

공내 영상촬영에 의한 SCW형 지중 열교환기 분석

김민준

한국냉동공조인증센터 책임연구원

장근선

선문대학교 기계공학과 교수

SCW형 지중 열교환기는 지중에 우물공을 천공한 후 우물공 내부의 지하수를 직접 취수하여 열펌프의 열원으로 사용되어지며, 순환수의 일부를 지표에 퇴수하는 블리딩이 사용되기 때문에 지중 열교환기가 설치된 장소의 지중 상태(암반의 형상, 파쇄대, 대수층 발달정도 등)를 파악하는 것이 매우 중요하다.

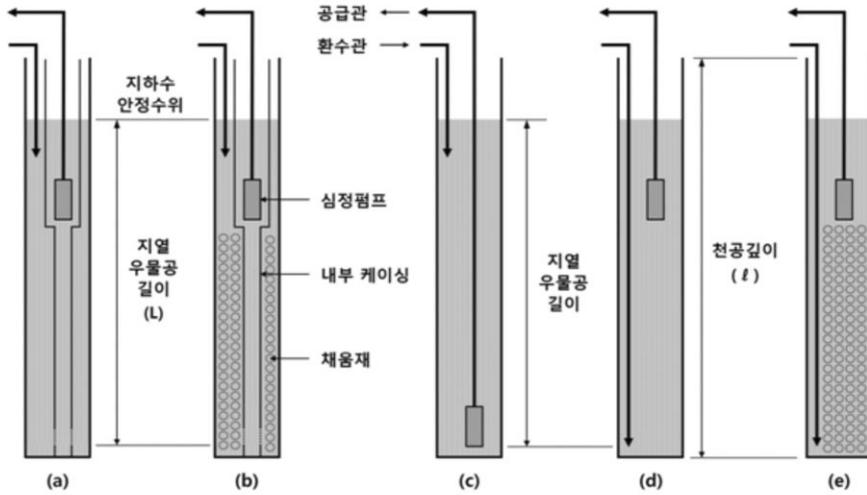
본 시험에서는 지중 열전도도 시험이 수행되기 전에 지열 우물공 내부를 영상촬영하였다. 지열 우물공 내부에는 32 m, 405 m에서 대수층이 발달하였으며, 지하수 안정수위는 12 m, 유공관 끝단 길이 414 m, 천공 깊이는 423 m로 확인되었으며, 지열 우물공 길이는 402 m로 측정되었다. 공내부 영상촬영 이후 지중 열전도도 시험을 수행한 결과 지중온도 18.43 °C, 지중 열전도도 4.84 W/mK로 측정되었다.

1. 서론

지열 열펌프 시스템은 2000년대 초반에 우리나라에 보급된 이후 그 수요가 급격하게 증가하고 있다. 국내 지열 열펌프 시스템에 적용되어지는 지중 열교환기로는 밀폐형과 개방형으로 분류할 수 있으며, 그중 밀폐형은 수직형, 수평형, 에

너지 파일형으로 세분화된다. 또한 개방형으로는 SCW형(Standing Column Well type) 지중 열교환기가 사용되고 있다. 현재 지열 열펌프 시스템에는 수직 밀폐형 지중 열교환기가 가장 많이 적용되어지고 있으나, 타 지중 열교환기 방식보다 단위 길이당 열 이용량이 높은 것으로 평가되어지는 SCW형 지중 열교환기의 보급 또한 증가하고 있는 추세이다.

SCW형 지중 열교환기는 지중에 우물공을 천공한 후 우물공 내부의 지하수를 직접 취수하여 열펌프의 열원으로 사용되어지며, 순환수의 일부를 지표에 퇴수하는 블리딩이 사용되기 때문에 지중 열교환기가 설치된 장소의 지중 상태(암반의 형상, 파쇄대, 대수층 발달정도 등)를 파악하는 것이 매우 중요하다. 또한 SCW형 지중 열교환기에서 암반과 열교환이 이루어지는 실제 열교환기 길이는 지하수 안정수위에서부터 유공관의 끝단까지 길이로 정의되어지나 지하수 안정수위는 지역적으로 많은 차이를 보이며, 지중 열교환기에 설치되어지는 유공관의 깊이도 설계에 따라 다르게 적용되고 있다. 천공깊이가 같더라도 설치되어지는 지역과 설계방법에 따라 SCW형 지중 열교환기의 실제 열교환기 길이(지열 우물공 길이)가 서로 다르게 형성된다. 또한 우물공 내부에 삽



[그림 1] SCW형 지중 열교환기의 종류

입되어지는 내부케이싱의 경우 삽입과정에서 케이싱 이탈현상이 종종 발생하고 있어 지중 열교환기 길이를 확보하지 못하는 경우가 발생하고 있다.

따라서 본 논문에서는 SCW형 지중 열교환기가 천공된 이후에 우물공 내부 지중 상태를 영상촬영기를 이용하여 파악하였으며, 또한 내부케이싱 내부를 영상촬영을 실시하여 보다 정확한 지열 우물공의 길이를 산출하고 이를 바탕으로 SCW형 지중 열교환기의 지중 열전도도를 산출하고자 한다.

2. 실험방법 및 결과

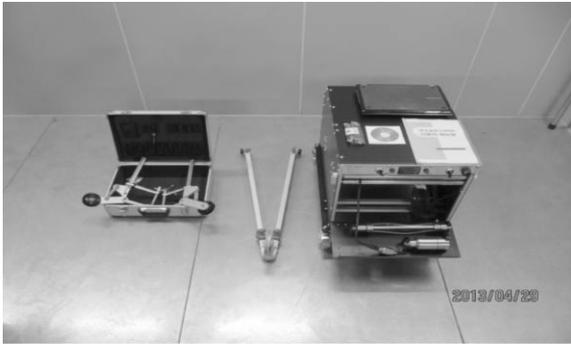
2.1 SCW형 지중 열교환기

그림 1은 현재 국내에서 적용되어지는 SCW형 지중 열교환기의 종류를 보여주고 있다. SCW형 지중 열교환기는 지중에 수직 우물공의 구조로 지하수를 취수하여 열원으로 사용하고 동일한 우물공으로 재주입하는 지중 열교환기로 정의된다. 그림 1에서 보여지듯이 SCW형 지중 열교환기의

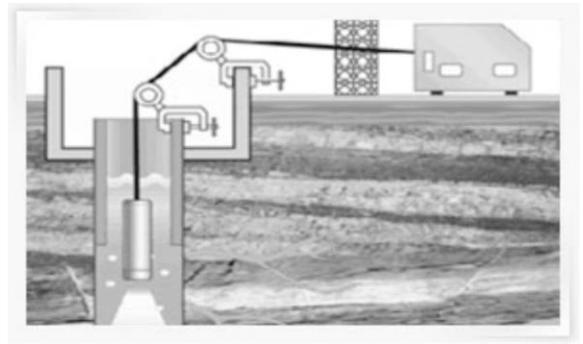
천공깊이는 지표부터 천공 최하단부까지의 거리를 말하며, 다양한 SCW형 지중 열교환기에서 천공깊이를 지중 열교환기의 열교환기 길이로 사용하는 것은 적절하지 못하다. 따라서 SCW형 지중 열교환기의 열교환 길이는 지하수 안정수위로부터 유공관 최하단까지의 거리로 정의되며, 이를 지열 우물공 길이로 정의하고 있다. 하지만 이러한 지열 우물공의 길이는 지하수의 안정수위와 유공관 최하단부를 직접 확인해야 함으로 수직 밀폐형에서 사용되는 심도측정기를 이용하여 측정할 수 있는 것이 아니다. 따라서 SCW형 지중 열교환기의 지중 상태와 지열 우물공의 길이를 산출하기 위한 방법으로 우물공 내부 영상촬영을 시행하였으며, 영상촬영에서 촬영된 깊이를 바탕으로 열교환기의 사양을 정의하였다.

2.2 지열 우물공 공내부 영상촬영기

그림 2(a)는 한국냉동공조인증센터에서 운영하고 있는 지열 우물공 공내부 영상촬영기를 보여주고 있다. 그림 2(b)는 지열 우물공 공내부를 영상촬영 하는 개략도를 보여주고 있다. 그림 2(c)는 특수 제작된 카메라 형상이며, 카메라의 직경



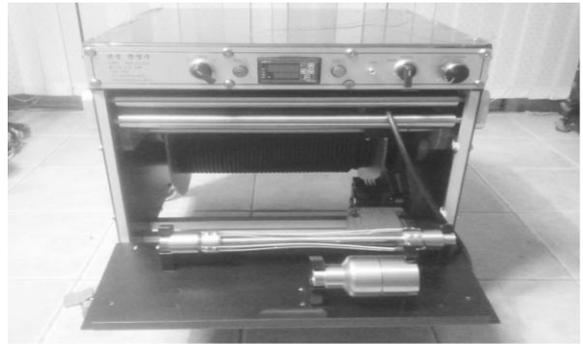
(a) 공내부 영상촬영기



(b) 공내부 영상촬영 개략도



(c) 영상 카메라



(d) 본체

[그림 2] SCW형 지중 열교환기 우물공 내부 영상촬영기

은 약 60 mm로 일반적으로 사용되는 내부케이싱(PVC관 100A)을 촬영하는데 무리가 없다. 그림 2(d)는 영상촬영기 본체로 카메라 통신케이블은 지하 최대 550 m까지 영상촬영이 가능하도록 설계 및 제작되었다. 또한 컴퓨터와 연계하여 촬영과 동시에 실시간으로 공내부 영상을 확인 및 녹화가 가능하며 속도조절기를 이용하여 카메라는 다양한 속도로 촬영이 가능하다.

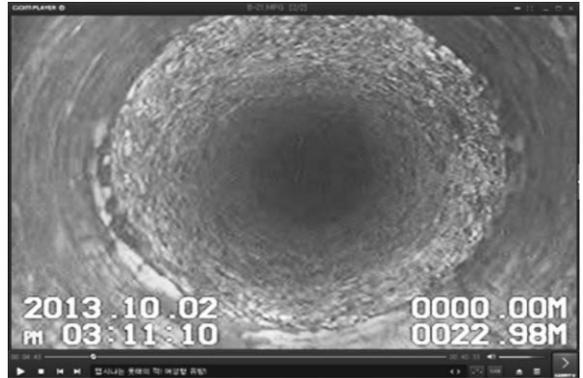
2.3 지열 우물공 공내부 영상촬영

본 시험공은 세종시 4 생활권 연구부지에 위치한 정부출연 연구기관 신축부지이며, SCW형 지

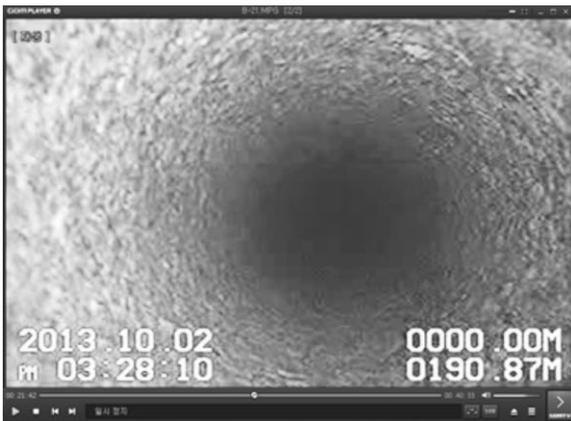
중 열교환기 사양으로는 천공깊이 420 m, 우물공의 직경 200 mm, 내부케이싱으로 수도용 경질 폴리염화비닐관(VP1) 125A가 사용되었다. SCW형 지중 열교환기의 형상 및 내부구조를 파악하기 위해 천공완료 후 지열 우물공 영상촬영기를 이용하여 우물공 내부를 촬영하였다. 그림 3은 천공 완료 후 영상촬영기를 이용하여 촬영한 우물공 내부 영상의 일부를 보여주고 있다. 그림 3 (a)는 우물공 공내부를 영상촬영하는 모습의 사진을 보여주고 있으며, 그림 3 (b)는 지열 우물공 내부에 삽입된 케이싱의 말단 영상을 보여주고 있다. 지열 우물공 내부에 케이싱은 약 23 m가 삽입된 것을 확인할 수 있으며, 암반과 잘 맞



(a) 공내부 영상촬영 사진



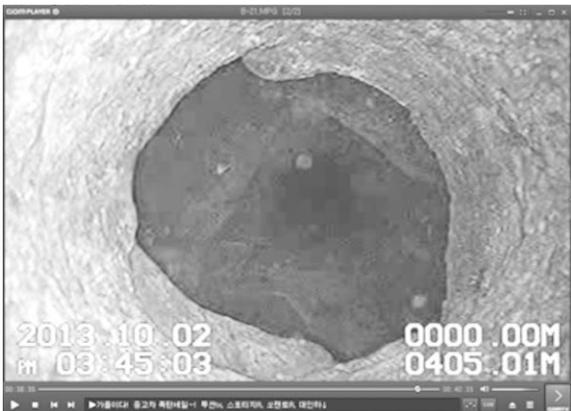
(b) 케이싱 삽입 말단



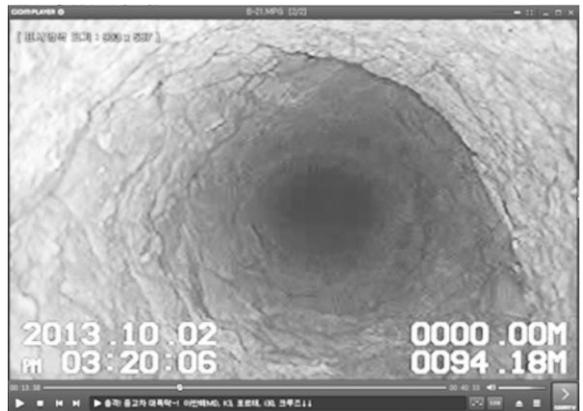
(c) 우물공 내부



(d) 대수층 1



(e) 대수층 2



(f) 파쇄대

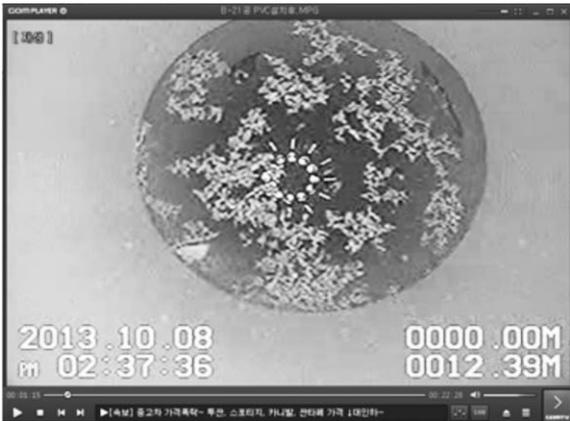
[그림 3] 지열 우물공 공내부 촬영 사진



(a) 유공관 내부 이물질 제거



(b) 내부케이싱 삽입



(c) 지하수 안정수위



(d) 유공관 시작 깊이



(e) 유공관 끝단 깊이



(f) 우물공 끝단 깊이

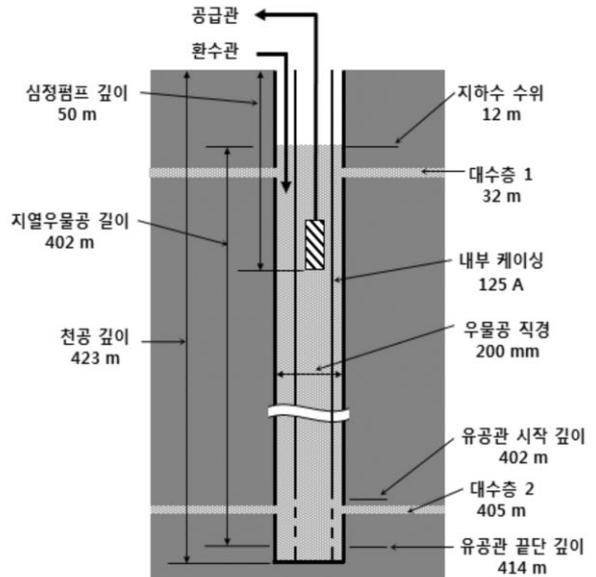
[그림 4] 내부케이싱 공내부 영상촬영 사진

닿고 있는 것을 알 수 있다. 그림 3 (c)는 천공된 지열 우물공 내부의 압반형상을 보여주고 있으며, 우물공은 원형의 형상으로 천공이 잘 이루어진 것을 알 수 있다. 그림 3 (d), (e)는 우물공 안에 존재하는 지하수 대수층의 사진으로 대수층의 깊이는 각각 약 32 m, 405 m에서 2군대가 존재하는 것을 확인하였다. 그중에서도 405 m에 위치한 대수층의 경우 지하수의 양은 1500 ton/day가 넘는다. 그림 (f)는 지열 우물공 내부에 존재하는 파쇄대 층으로 위 사진 이외에도 우물공 내부에 파쇄대 층은 약 25 m, 94 m, 210m, 350 m, 399 m로 지열 우물공 전체 천공깊이에 다섯 곳이 존재하는 것을 확인하였다.

2.4 내부케이싱 공내부 영상촬영

또한 지중 열전도도 시험에 앞서 정확한 지중 열교환기의 길이를 산출하기 위해 우물공 안에 내부케이싱이 삽입된 이후 내부케이싱 공내 영상촬영을 시행하였다. 그림 4는 내부케이싱 공내 영상촬영에서 나타난 영상의 일부를 보여주고 있다. 그림 4 (a)는 내부케이싱 삽입전 유공관 가공면에 부착된 이물질을 제거하는 모습으로 우물공 내부로 유입되는 PVC 잔해의 양을 최소화하였으며, 그림 4 (b)는 지열 우물공 내부로 PVC파이프를 조립하면서 내부케이싱을 삽입하는 모습을 보여주고 있다. 그림 4 (c)는 본 시험공의 지하수 안정수위로 지하수 수위는 약 12 m로 확인되었다. 그림 4 (d), (e)는 내부케이싱에 삽입된 유공관으로 유공관의 깊이로 영상확인 결과 약 402 m~414 m로 확인되었다. 그림 4 (f)는 실제 SCW형 지중 열교환기의 끝단으로 우물공 깊이는 약 423 m로 확인되었다. 또한 본 시험공의 공내 영상촬영 결과 내부케이싱의 이탈은 존재하지 않는 것으로 확인되었다.

그림 5는 본 시험현장에서 촬영된 영상을 바탕으로 SCW형 지중 열교환기의 형상을 도식화하였다.



[그림 5] SCW형 지중 열교환기 형상

2.5 SCW형 지중 열교환기 지중 열전도도 계산

앞에서 지열 우물공 내부 영상촬영기를 이용하여 SCW형 지중 열교환기의 지열 우물공 길이가 산출되면 지중 열전도도 시험을 수행하였다. SCW형 지중 열교환기의 지중 열전도도 시험방법 및 절차는 “신재생에너지센터 공고 2013-17호”에 잘 정리되어 있으며, 표 1은 SCW형 지중 열교환기 지중 열전도도 시험조건을 보여주고 있다.

현재 SCW형 지중 열교환기의 지중 열전도도는 수직 밀폐형과 같은 선형열원방법(Line source method)이 이용되고 있다. 식 (1)은 수직 밀폐형 지중 열교환기의 지중 열전도도 계산식을 보여주고 있다.

$$k = \frac{Q}{4\pi \cdot L \cdot a} [W/mK] \quad (1)$$

위 식에서 k 는 수직 밀폐형 지중 열교환기의 지중 열전도도를 나타내며, Q 는 지중 열교환기에 투입된 평균 열량, a 는 로그시간에 대한 순환수

<표 1> SCW형 지중 열교환기 시험조건

순서	항목	기준	
측정 시간	1	열전도도 측정 개시	천공 완료 후 72시간 이후
	2	제외 시간	시험 시작 후 2시간 데이터 제외
	3	유효데이터의 연속 취득시간	24시간 이상 연속 취득
	4	데이터 취득시간	10분 이하
측정 조건	5	측정공 투입 열량	200 ~ 500 W/m
	6	Loop 입출구 온도차 (이온도 범위에서 유량조절)	3.5 ~ 7.0℃
측정 오차	7	측정온도의 오차	±0.3℃ 이하 (평균온도에 대한 표준편차)
	8	보일러 공급 열량의 오차	±3.0 %이하 (평균전력에 대한 표준편차)
재 측정	9	재측정 개시	지중초기 온도의 0.3℃ 이내 까지 회복 후 재측정

평균온도 변화에 대한 직선의 기울기, L 은 천공 깊이를 말한다.

그러나 SCW형 지중 열교환기는 수직 밀폐형 지중 열교환기와는 지중 열교환기의 길이를 산출하는 방법에 있어 다소 차이를 보인다. 수직 밀폐형의 경우 천공 깊이를 지중 열교환기 길이로 사용되고 있으나 SCW형 지중 열교환기의 경우 지하수 수위 형성이 지역적으로 차이를 보일뿐만 아니라 유공관 설치길어도 서로 상이하기 때문에 지열 우물공의 천공 깊이를 열교환기 길이로 사용하는 것은 적절하지 않다. 따라서 본 연구에서는 SCW형 지중 열교환기에서 실제 지하수가 이동하는 거리 즉, 지하수 안정수위에서부터 유공관 끝단까지의 거리를 지중 열교환기의 길이를 측정하여 식 (2)를 이용하여 SCW형 지중 열교환기의 지중 열전도도 계산하였다.

$$k'' = \frac{Q}{4\pi \cdot L'' \cdot a} [W/mK] \quad (2)$$

위 식에서 는 SCW형 지중 열교환기의 지중 열

전도도를 나타내며, 은 지열 우물공의 길이로 지하수 안정수위에서부터 유공관 끝단까지의 길이를 말한다.

그림 6은 본 시험공의 지중 열전도도 측정시험에서 획득한 시험데이터 그래프를 보여주고 있다. 지열 우물공에 열량을 투입하기 전에 지중 순환수를 순환시켜 지중온도를 측정하였으며 본 시험현장은 지중온도가 18.43 ℃로 측정되었다. 지중온도 측정 후 지중 열교환기에 열량을 투입하여 지중 순환수 온도변화를 관찰하였으며, 본 시험에서 지열 우물공에 투입된 열량은 약 88.9 kW (약 220 W/m)이다. 지중 열교환기에 열량이 투입된 초기에 순환수 온도변화가 나타나지 않는 구간이 보이는데 이는 순환수가 지중 열교환기를 한 바퀴 순환하는데 걸린 시간으로 본 시험공의 경우 유량 약 270 lpm에서 약 40분의 시간이 소요되었다. 또한 지열 우물공으로 투입된 열량은 시험이 진행되는 동안 평균 투입열량에 ±1.5% 이내에서 일정하게 투입되었다.

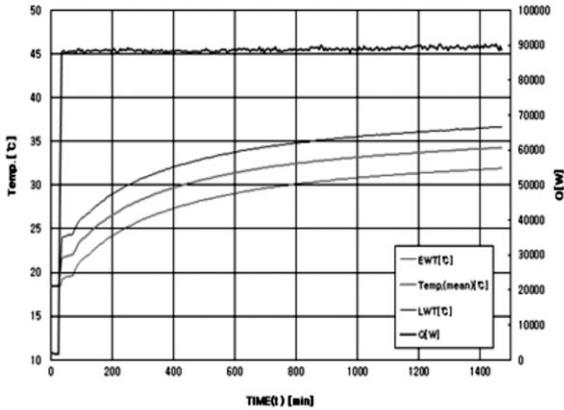
그림 7은 로그시간에 대한 순환수 평균온도 그래프를 보여주고 있다. 그래프에서 볼 수 있듯이 지열 우물공에 열량 투입 후 초기 2시간에 대한 데이터는 제외하고, 순환수 평균온도 데이터를 이용하여 직선의 기울기를 계산하였으며, 본 시험에서는 기울기가 3.6182로 나타났다.

앞서 구해진 값들을 식 (2) 적용하면 본 시험에 사용된 SCW형 지중 열교환기의 지중 열전도도를 구할 수 있으며, 지중 열전도도는 4.84 W/mK로 측정되었다.

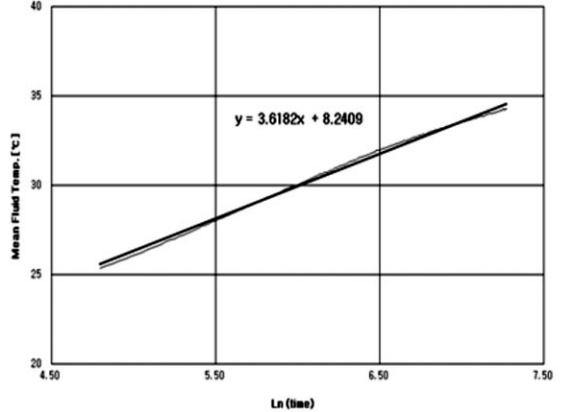
3. 결론

본고에서는 현장에 적용된 SCW형 지중 열교환기의 보다 정확한 해석을 위해 우물공 내부의 지중상태를 파악하고 이를 바탕으로 지중 열전도도를 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 시험공의 지중상태를 파악하기 위해서 천공완료 후 공내부 영상촬영기를 이용하여 우



[그림 6] 시간 경과에 따른 투입열량과 지중 순환수 온도변화 그래프



[그림 7] 로그시간에 따른 지중 순환수 평균온도 변화 그래프

물공 내부를 촬영한 결과 우물공 내부에는 약 32 m, 405 m에서 지하수 대수층이 관찰되었으며, 또한 파쇄대 층이 우물공 전체에 다섯 곳이 존재하는 것을 확인하였다.

- 2) 본 시험에서는 SCW형 지중 열교환기의 정확한 열교환기 길이를 산출하기 위해서 내부 케이싱 내부 공내 촬영을 실시하였으며, 지중 열교환기의 지하수 수위는 12 m, 유공관 끝단 깊이 414 m로 지열 우물공 길이는 402 m로 확인하였다.
- 3) 본 시험현장에 구축된 SCW형 지중 열교환기의 지중온도는 18.43℃, 지중 열전도도는 4.84 W/mK로 측정되었다.
- 4) SCW형 지중 열교환기의 경우 실제 열교환이 이루어지는 길이가 지하수 안정수위부터 유공관 끝단까지임으로 SCW형 지중 열교환기의 정확한 지열 우물공 길이를 산출하여 지중 열전도도를 산출하는 것이 필요하다.

참고문헌

1. 김태원, 2006, 개방형 지열히트펌프 시스템

의 성능평가, 한국신재생에너지학회 2006년도 추계학술대회논문집, pp. 9-14.

2. 임효재, 권정태, 김창업, 공형진, 박성구., 2009, 지하수 열원 복수정 지열 열펌프 시스템의 성능에 관한 실험적 연구, 설비공학논문집 Vol. 21, No. 8, pp 468-474.
3. 이상훈, 박찬호, 윤태일, 안근목, 최용석, 2010, 개방형 지중열교환기의 블리딩 효과에 대한 실험적 고찰, 대한설비공학회 2010 동계 학술발표대회논문집, pp. 446-452.
4. DuHee Park., DongYeop Kwak., Kwang Kyun Kim., SiSam Park., SangMin Na., 2010, Numerical simulation of standing column well, Proceedings of the World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, pp.
5. 최항석, 최현준, 이철호, 윤명섭, 2013, 개방형 지중열교환기 설계를 위한 지중 열전도도 평가, 지열에너지저널 Vol. 9, No. 3, pp67-73.
6. 신재생에너지센터, 2013, 신재생에너지 설비의 지원 등에 관한 규정 및 지침, 에너지관리공단 신재생에너지센터 2013-17호.