

다양한 형상의 SCW형 지중 열교환기 열전달 특성에 관한 연구

A Study on the Heat Transfer Characteristics of Various Construction of SCW Type Ground Heat Exchanger

장근선(Keun-Sun Chang)¹, 김민준(Min-Jun Kim)^{2*}

¹선문대학교 기계공학과, ²선문대학교 대학원 기계공학과

¹Department of Mechanical Engineering, SunMoon University, Chungnam 336-708, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Graduate School of SunMoon University, Chungnam 336-708, Korea

(Received June 3, 2014; revision received July 31, 2014; Accepted: August 6, 2014)

Abstract This paper uses in-situ thermal response tests to present the characteristics of the ground thermal conductivities of three different SCW GHX. These SCW GHXs were installed in the same site in Sejong City. The three different cases are distinguished by the flow direction and the presence of a filler. The first type (A) is constructed for water to flow downstream. The second (B) and third (C) types are designed for water to flow upstream, and a filler is additionally inserted into the third type. The results of the in-situ thermal response tests, indicate that the ground thermal conductivity for types (A), (B) and (C) are of 4.84 W/m · K, 3.40 W/m · K, and 11.62 W/m · K, respectively.

Key words Ground thermal conductivities(지중 열전도도), SCW GHX(SCW형 지중 열교환기), In-situ thermal response test(현장열응답시험), Filler(채움재)

† Corresponding author, E-mail: mjkim@kraac.or.kr

기호설명

- a : 로그시간에 대한 순환수 평균온도 기울기
 k : 지중 열전도도 [W/m · K]
 k'' : SCW형 지중 열교환기 지중 열전도도 [W/m · K]
 L : 지중 열교환기 깊이 [m]
 L'' : 지열 우물공 길이 [m]
 Q : 지열 우물공에 투입된 평균열량 [W]

1. 서 론

지열원 열펌프 시스템은 2000년대 초반 우리나라에 보급된 이후 그 수요가 해마다 급격하게 증가하고 있을 뿐만 아니라 시스템 설치용량 또한 대형화 되고 있다. 지열원 열펌프 시스템이 대형화 되면서 다른 지중 열교환기 방식보다 단위 길이당 열 이용량이 높은 것으로 평가되어지는 SCW형(Standing Column Well) 지중 열교환기의 보급이 증가하고 있는 추세이다.

SCW형 지중 열교환기는 지중에 우물공을 천공한 후 우물공 내부의 지하수를 직접 취수하여 사용하기 때문에 지중 열교환기가 설치된 장소의 지중 상태(연암층, 파쇄대, 대수층 등의 발달정도)가 매우 중요하다. 그리고

국내 지하수의 수위가 지역적으로 많은 차이를 보이며, 지중 열교환기에 설치되어지는 유공관의 높이도 설계에 따라 다르게 적용되고 있다. 또한 SCW형 지중 열교환기의 타입별로 순환수의 흐름이 상이할 뿐만 아니라 우물공 내부에 채움재가 삽입되어지는 형태도 있다.⁽¹⁾

현재 국내에서는 여러 가지 타입의 SCW형 지중 열교환기가 보급되고 있으며, 이러한 SCW형 지중 열교환기를 평가하는 방법으로 수직 밀폐형 지중 열교환기와 같이 현장열응답시험을 진행하고 라인소스방법(Line Source Method)를 이용하여 지중 열전도도를 산정하고 있다.⁽²⁾

Choi et al.⁽³⁾은 개방형 지중 열교환기 설계를 위한 지중 열전도도 평가에서 SCW형 지중 열교환기를 중심으로 현장 열응답시험 시험데이터와 해석프로그램을 이용하여 지중 열전도도를 평가한 결과 현장열응답시험 결과로부터 얻어진 지중 열전도도 비다공질체 지반으로 가정하여 설계하는 현행 설계법에 충분한 적용성이 있다고 보고하였다.

따라서 본고에서는 세종시에 위치한 정부출연연구기관 신축부지에 3가지 타입의 SCW형 지중 열교환기를 설치한 후 우물공 내부 지중 상태를 영상촬영기를 이용하여 파악하였으며 지열 우물공의 길이를 산출하고 이를 바탕으로 3가지 타입의 SCW형 지중 열교환기의 지중 열전도도를 산출하여 비교하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 SCW형 지중 열교환기

국내에서 적용되어지는 SCW형 지중 열교환기의 정의는 지중에 수직으로 우물공을 설치하고 우물공으로부터 지하수를 취수하여 열원으로 사용한 후 지하수를 다시 동일한 우물공으로 재주입하는 지중 열교환기를 말한다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 3가지 타입의 SCW형 지중 열교환기 형상을 보여주고 있다.

Fig. 1 a type의 SCW형 지중 열교환기는 지중에 우물공을 천공한 후 우물공 내부에 내부케이싱(PVC 125 A)을 삽입한 구조로 심정펌프에서 송출된 지하수는 지열 열펌프에서 열교환을 한 후 지하수는 내부케이싱과 외부케이싱의 사이로 환수되어지며 열교환기 하단부에서 이동하면서 지중과 열을 교환한다. 열교환기 최하단부에는 유공관이 설치되어 순환수가 내부케이싱 안쪽으로 유입되어지며 심정펌프로 다시 이동하는 구조이다.

Fig. 1 b type의 SCW형 지중 열교환기는 지중에 우물공을 천공한 후 우물공 최하단부까지 환수관(50 A)을 설치하고 심정펌프는 지중 약 40 m 부근에 설치하였다. 지열 열펌프에서 환수된 순환수는 우물공 최하단에서 배출되어지며 지표쪽 방향으로 이동하면서 지중과 열을 교환한다.

Fig. 1 c type의 SCW형 지중 열교환기는 b type의 지

중 열교환기와 구조 및 형상은 같으나 우물공 내부에 채움재를 채운 방식으로 지중 열교환기의 함몰을 방지하고 순환수의 유동을 교란시켜 열교환 성능을 향상시킨 방식이다. 이때 우물공 내부로 삽입된 채움재 크기는 약 1~3 cm의 형상으로 비교적 고른 여과사리가 삽입되었으며, 채움재는 심정펌프보다 약 10 m 낮은 지점까지 채워졌다.

본 연구는 세종시 4 생활권 연구부지에 위치한 정부출연 연구기관 신축부지 현장으로 각 타입의 SCW형 지중 열교환기를 설치한 후 공내부 열상촬영기를 이용하여 우물공 내부를 영상촬영하였으며, SCW형 지중 열교환기의 사양은 다음과 같다.⁽⁴⁾

Fig. 1 a type의 경우 우물공 깊이는 423 m, 우물공의 직경 200 mm, 내부케이싱으로 수도용 경질 폴리염화비닐관 125 A가 사용되었다. 우물공 내부의 지하수 안정수위는 12 m, 유공관 최하단부의 깊이는 414 m로 지열 우물공 길이는 402 m로 측정되었다. 그리고 우물공 내부에 지하수 대수층은 32 m, 405 m에서 관찰되었다.

Fig. 1 b type, c type의 경우는 우물공 깊이 296 m, 우물공의 직경 200 mm, 환수관으로 수도용 경질 폴리염화비닐관 50 A가 사용되었다. 우물공 내부의 지하수 안정수위는 14 m, 유공관 최하단부의 깊이는 284 m로 지열 우물공 길이는 270 m로 측정되었다. 지하수 대수층은 18~46 m에 여러 개의 대수층 및 파쇄대가 형성되어 있으며, 286 m에 또 하나에 대수층이 관찰되었다.

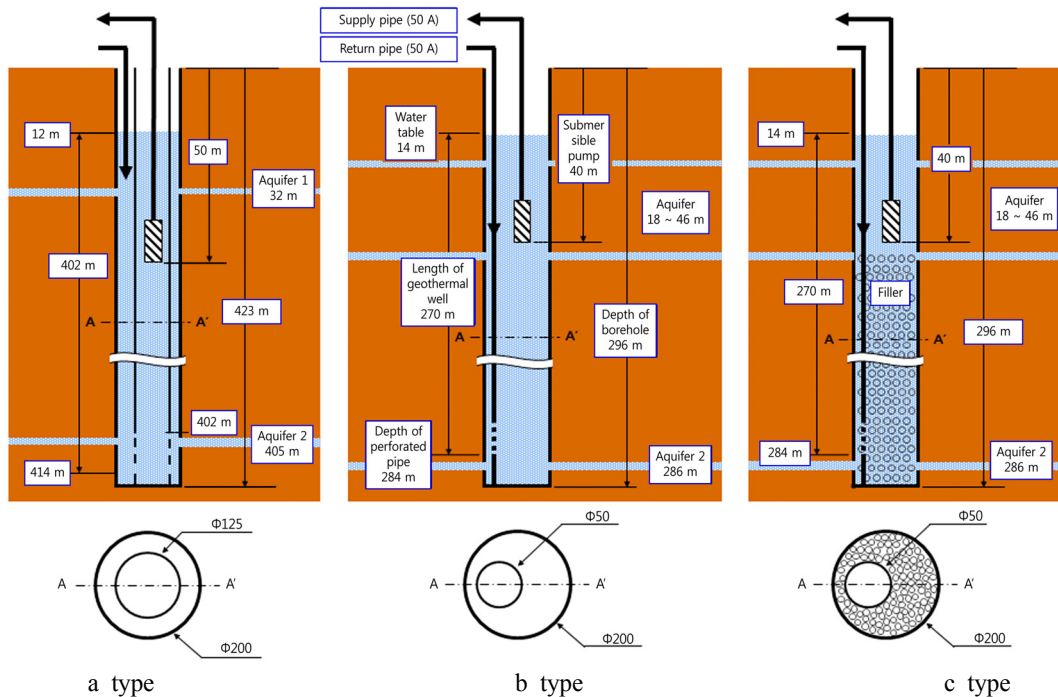


Fig. 1 Three kind of SCW type ground heat exchanger.

2.2 SCW형 지중 열교환기 현장열응답시험

SCW형 지중 열교환기의 지중 열전도도를 측정하기 위한 방법으로 현장열응답시험이 진행된다. SCW형 지중 열교환기의 지중 열전도도 산출을 위한 시험방법은 지식경제부 고시 2012-7호⁽²⁾(신재생에너지 설비지원, 설치, 관리에 관한 기준)에 정리되어 있으며, Table 1은 SCW형 지중 열교환기 지중 열전도도 시험조건을 보여주고 있다.

Fig. 2는 SCW형 지중 열교환기의 지중 열전도도 측정시험의 개략도를 보여주고 있다. 지중 열교환기와 시험기를 파이프를 연결한 후 심정펌프를 이용하여 지하수를 순환시키면서 우물공 내부를 청소한다. 지중 열교환기로부터 배출되는 이물질(유공관 찌꺼기 및 암석가루)을 제거하기 위해 여과기 및 미세필터를 사용하였다. 지중초기온도는 우물공 내부 청소를 진행하면서 측정(약 5시간 후)하였다. 지중 열교환기로부터 배출되는 이물질의 양이 시험 진행에 지장이 없다고 판단이 되면 지중 열교환기로 열량을 투입한다. 이때 투입열량은 지열 우물공 길이에 (200~500) W/m의 곱으로 산정한다.

본 시험에서는 SCW형 지중 열교환기로 열량을 투입하기 위해 스팀보일러를 이용하였다. 투입열량은 스팀보일러에서 발생한 스팀의 양을 컨트롤 밸브를 사용하여 지중 열교환기에 적절한 열량을 투입하였다. 스팀

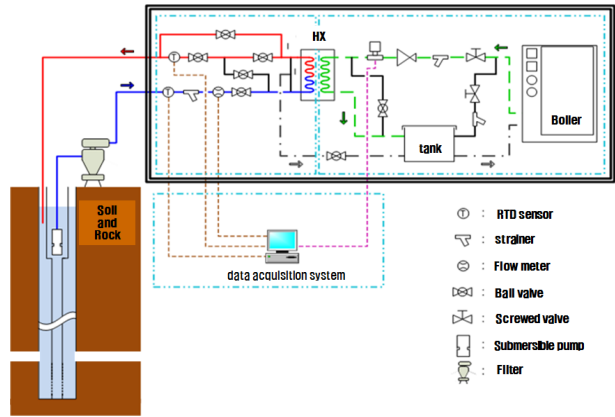


Fig. 2 Schematic diagram of in-situ thermal response test of SCW type ground heat exchanger.

과 지중 순환수를 열교환시키기 위해 환형열교환기를 사용하였으며, SCW형 지중 열교환기를 평가하기 위해 제작된 시험기는 (0~120) kW까지 투입열량을 제어할 수 있도록 설계하였다. 지중 순환수의 온도를 측정하기 위해 검교정이 이루어진 RTD 센서(± 0.1℃)를 시험기 입출구에 설치하였으며, 전자식 유량계(정밀도 ± 0.5%)를 사용하여 순환수 유량을 측정하였다. 지중 열교환기에 열량이 투입된 이후에 24시간 이상 시험을 진행하면서 데이터를 5분 간격으로 취득하였다.

Table 1 SCW type ground heat exchanger test condition

	item	standard condition
measurement time	1 begin test	after 72 hr at complete borehole
	2 initial ignoring time	start test after 2 hr
	3 test duration	more than 24 hr
	4 data acquisition	below 10 min
measurement condition	5 injection heat capacity	200~500 W/m
	6 Loop in/out dT	3.5~7.0℃
measurement error	7 Temperature	below ± 0.3℃ (standard deviation toward average temperature)
	8 injection heat capacity	below ± 3.0% (standard deviation toward average heat capacity)
	9 begin remeasurement	recovery 3.0% below of ground initial temperature

2.3 SCW형 지중 열교환기 지중 열전도도 산출

현재 SCW형 지중 열교환기의 지중 열전도도를 계산하는 방식은 수직 밀폐형 지중 열교환기와 같은 라인 소스방법이 이용되고 있다. 식(1)은 수직 밀폐형 지중 열교환기의 지중 열전도도 계산식을 보여주고 있다.

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

위 식에서 k 는 수직 밀폐형 지중 열교환기의 지중 열전도도를 나타내며, Q 는 지중 열교환기에 투입된 평균 열량, a 는 로그시간에 대한 순환수 평균온도 변화에 대한 직선의 기울기, L 은 지중 열교환기 깊이를 말한다.

그러나 SCW형 지중 열교환기는 수직 밀폐형 지중 열교환기와는 지중 열교환기의 길이를 산출하는 방법에 있어 다소 차이를 보인다. 수직 밀폐형의 경우 지중에 삽입된 PE 파이프의 길이를 열교환기 길이로 사용하고 있으나 SCW형 지중 열교환기의 경우 지열 우물공의 천공 깊이를 열교환기 길이로 사용하는 것은 적절하지 않다.

따라서 본 연구에서는 SCW형 지중 열교환기에서 실제 지하수가 유동하는 거리 즉, 지하수 안정수위에서

부터 유공관 끝단까지의 거리를 측정하여 사용하였으며, SCW형 지중 열교환기의 지중 열전도도 계산식은 식(2)와 같이 정의하였다.

$$k'' = \frac{Q}{4\pi \cdot L'' \cdot a} \quad (2)$$

위 식에서 k'' 는 SCW형 지중 열교환기의 지중 열전도도를 나타내며, L'' 은 지열 우물공의 길이로 지하수 수위에서부터 유공관 끝단까지의 길이를 말한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 a type SCW형 지중 열교환기

Fig. 3은 Fig. 1에서 a type의 SCW형 지중 열교환기의 시험데이터를 보여주고 있다. 시험에서 우물공에 투입된 평균열량은 약 89.9 kW(220 W/m)로 24시간동안 안정적으로 투입되었다. 시험용 우물공에 설치된 심정펌프의 지하수 평균유량은 약 270 lpm으로 나타났다. 본 시험용 지중 열교환기의 지중초기온도는 18.43°C로 측정되었다.

Fig. 4는 로그시간에 대한 순환수 평균온도 그래프를 보여주고 있다. 위 그래프에서 구해진 데이터에서 지중 열교환기에 열량투입 후 2시간의 데이터를 제외한 순환수 평균온도(T_{mean}) 데이터를 이용하여 직선의 기울기를 구하는데 본 시험에서는 기울기가 3.62로 계산되었다.

앞서 구해진 값들을 식(2)에 적용하면 a type의 SCW형 지중 열교환기의 지중 열전도도는 4.84 W/m·K로 측정되었다.

본 시험이 이루어진 세종시 4 생활권 주변에 수직 밀폐형 지중 열교환기(심도 185 m 관경 2 tube 30 A)에

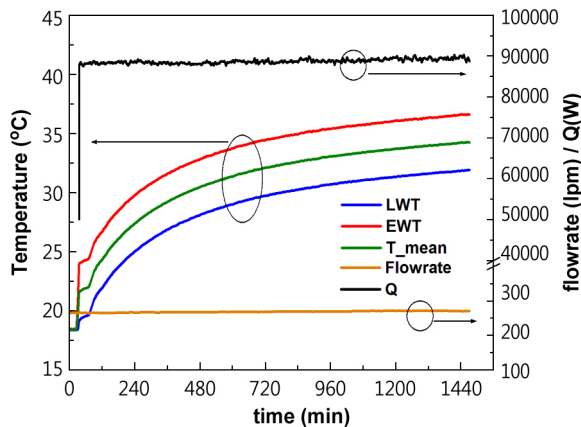


Fig. 3 Variation circulation water temp., flowrate, injection heat capacity at elapsed test time(a type).

서 지중초기온도 16.06°C, 지중 열전도도 2.50 W/m·K를 보였다.

a type의 SCW형 지중 열교환기는 수직 밀폐형 지중 열교환기보다 열교환기의 심도가 약 230 m 깊어지면서 지중초기온도가 2.37°C 높게 나타났으며, 지중 열전도도 또한 2.34 W/m·K 높게 나타났다. 이는 수직 밀폐형 지중 열교환기 경우 보어홀 내부에 그라우팅재와 PE파이프가 삽입된 상태에서 열전달이 이루어지는 반면 SCW형 지중 열교환기는 지중 순환수 보어홀 내부를 순환하면서 암반과 직접 열교환이 이루어지기 때문으로 생각된다.

Fig. 5는 Fig. 1에서 b type의 SCW형 지중 열교환기의 시험데이터를 보여주고 있다. 시험에서 우물공에 투입된 평균 열량은 약 62.1 kW(230 W/m)로 24시간동안 안정적으로 투입되었으며, 시험용 우물공에 설치된 심정펌프의 지하수 평균유량은 약 225 lpm으로 나타났다. 본 시험용 지중 열교환기의 지중초기온도는 17.30°C로 측정되었다.

Fig. 6은 로그시간에 대한 순환수 평균온도 그래프를 보여주고 있다. 본 시험에서는 지중 순환수 기울기가 5.39로 나타났다.

앞서 구해진 값들을 식 (2)에 적용하면 b type의 SCW형 지중 열교환기의 지중 열전도도는 3.11 W/m·K로 계산되었다.

b type의 SCW형 지중 열교환기 경우 a type SCW형 지중 열교환기보다 지중 열전도도가 낮게 측정되었으며, 이유를 크게 세가지로 정리 할 수 있다.

첫째는 SCW형 지중 열교환기에서 사용된 지열 우물공 길이를 들 수 있다. Fig. 1에서 보면 a type의 경우 지열 우물공 길이가 지하수 수위로부터 유공관 끝단까지로 순환수가 이동하면서 지중과 열교환을 하는 반면에 b type의 경우 지열 열펌프로부터 환수된 순환

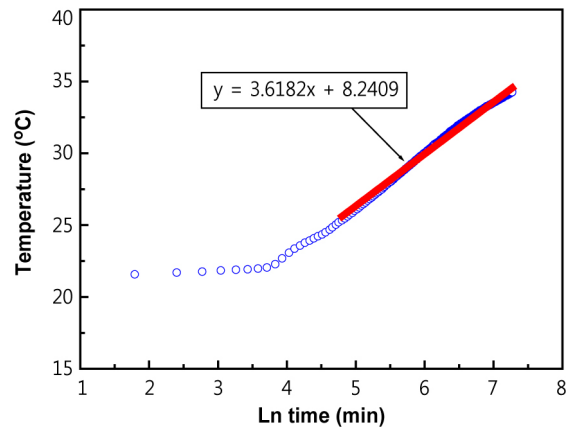


Fig. 4 T_{mean} vs. Ln time(a type).

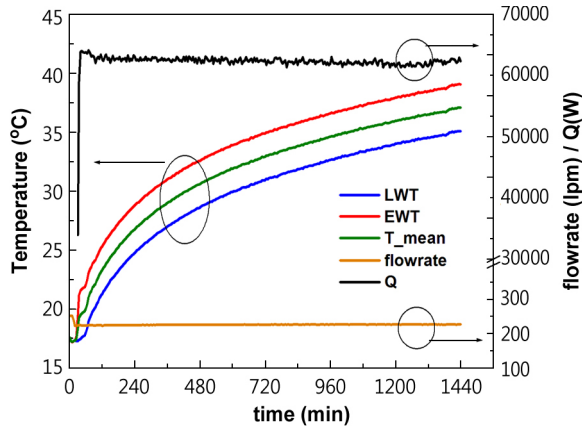


Fig. 5 Variation circulation water temp., flowrate, injection heat capacity at elapsed test time(b type).

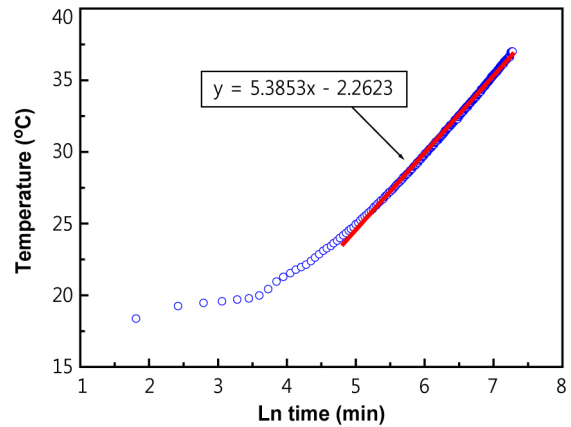


Fig. 6 Tmean vs. Ln time(b type).

수가 우물공의 최하단으로 배출되어 심정펌프까지 이동하면서 지중과 열교환을 하는 구조를 가지다보니 지하수 안정수위부터 심정펌프설치 깊이만큼 열교환기로 사용하지 못하기 때문이다.

두 번째는 우물공 내부에서 지중 순환수의 방향을 들 수 있다. a type의 SCW형 지중 열교환기는 지하수 수위에서 유공관 설치깊이로 심도가 깊어지면서 지중과 열교환을 하는 구조이며 b type의 경우 지열 우물공 최하단에서 순환수가 환수되어 심정펌프 방향으로 이동하면서 열교환을 한다. 지중의 온도는 심도가 깊어지면서 온도가 상승하는 경향을 보인다.

3.2 b type SCW형 지중 열교환기

Fig. 7은 본 현장 지열이용검토서에 정리된 지열 우물공 심도별 지중온도 그래프를 보여주고 있다. 지중심도

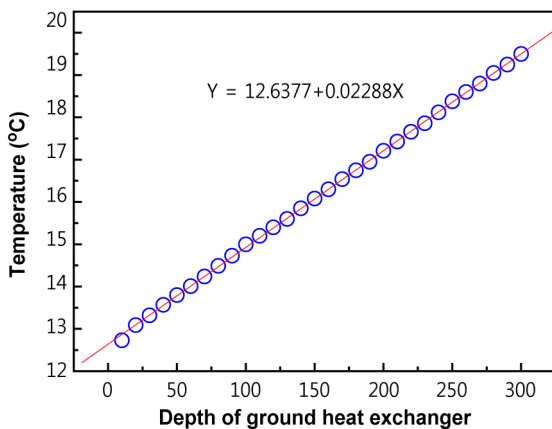


Fig. 7 Groundwater temperature by ground heat exchanger depth.

가 깊어지면서 우물공 내부의 지하수의 온도는 0.023°C/m 상승하는 것으로 나타났다. 또한 지열 열펌프에서 열교환되어 순환수 온도가 높은 상태에서 지중 열교환기로 환수됨으로 열을 가하는 방식에 시험에서 a type의 지중 열교환기는 대향류의 흐름을 갖고, b type의 지중 열교환기는 평행류의 흐름을 보이기 때문에 a type의 지중 열교환기가 b type보다 지중 열전도가 높게 나타난 것으로 생각된다.

세 번째로는 우물공 내부에서의 유동속도를 들 수 있다. Fig. 1은 우물공 내부 단면도를 보여주고 있다. 우물공의 직경이 200 mm로 천공이 이루어진 상태에서 PVC 파이프가 a type의 경우 125 A가 삽입되었고 b type 50 A가 삽입되었다. 따라서 우물공 내부에서 지중 순환수의 평균 유속이 a type 지중 열교환기가 높기 때문에 우물공 내부에서 열교환기 잘 이루어진 것으로 생각된다.

3.3 c type SCW형 지중 열교환기

Fig. 8은 Fig. 1에서 c type의 SCW형 지중 열교환기의 시험데이터를 보여주고 있다. 시험에서 우물공에 투입된 평균열량은 약 62.3 kW(231 W/m)로 24시간동안 안정적으로 투입되었다. 시험용 우물공에 설치된 심정펌프의 지하수 평균유량은 약 220 lpm으로 측정되었다. c type의 SCW형 지중 열교환기의 경우 우물공 내부에 채움재를 채웠음에도 불구하고 유량감소가 거의 나타나지 않았다. 본 시험용 지중 열교환기의 지중초기온도는 16.71°C로 측정되었다.

Fig. 9는 로그시간에 대한 순환수 평균온도 그래프를 보여주고 있다. 순환수 평균온도 데이터를 이용하여 직선의 기울기를 구한 결과 1.58로 나타났다.

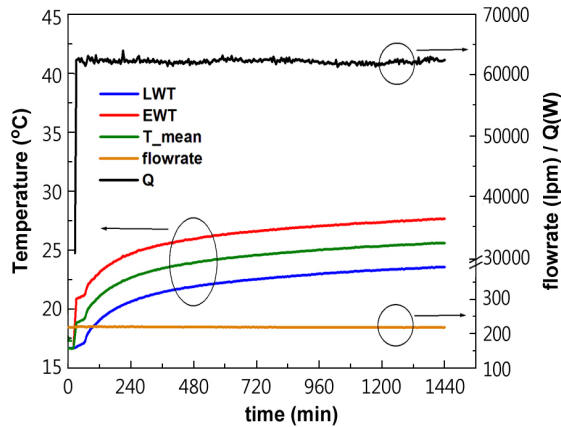


Fig. 8 Variation circulation water temp., flowrate, injection heat capacity at elapsed test time(c type).

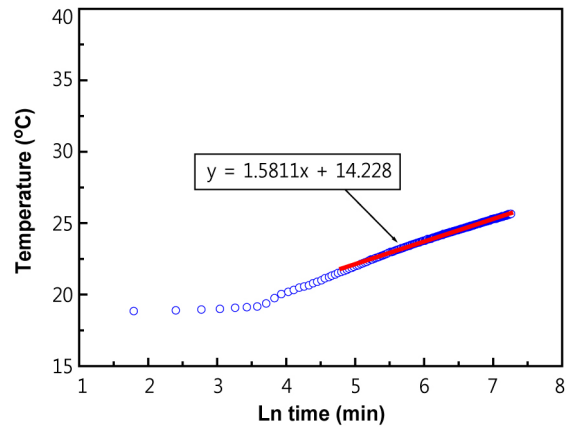


Fig. 9 T_{mean} vs. Ln time(c type).

앞서 구해진 값들을 식(2)에 적용하면 c type의 SCW형 지중 열교환기의 지중 열전도도를 계산한 결과 11.62 W/m · K로 측정되었다.

c type의 경우 지중 열전도도가 a type과 b type보다 월등히 높게 나타났으며, 이는 c type의 경우 우물공 내부에 채움재가 채워지면서 시험중에 대수층으로 지하수가 유/출입 된 것으로 판단되며, 크게 두 가지 현상으로 설명할 수 있다.

첫째는 지중초기온도를 들 수 있다. c type 지중 열교환기의 경우 b type 지중 열교환기의 시험이 종료된 이후에 우물공 내부에 채움재를 삽입하고 15일 후에 시험이 진행되었다. 따라서 c type의 지중 열교환기의 경우 지하수가 유입되지 않는 한 지중초기온도가 b type의 경우보다 높거나 같아야 하는데 본 시험에서는 지중초기온도가 b type의 경우 17.30℃, c type 16.71℃로 c type 지중 열교환기가 0.59℃ 낮게 나타났다. 이는 우물공 내부에 채움재가 채워지면서 순환수가 우물공 최하단으로 유입되어 심정펌프 방향으로 순환하는데 있어 채움재가 저항으로 작용하면서 심도가 깊은 쪽 대수층으로 순환수 일부가 유출되고 심도가 낮은 쪽에 발달한 대수층에서 지하수가 유입되었기 때문으로 생각

되어진다.

Fig. 7의 그래프에서 보면 심도가 낮을수록 지중온도는 낮게 나타나며, 심도가 낮은 쪽에서 발달한 대수층의 지하수가 많이 유입되면서 지중초기온도가 낮게 측정된 것으로 보인다.

두 번째는 우물공 내부의 지하수를 방류할 때 지하수 탁도를 들 수 있다. c type의 지중 열교환기에서 방류되는 지하수가 b type에서 방류되던 지하수보다 더 흙색을 띠었다.

Table 2는 시험용 우물공의 특성 및 시험결과를 보여주고 있다. 본 시험에서 지중 열전도도는 c type > a type > b type순으로 높게 나타났다.

4. 결 론

본 논문에서는 동일한 현장에 적용된 3가지 형상의 SCW형 지중 열교환기의 지중 열전도도 측정시험을 진행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) a type의 SCW형 지중 열교환기는 지중초기온도는 18.43℃, 지중 열전도도는 4.84 W/mK로 측정되었다.

Table 2 Geothermal well specification and test result

	Test Condition					Test Measurement				
	Borehole Depth	Geothermal Well Length	Filler	Injection Heat Capacity	Ground Initial Temp.	Circulation Water Temp.			Slope	Ground Thermal Conductivity
						2hr	12hr	24hr		
Unit	m	m	-	W/m	℃	℃	℃	℃	-	W/m · K
a type	423	402	X	220	18.4	25.3	32.2	34.3	3.62	4.84
b type	296	270	X	230	17.3	24.4	33.1	37.0	5.39	3.40
c type	296	270	O	231	16.7	21.7	24.7	25.7	1.58	11.62

※ Geothermal well length seek value by borehole photo shoot.

- (2) b type의 SCW형 지중 열교환기는 지중초기온도는 17.30℃, 지중 열전도도는 3.40 W/mK로 측정되었다. b type의 경우 지하수 유동방향과 지열 우물공 길이에 서 많은 손실이 존재하기 때문에 지중 열전도도가 a type에 비해 상대적으로 낮게 측정된 것으로 보인다.
- (3) c type의 SCW형 지중 열교환기는 지중초기온도 16.71℃, 지중 열전도도는 11.62 W/mK로 측정되었다. c type의 경우 지중 열전도도가 a, b type 지중 열교환기에 비해 월등히 높게 나타났으며, 이는 채움재가 우물공 내부에 채워지면서 순환수의 일부가 대수층으로 유출 및 유입되었기 때문으로 생각된다.
- (4) 본 시험 결과를 보면 c type의 경우 SCW형 지중 열교환기가 적용되어지는 현장에서 지하수 대수층이 복수로 발달된 지형의 경우에 매우 적합한 지중 열교환기로 사료되어진다.

후 기

본 연구는 에너지기술평가원에서 진행하는 2014년도 에너지기술개발사업(20143030110990)의 지원을 받아 수행한 연구과제로 이에 감사드립니다.

References

1. Kim, M. J. and Choi, C. H., 2013, A study on the KS (Korea Standard) of SCW type ground heat exchanger, *Journal of Geothermal Energy*, Vol. 9, No. 4, pp. 39-46.
2. Ministry of Knowledge Economy, 2012, Standards of support, installation, and management for new and renewable energy system, Ministry of Knowledge Economy Announcement 2012-3.
3. Choi, H. S., Choi, H. J., Lee, C. H., and Yun, M. S., 2013, A assessment ground thermal conductivity for SCW type ground heat exchanger design, *Journal of Geothermal Energy*, Vol. 9, No. 3, pp. 67-73.
4. Kim, M. J. and Chang, K. S., 2013, SCW type ground heat exchanger analysis using borehole photo shoot, *Journal of Geothermal Energy*, Vol. 9, No. 4, pp. 47-54.
5. Park, D. H., Kwak, D. Y., Kim, K. K., Park, S. S., and Na, S. M., 2010, Numerical simulation of standing column well, *Proceedings, World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia*.
6. Lee, S. H., Park, C. H., Yoon, T. I., An, K. M., and Choi, Y. S., 2010, An experimental study on the bleed effect of standing column well(SCW) type heat exchanger, *Proceedings of the SAREK 2010 Winter Annual Conference*, pp. 446-452.
7. Zheng Deng, 2004, Modeling of standing column wells in ground source heat pump systems, Ph.D thesis, Oklahoma State University, OK, U.S.A.