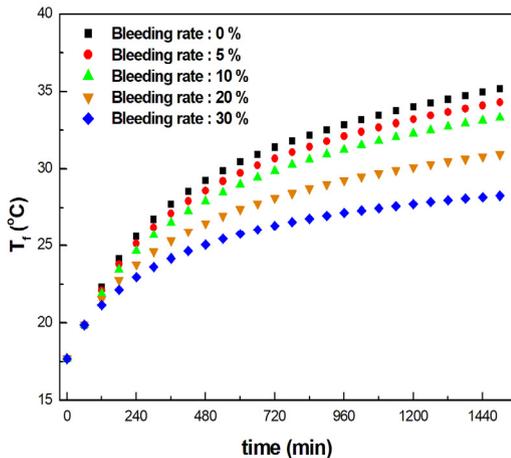


Fig. 7. Variation of the T_f with operating time and bleeding rate (Top).

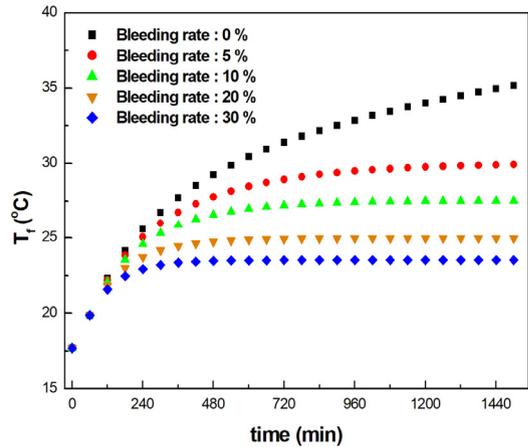


Fig. 8. Variation of the T_f with operating time and bleeding rate (Bottom).

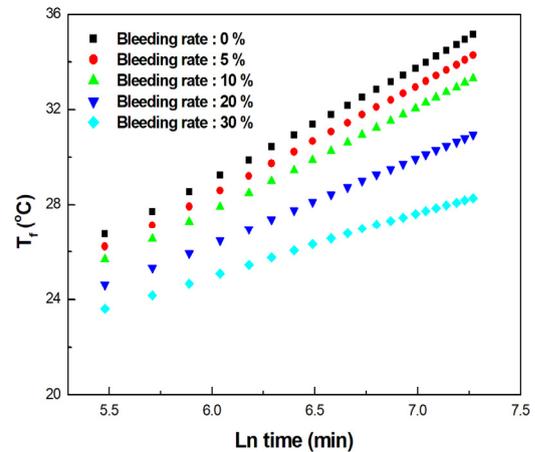


Fig. 9. Variation of $\text{Ln } t$ vs. T_f (Top).

Fig. 7은 SCW형 지중열교환기의 상부에서 유입수가 유입될 경우에 여러 블리딩율에 대해 시간에 따른 지중 순환수 온도변화를 보여주고 있다. Fig. 5에서 보여지는 것처럼 유입수가 상부에서 유입되어 지중 순환수와 혼합을 한 후 지중과 열교환을 하기 때문에 블리딩율에 따른 지중 순환수의 온도변화는 블리딩율이 증가함에 따라 낮아지는 경향을 보이고 있으며, 블리딩율이 증가하여도 시간에 따라 지중 순환수의 온도는 모두 상승하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 SCW형 지중열교환기의 하부에서 유입수가 유입되는 경우에 블리딩율에 따른 지중 순환수 온도변화를 보여주고 있다. 그래프에서 보여지는 것처럼 지중열교환기로 유입된 우물공 순환수가 지중과 열교환을 한 후

하부에서 유입된 지하수와 혼합되면서 지중 순환수의 온도는 처음에는 상승하는 경향을 보이다가 블리딩율에 따라 차이를 보이나 일정시간이 지나면서 블리딩율이 일정 이상이 되면 순환수의 온도는 일정하게 유지하는 경향을 보였다. 또한 블리딩율이 증가하면서 순환수의 온도는 낮게 나타났으며, 온도 상승구간 시간도 짧아지는 경향을 보인다.

Fig. 9는 지중 유입수가 상부에서 유입되는 경우에 로그시간에 따른 기울기 곡선을 보여주고 있다. 상부측으로 유입수가 유입되는 경우에는 블리딩율이 변화하여도 순환수의 온도가 상승하는 경향을 보이기 때문에 로그시간에 대한 순환수의 기울기 곡선을 계산할 수 있으며, 블리딩율이 증가할수록 기울기는 작게 나타난다.

Fig. 10은 지중 유입수가 하부에서 유입되는 경우에 로그시간에 따른 기울기 곡선을 보여주고 있다. 하부측으로 유입수가 유입되는 경우에는 블리딩이 시작되면서 일정시간 이후에 순환수온도가 일정하게 유지되기 때문에 로그시간에 대한 순환수 기울기 곡선이 형성되지 않는다.

Fig. 11은 블리딩이 10% 이루어질 경우, 상부측과 하부에서 유입수가 유입되는 경우에 따른 지중 순환수의 온도 변화를 보여주고 있다. 블리딩이 이루어지지 않는 경우에 지중열교환기로 열량이 투입되고 1,440분(24hr)이 경과되었을 때 지중 순환수온도는 35.2 °C를 보였으며, 블리딩이 10% 인 경우 상부측으로 유입수가 유입되는 경우에는 지중 순환수의 온도는 33.3 °C, 하부측으로 유입되는 지중 순환수의 온도는 27.5 °C를 보였다. 상부측으로 유입수가 유입되는 경우 블리딩을 하지 않는 경우 보다 순환수 온도가 1.9 °C로 낮게 나타났으며, 하부에서 유입수가 유입될 경우에는 순환수 온도가 7.7 °C로 훨씬 낮게 나타났다.

Fig. 12는 지중 유입수가 상부에서 유입되는 경우에 블리딩율 0 ~ 30% 에서의 열전도도 변화를 보여주고 있다. 지중열교환기 상부측으로 지중 유입수가 유입되어 지는 경우 블리딩율이 낮은 영역에서 지중 열전도율은 완만하게 증가하다가 블리딩율이 높아짐에 따라 지중 열전도율은 급격하게 상승하는 경향을 보이며 30% 블리딩율에서 지중 열전도율은 블리딩이 없는 경우에 비해 179.1% 증가하였다. 하부측으로 지하수가 유입될 경우 Fig. 10에서 보듯이 일정 블리딩율 이상에서는 온도 기울기가 형성되지 않아 선형이론으로 지중 열전도율을 산출할 수 없으나 지중 순환수의 온도가 상부에서 유입되는 경우보다 온도가 낮게 형성되어지는 것으로 보아 하부로 유입될 경우의 블리딩 효과는 더 클 것으로 판단된다.

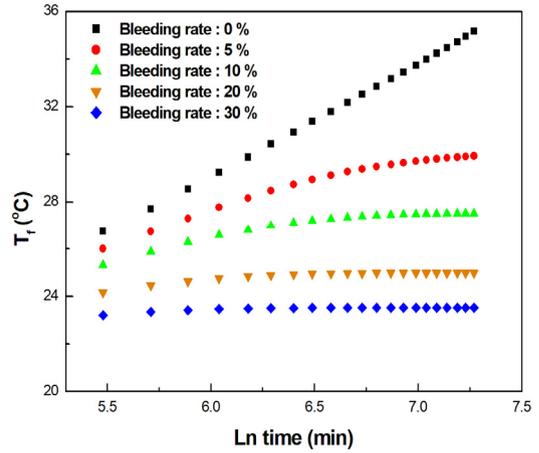


Fig. 10. Variation of $\text{Ln } t$ vs. T_f (Bottom).

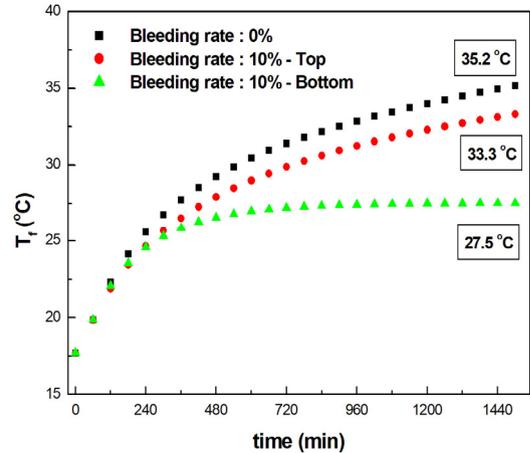


Fig. 11. Comparison of the T_f with bleeding rate 10%.

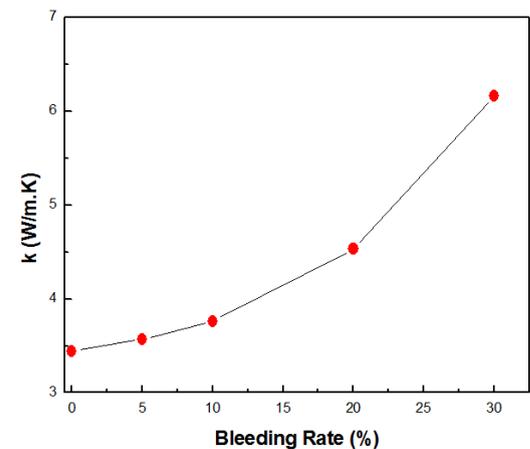


Fig. 12. Variation of the k with bleeding rate(Top).

3. 결론

본 연구에서는 SCW형 지중열교환기가 설치된 현장의 열응답 시험결과를 기반으로 블리딩 해석 모델을 정립하고 블리딩을 및 지하수 유입수의 위치변화가 SCW형 지중열교환기 열성능에 미치는 영향을 수치해석을 통하여 고찰하였다. 본 해석에서는 지하수가 지중열교환기 상단에서 유입되는 경우와 하단에서 유입되는 경우의 두 가지 경우로 가정하여 분석하고 비교하였다. 이 해석에서 블리딩에 의한 수위변화는 발생하지 않는 것으로 가정하였으며 우물공 주변의 지하수는 무한하다고 가정하였다.

해석결과 지하수가 지중열교환기 상부에서 유입될 경우 지중열교환기 순환수와 혼합한 후 지중과 열교환이 이루어지므로 지중열교환기 순환수의 온도변화는 블리딩율이 증가함에 따라 낮아지는 경향을 보이며 지중 열전도율은 0 ~ 30% 블리딩율에서 0 ~ 179% 증가하는 결과를 보였다. 반면에 지하수가 지중 열교환기 하부에서 유입될 경우 지중열교환기 순환수는 지중과 열교환을 한 후 하단에서 유입된 지하수와 혼합하기 때문에 지중열교환기 순환수의 온도변화는 시간에 따라 초기에는 상승하는 경향을 나타내지만 블리딩율이 증가함에 따라 상승폭은 둔화하고 블리딩율이 약 10%를 초과하면 일정하게 유지되는 경향을 보였다. 이 경우 온도 기울기가 형성되지 않아 지중 열전도율을 산출할 수 없으나 지중 순환수의 온도가 상부에서 유입되는 경우 보다 낮게 형성되므로 블리딩 효과는 더 클 것으로 판단된다.

References

[1] K. S. Chang and M. J. Kim, "An experimental study on the thermal performance evaluation of SCW ground heat exchanger," *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, vol. 25, no. 1, 2017.
DOI: <http://www.riss.kr/link?id=A103549538>

[2] Ministry of Trade, Industry and Energy Announcement 2015-263, "Standards of Support, Installation and Management for New and Renewable Energy System," 2015.

[3] Sanner, B., Hellström, G., Spitler, J., and Gehlin, S., "More than 15 years of mobile thermal response test - a summary of experiences and prospects," *Proceeding European geothermal congress, Pisa, Italy*, 2013.

[4] R.A. Beier, M.D. Smith, J. Spitler, Reference data sets for vertical borehole ground heat exchanger models

and thermal response test analysis, *Geothermics*, vol. 40, pp. 79-85, 2011.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.12.007>

[5] K. S. Chang and M. J. Kim, "A study on the heat transfer characteristics of various construction of SCW type ground heat exchanger," *KJACR*, vol. 26, no. 10, pp. 460-466, 2014
DOI: <https://doi.org/10.6110/KJACR.2014.26.10.460>

[6] A.M. Gustafsson, L. Westerlund, "Multi-injection rate thermal response test in groundwater filled borehole heat exchanger," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 5, pp. 1061-1070, 2010
DOI: <http://www.riss.kr/link?id=O52926023>

[7] J. Raymond, R. Therrien, L. Gosselin, "Borehole temperature evolution during thermal response tests", *Geothermics*, vol. 40, no. 1, pp. 69-78, 2011.
DOI: <http://www.riss.kr/link?id=O55330772>

[8] K. S. Chang and M. J. Kim, "Analysis and thermal response test for vertical ground heat exchanger with two U-loop configuration," *Int. J. Energy Res.* 40, pp. 189-197, 2016.
DOI: <http://www.riss.kr/link?id=O67629142>

[9] Incropera, F. P. and Dewitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer," 4th Edition, John Wiley and Sons, Inc, 1996

장 근 선(Keun-Sun Chang)

[정회원]



- 1979년 2월 : 서울대학교 기계공학 (공학사)
- 1986년 5월 : 루이지애나주립대 기계공학 (공학석사)
- 1989년 8월 : 미루이지애나주립대 기계공학 (공학박사)

- 1989년 10월 ~ 1995년 2월 : 한국원자력 연구소 선임연구원(실장)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

냉동공조 열교환기 및 시스템 설계

김민준(Min-Jun Kim)

[정회원]



- 2004년 2월 : 명지대학교 기계공학과 (공학사)
- 2007년 8월 : 한국기술교육대학교 산업공학과 (공학석사)
- 2017년 2월 : 선문대학교 기계공학과 (공학박사)

- 2005년 6월 ~ 2008년 8월 : 한국생산기술연구원 연구원
- 2008년 9월 ~ 현재 : 한국냉동공조인증센터 책임연구원

<관심분야>

냉동공조 시스템 및 지열 히트펌프 시스템 설계, 지중열교환기, 축열식 냉난방설비, 축전식 냉난방설비