

수직밀폐형 지중 열교환기 형태에 따른 열효율 평가

윤 석* · 고규현** · 이승래*** · 조남현****

Yoon, Seok*, Go, Gyu-Hyun**, Lee, Seung-Rae***, Cho, Nam-Hyun****

Evaluation of Heat Exchange Rate of Different Types of Ground Heat Exchangers

ABSTRACT

This research presents an experimental study of heat exchange rate of U, W, 2U and coil type ground heat exchangers (GHEs) measured by thermal performance tests (TPTs). The four types of GHEs were installed in a partially saturated dredged soil deposit of Incheon International Airport area. Thermal response tests (TRTs) were conducted for U, W and 2U type GHEs to deduce the ground thermal conductivity. Besides, TPTs were also conducted for U, W, 2U and coil type GHEs to evaluate heat exchanger rates under 100-hr continuous and 8-hr intermittent operation conditions for five days. Coil shaped GHE showed about twice higher thermal performance than the others GHEs. Furthermore, intermittent operation condition showed 30~40% higher heat exchange rates than continuous operation condition.

Key words : Ground heat exchanger, Thermal performance test, Thermal response test, Heat exchange rate

초록

본 논문에서는 일반 수직밀폐형에서의 U, W, 2U 그리고 코일 타입의 지중 열교환기 형태별 열효율을 평가하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 매립지 기반으로 이루어진 인천국제공항 제2여객 터미널이 건설될 부지에 수직밀폐형 지중 열교환기가 설치되었다. 우선 U, W 그리고 2U 형태의 지중 열교환기를 이용한 현장 열응답 실험을 수행하여 지반의 열전도도를 도출한 후 U, W, 2U 그리고 코일형 지중 열교환기를 이용하여 100시간 연속 운전과 5일 동안의 부분 운용 모드로 현장 열성능 실험을 수행하였다. 냉방 가동 조건 하에서 코일형 지중 열교환기 이용시 나머지 타입의 열교환기들보다 약 2배 정도 열교환율이 상승되는 것을 알 수 있었다. 또한 부분 운전 모드시 연속 운전 모드보다 30~40% 열교환율이 상승되는 것으로 나타났다.

검색어 : 지중 열교환기, 열성능 실험, 열응답 실험, 열교환율

1. 서론

최근 들어 지구 온난화, 화석 에너지 고갈로 인하여 신재생에너지 이용에 대한 관심과 수요가 늘어나면서 지열원 열펌프 시스템(ground source heat pump systems)의 필요성이 날이 증대되고 있다. 지열원 열펌프 시스템은 연중 일정한 지중열을 열펌프의 열원(heat source)과 히트 싱크(heat sink)로 활용하여 건물의 냉난방과 급탕을 동시에 구현하기 때문에 안전하고 효율적인 청정 신재생에너지이다.

* 정회원 · KAIST 건설및환경공학과 박사과정, 공학석사 (busybeeyoon@kaist.ac.kr)

** KAIST 건설및환경공학과 석박사통합과정 (gogyu@kaist.ac.kr)

*** 정회원 · 교신저자 · KAIST 건설및환경공학과 교수, 공학박사 (Corresponding Author · srlee@kaist.ac.kr)

**** 인천국제공항공사 연구개발단 전문연구원, 공학박사 (jnh0815@hotmail.com)

Received March 26, 2013/ revised June 29, 2013/ accepted September 4, 2013

또한 지열원 열펌프 시스템은 에너지 절약형 기술로써 국내 어디서나 이용할 수 있는 유비쿼터스 에너지로 여겨진다(Geothermal Energy Education Center, 2011). 이 시스템의 구성 요소 중 지중 열교환기(ground heat exchanger)는 전체 시스템의 성능과 초기 설치비를 결정하는 중요한 요소이며 일반적으로 깊이 150~200m의 수직밀폐형 타입이 가장 많이 사용되고 있다. 수직밀폐형 열교환기는 수직으로 천공된 보어홀과 지중과의 열교환 파이프, 그리고 보어홀과 파이프 사이의 빈 공간을 채우는 그라우트로 구성된다.

수직밀폐형 지중 열교환기는 초기 높은 시공비로 인하여 보다 높은 열효율을 얻기 위한 연구들이 많이 진행되고 있다. 열교환기를 통해서 주변 지반과 열을 교환하는 열전달은 보어홀 내의 그라우트의 열물성, 열교환기 타입 및 간격 그리고 열교환기 배열 및 순환수 특성 등 다양한 인자에 의해 영향을 받으며 이에 대한 많은 연구가 수행되고 있다(Park et al., 2013; Park et al., 2012; Lim et al., 2011; Min and Choi, 2011; Lee et al., 2010; Sohn et al., 2005). 일반적으로 수직밀폐형에서 지중 열교환기 타입은 시공의 편리성 등으로 인해 U자형이 가장 많이 적용되고 있으나 U자형 외의 다양한 열교환기 타입에 따른 열전달 거동에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 U자형보다 넓은 열교환 접촉면적을 가지는 W자형과 2U자형 그리고 에너지 파일에 널리 적용되고 있는 코일형 지중 열교환기에 대한 열효율을 비교하고자 하였으며 이를 위해 인천국제공항 제 2여객터미널이 건설될 부지에 수직 밀폐형 타입의 U자형, W자형, 2U자형 그리고 코일형 지중 열교환기를 설치하였다. 우선 현장 지반의 열전도도를 도출하기 위하여 U자형, W자형 그리고 2U자형 열교환기를 이용하여 현장 열응답 시험을 실시하였다. 그 후 열교환기 형태별 열교환율을 측정하기 위하여 현장 열성능 실험을 수행하였다. 현장 열성능 실험은 운전 조건별 열교환율의 차이를 분석하고자 100시간 연속 운영 조건과 부분운영 조건(8시간 운용, 16시간 대기)으로 5일간 진행하였다. 또한 예측된 값을 근거로 추세선 분석(regression analysis)을 통하여 6개월 동안의 열성능 값을 예측하였다. 현장 열성능 실험을 통해 지중 열교환기 형태별 열효율을 분석하여 이의 적용성에 대해 논의해 보았다.

2. 현장 열성능 실험

2.1 지중 열교환기 설치 조건

본 연구에서는 인천국제공항 제 2여객터미널 건설 부지에 U자형과 W자형 및 2U자형 지중 열교환기를 15cm 보어홀 직경 내에 수직 깊이 50m 로 설치하였다. 일반적으로 U자형 및 W자형과

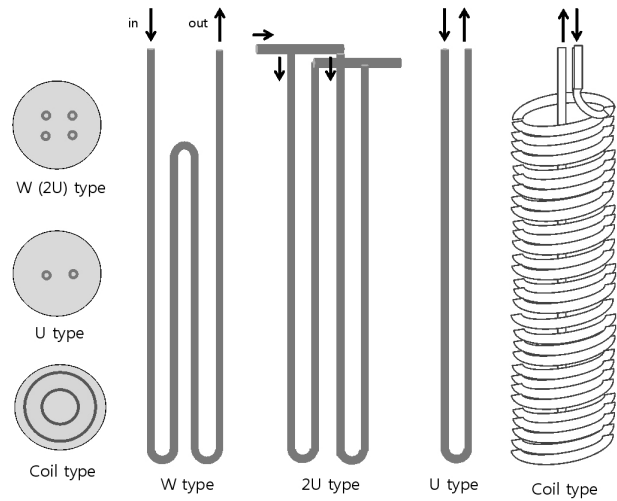


Fig. 1. Diagram of GHE

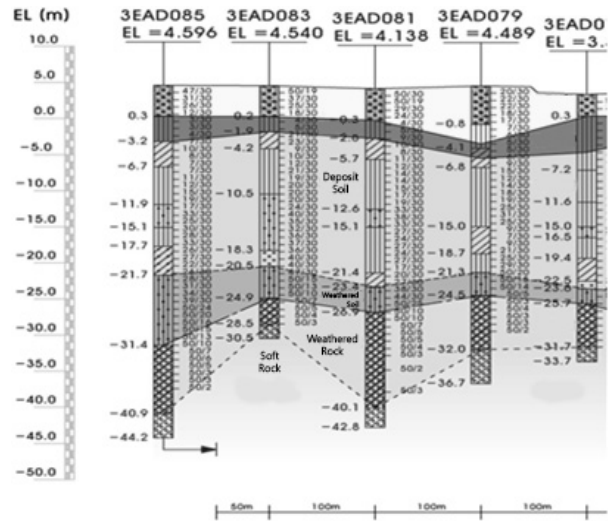


Fig. 2. Drill Log of the Test Site

같은 라인형 열교환기의 직경은 20~40mm 정도로 15cm의 보어홀 직경에 설치되기에 본 연구에서도 15cm의 보어홀을 천공하였다. 하지만 코일형 지중 열교환기의 경우 코일의 외경이 28cm 이기에 보어홀 직경은 30cm 였으며 코일 피치 간격 5cm에 수직 깊이 30m로 설치되었다. 지중 열교환기는 PB(polybutylene) 소재의 파이프(외경/내경: 20mm/16mm)가 사용되었고 보어홀 내부는 벤토나이트 그라우트를 채운 형태로 구성되어 있으며 열교환기 배치 상태는 Fig. 1과 같다. 보어홀 간 간격은 6m 이며 실험지역에 대해 지반조사를 수행한 결과 실트 및 모래질 퇴적층과 풍화암, 연암 등으로 구성되어 있다(Fig. 2). 매립층의 N치는 2/30~38/30 정도로 매우 느슨(very loose) 내지 조밀(dense)한 상태를 나타내고 있다. 또한 퇴적층은 굳은점토, 실트 및 모래섞인 실트층으로 구성되

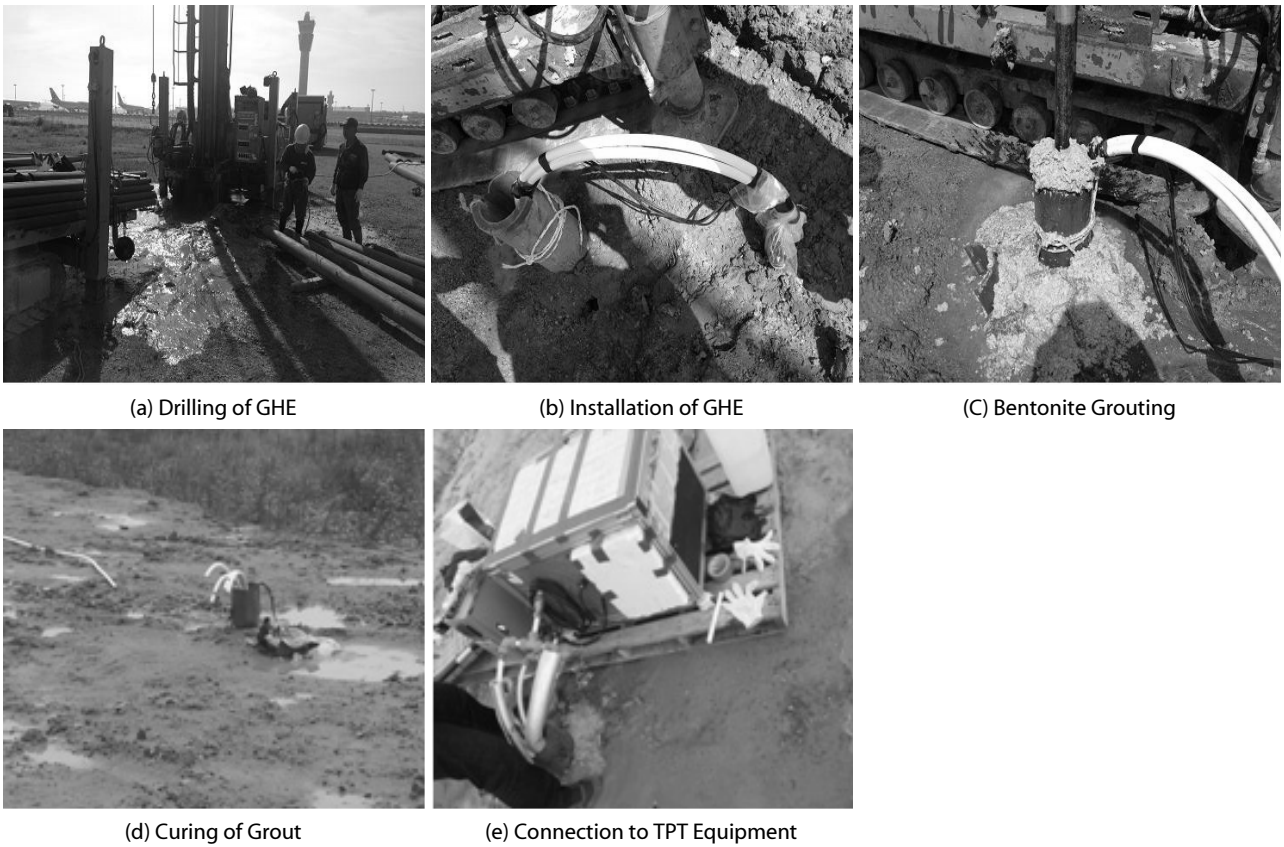


Fig. 3. Construction Process of GHE

어 있으며 9/30~33/30의 N 값을 나타냈다. 지하수위는 지표면에서 GL(-)3.5m 심도에 위치해 있었으며 GL(-)30m 지점부터 풍화암 및 연암이 출현하는 것으로 나타났다. 풍화암은 모암인 화강암이 매우 심하게 풍화된 상태로 모암의 조각과 형태는 그대로 잔존하고 있었으며 황갈색 내지 담갈색을 나타냈으며 50/13~50/2 정도의 N 값을 보였다. Fig. 3의 (a)~(e)는 실험 전 주요 시공과정을 보여주고 있다.

2.2 열성능 실험 원리

지중 열교환기의 열전달 메커니즘은 열전달 유체가 보어홀 내의 파이프 내를 이동하면서 그라우트 재료와 주변의 지반으로 열을 흡수 또는 방출하는 과정이다. 지중 열교환기와 주변 지반으로의 열전달 거동은 복잡하고 복합적인 메커니즘이 필요하지만 일반적으로 지반으로의 열전달은 전도에 의해 이루어진다(Brandl, 2006). 열전달 방정식의 해를 구하는 방법은 선형 열원모델(line source model), 원통형 열원모델(cylindrical source model) 그리고 수치 해석 모델 등이 있으며 이 중 무한 선형 열원 모델(infinite line source model)은 해석의 간편성과 편리성으로 인해 가장 많이

사용되고 있다. 무한 선형 열원 모델을 이용한 유효 열전도도 도출 과정은 여러 문헌에서 제시되고 있다(Pahud and Matthey, 2001; Lee et al., 2010). 무한 선형 모델을 통한 지중 열전도도(λ)는 Eq. (1)과 같은 간편식을 사용하여 열응답 시험을 통해 시간에 따른 유체온도를 측정하고 그 결과를 $T_f - \ln t$ 의 반대수 관계로 도시한 그래프의 기울기(A)를 통해 산출할 수 있다.

$$\lambda = \frac{Q/L}{4\pi A} \quad (1)$$

Table 1. TPT (Thermal Performance Test) Equipment

Item	Specification	
Heater	Capacity 5kW	
Water Tank	20L (SUS 304)	
Flow meter	2~20 lpm	
Pump	40m head, 100 lpm	
Sensor	RTD	

여기서 Q 는 단위 시간당 주입된 열량, L 은 보어홀의 길이, T_f 는 유체의 평균 온도, t 는 시간을 뜻한다.

또한 지중 열교환기의 열교환율을 산정하기 위해서는 열전달 매개체의 열 저항을 산출하여 열교환율을 산정하여야 한다. 본 연구에서는 실험을 통하여 열교환기로 유입되는 온도를 일정하게 제어하면서 유출수 온도를 측정후 Eq. (2)를 이용하여 열 교환율을 산정하였다.

$$Q/L = \dot{m}c(T_{f,inlet} - T_{f,outlet})/L \quad (2)$$

여기서, \dot{m} 은 순환수의 질량 흐름 속도(mass flow rate, $kg\ s^{-1}$) 이고 c 는 순환수의 비열 그리고 L 은 보어홀의 깊이이다. 본 연구에서 제작된 열성능 실험기는 지중의 보어홀에 매설된 지중 열교환기 내부를 순환수로 공급하고 유체의 온도변화를 감지하는 시스템으로 구성되어 있다. 지반의 유효 열전도도를 측정할 수 있는 열응답 실험 장치와 같이 순환수를 공급하는 수조 내에 히터를 통하여 일정한 전력을 공급할 수 있다. 또한 히터내의 온도를 일정하게 제어할 수 있는 온도 제어가 설치되어 있기에 지중 열교환기로 흘러가는 유입수 온도를 일정하게 유지하고 유출수 온도를 측정하면 지반과의 열교환율을 측정할 수 있는 기능도 탑재되어 있다. 즉 본 장비를 이용하면 지반의 열전도도를 측정할

수 있는 열응답 실험뿐만 아니라 열교환율을 측정할 수 있는 열성능 실험도 가능하다고 할 수 있다. Table 1은 열성능 실험기의 제원을 나타낸다.

3. 현장 열응답 실험 결과

Fig. 3과 같이 지중 열교환기 설치 후 지반의 열전도도를 산정하기 위하여 U, W 그리고 2U자형 지중 열교환기에 대해 현장 열응답 실험을 실시하였다. 코일형 교환기의 경우 라인 형태가 아니기에 Eq. (1)의 무한 선형 열원 모델을 적용하기는 어려운 것으로 알려져 있다(Yoon et al., 2012). 지중 열교환기가 설치된 보어홀에 장비를 연결하여 48시간 동안 현장 열응답 시험을 수행하였다. 히터 투입 전 30분간 무부하 운전을 통해 도출된 지반의 초기 온도는 15.8~16.5°C 였으며 실험시 유량은 난류 조건 형성을 위하여 6~8 lpm 값으로 제어하였고 순환수 온도뿐만 아니라 유량값도 10분 간격으로 실시간으로 계측 저장하였다. U자형 열교환기에 투입되는 열량은 2000W 였으며 W자형과 2U자형 열교환기에는 3000W의 전력을 투입하였다. 48시간 동안의 열응답 시험 후 초기 열용량이 일정하지 않은 것을 고려하여 초기 12시간 온도 데이터를 제외하고 Eq. (1)을 이용하여 지반의 열전도도를 산정하였다. Fig. 4는 U, W 그리고 2U자형 지중 열교환기 이용시 열응답 실험 시간에

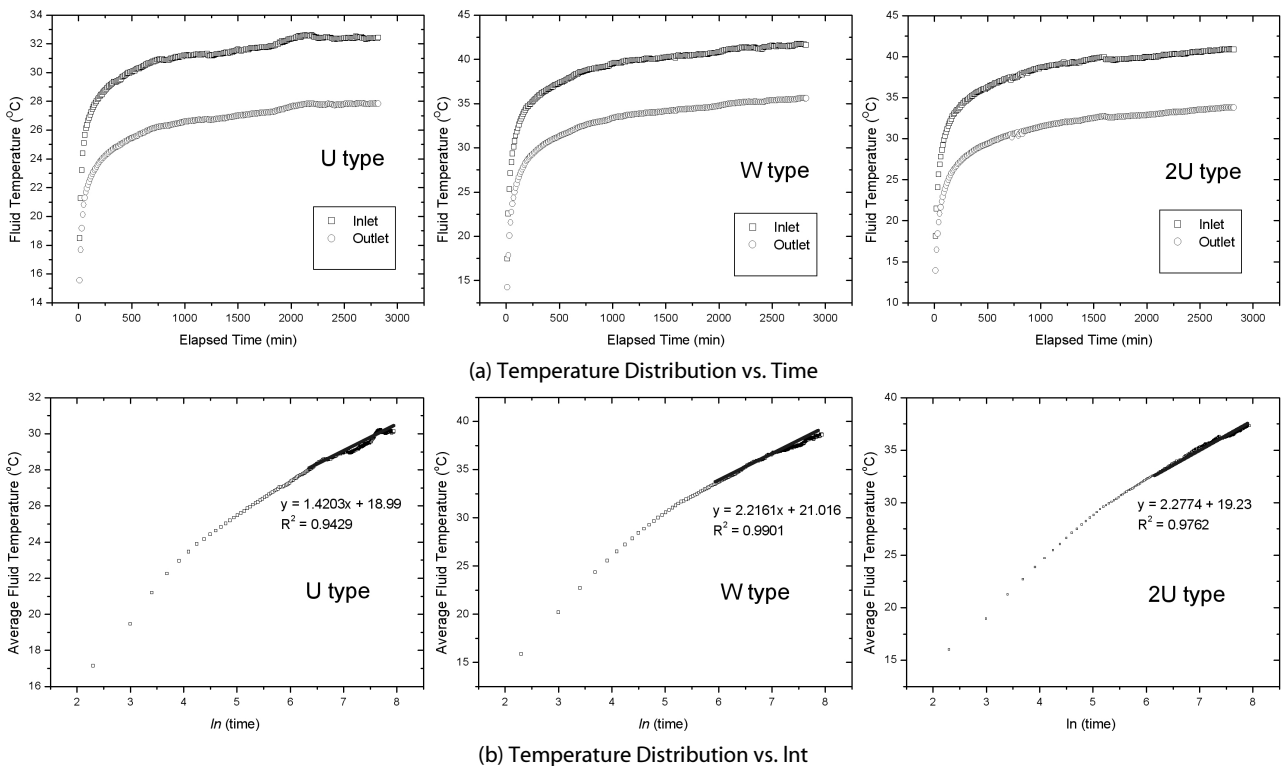


Fig. 4. Fluid Average Temperature Distribution During the TRT (Thermal Response Test)

따른 순환수의 평균 온도 변화를 나타낸다. U, W 그리고 2U자형 지중 열교환기 이용에 따른 지반의 열전도도는 각각 2.13, 2.15, 2.17W/m·K 값을 보였다. 열교환기 형태별 지반의 열전도도가 1~2% 범위 내에서 차이를 보였으나 이는 지반의 초기온도가 완전히 일치하지 않았으며 열교환기 형태 차이에 기인한 것으로 판단된다.

4. 현장 열성능 실험 결과

열응답 실험 후 동일한 지반 조건하에서 U, W, 2U 그리고 코일형 지중 열교환기가 설치된 보어홀에서 현장 열성능 실험을 실시하였다. 냉방 가동시를 모사하기 위해 지반으로 투입되는 온도는 31°C로 일정하게 제어하였으며 100시간 연속 운영 조건과 부분운영조건(8시간 운용, 16시간 대기)으로 5일간 진행하여 지중 열교환기 형태에 따른 열교환율을 산정하였다. 열응답 실험과 마찬가지로 난류 조건을 형성하기 위하여 유량은 6~8lpm 값으로 제어하였으며 입출구 온도와 유량은 10분 간격으로 실시간으로 계속 저장하였다.

4.1 100시간 냉방 가동 연속 운전 실험 결과

U, W, 2U 그리고 코일형 지중 열교환기 설치된 보어홀에 100시간 동안 연속으로 열성능 실험을 수행한 후 Eq. (2)를 이용하여 100시간 평균 열교환율을 값을 산정하였다. 비록 코일형의 경우 깊이와 보어홀 단면적의 넓이가 나머지 열교환기와 다르다 하더라도 열성능 실험에 의해 얻어지는 열교환율을 보어홀의 길이로 나눈 단위 길이당 열교환율로 비교하였다. 보어홀 내의 다른 형태의 열교환기 및 보어홀 면적 등은 보어홀의 열저항에 영향을 주어 입출구의 온도차 결과에 영향을 주므로 Eq. (2)로부터 산정된 총

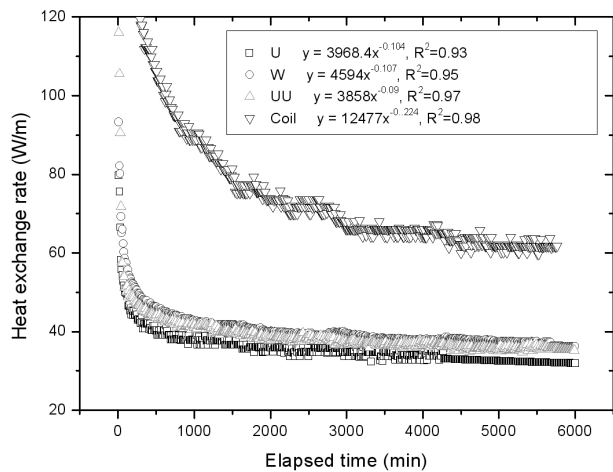


Fig. 5. Heat Exchange Rate for 100 Hours Under the Continuous Operation

열교환율 값에 이미 반영되었다고 할 수 있다. U자형 열교환기 이용시 35.71W/m, W자형 열교환기 이용시 40.76W/m, 2U자형 이용시는 39.03W/m 그리고 코일형 열교환기 이용시 76.8W/m의 열교환율을 보였다. W자형과 2U자형 지중 열교환기 이용시 U자형에 비해 10~15% 정도 열교환율이 상승되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 W자형과 2U자형 지중 열교환기는 U자형에 비해 더 넓은 열교환 접촉면적을 가지기 때문인 것으로 판단되며 W자형이 2U자형보다 4~5% 높은 열교환율 값을 보였으나 서로 간에 상대적인 우월성을 가지지는 않는 것으로 판단된다. 코일형 지중 열교환기 이용시 나머지 타입들보다 보어홀 단위 길이당 열교환율은 대략 2배 정도 높은 열교환율을 나타내었는데 코일형 열교환기의 총 길이가 대략 350m인 것을 감안하면 그만큼 그라우트와의 열접촉 면적이 넓기에 높은 열교환율 값을 가지는 것으로 판단된다. 기존의 연구 결과에서도 코일형 지중 열교환기는 일반 라인형에 비해 열교환 능력이 우수한 것으로 알려져 있다(Cui et al., 2011; Man et al., 2010). 하지만 코일형 지중 열교환기는 일반 라인형에 비해 보어홀 면적이 크게 소요되기에 에너지 파일과 같이 보어홀 깊이와 직경이 일정하게 고정된 조건에서 적용할 경우 보다 우수한 성능을 나타낼 것으로 판단된다. Fig. 5는 100시간 열성능 실험에 따른 열교환율을 보여주고 있다. 열교환율 값을 상대적으로 작은 U, W 그리고 2U자와 같은 라인형 지중 열교환기는 실험 시작 후 대략 1000분이 지난 후에 열교환율 값이 거의 일정해지는 정상상태에 도달했음을 알 수 있었다. 하지만 코일형 지중 열교환기의 경우 실험 후 대략 3000분 정도 지난 후 정상상태에 도달함을 보였는데 이는 코일형의 경우 보어홀의 직경이 커 보어홀 자체가 보유한 열용량이 크기에 그만큼 라인형 열교환기보다 정상상태에 도달하는 시간이 오래 걸린다는 것을 알 수 있다.

4.2 냉방 가동 부분 운전 실험 결과

실제 지열시스템 가동시 현실적으로 연속 운전 조건보다는 법정 근로시간인 8시간 운전 16시간 휴지를 가정한 부분 운전 조건으로 5일간 열성능 실험을 수행하였다. 연속 운전조건 결과로부터 W자형과 코일형 지중 열교환기의 보어홀 단위 길이당 열교환율이 우수하게 나타났기에 부분 운전 조건의 열성능 실험에서는 W자형과 코일형 열교환기에 대해 실시하였으며 유입수 온도 및 유량 등의 실험 조건은 연속 운전과 동일하였다. Fig. 6은 W자형과 코일형 지중 열교환기 이용시 5일간 부분 운전에 따른 열교환율을 나타낸다. 5일간의 부분 운전 실험 결과 W자형 열교환기 이용시 평균 열교환율 값을 54.16W/m, 코일형 열교환기 이용시는 평균 103W/m의 열교환율 값을 보였다. 부분 운전 조건이 연속 운전 조건에 비해 30~40% 가량 높은 열교환 효율을 유발하는 것으로 나타났다. 이는 연속 운전 조건은 부분 운전 조건에 비해 지반으로

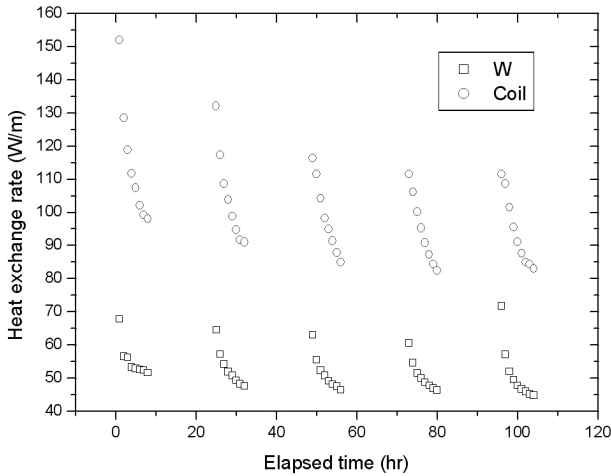


Fig. 6. Heat Exchange Rate for Five Days Under the Intermittent Operation

열이 계속 축적되기에 열전달 효율 감소가 크게 나타난 것으로 판단된다.

4.3 냉방 가동 6개월 장기성능 예측 결과

100시간 연속 운전 실험 결과와 5일 부분 운전 실험 결과 산출된 열교환을 값을 근거로 Figs. 5 and 7의 추세선 식을 이용하여 회귀분석을 통해 6개월 냉방 가동시 열교환을 값을 추정하였다. 물론 일반적인 상업용 건물이라 할지라도 현실적으로 6개월 동안 냉방 가동은 불가능하지만 본 연구에서는 부분 운전 및 연속 운전의 장기간 비교 분석을 위하여 6개월 동안의 냉방 가동 조건하에 열성능 예측을 실시하였다. 계속된 실험값을 근거로 산출된 추세선 식의 R^2 값은 모두 0.9 이상으로 본 회귀분석을 통한 3개월 동안의 열교환을 값을 예측하는데 큰 오차 없이 사용될 수 있는 것으로 판단된다. 부분 가동의 경우 W자형과 코일형 지중 열교환기에 대해서만 수행하였기에 두 가지 형태에 대해서만 6개월 장기성능을 예측하였다. Fig. 7은 5일간의 평균 열교환을 값을 이용한 추세선 식을 보여주고 있다. Fig. 8은 지중 열교환기의 6개월 연속 운전시 예상되는 열교환을을 나타내고 있으며 Fig. 9는 W자형과 코일형 지중 열교환기의 6개월 부분 운전시 예측된 열교환을을 보여주고 있다. Table 2는 지중 열교환기 형태별 실험결과와 6개월 간 예측된 열교환을을 요약하여 보여주고 있다. 시간이 지날수록 지반으로 방출되는 열량이 축적되기에 그만큼 열교환을 값이 감소되는 것을 알 수 있다. 6개월 예측에서도 부분 운전 조건이 연속 운전 조건에 비해 30~40% 가량 높은 열교환 효율을 유발하는 것으로 나타났다. 일반 수직 밀폐형의 열교환율이 40~70W/m 인 것을 감안할 때(European Geothermal Energy Council, 2008) 본 연구에서 계속된 열교환을 값을 코일형을 제외하고는 다소 낮은 값을 나타내고 있다. 이는

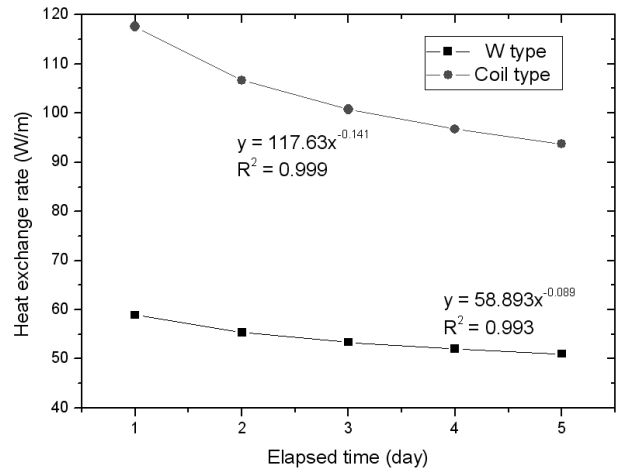


Fig. 7. Heat Exchange Rate by Regression Analysis

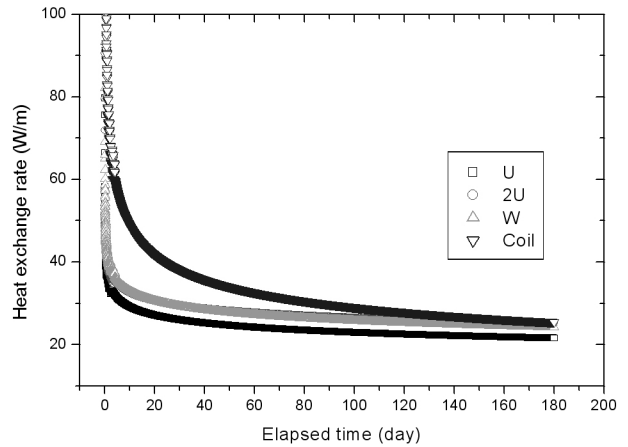


Fig. 8. Heat Exchange Rate for Sixth Months Under the Continuous Operation Condition

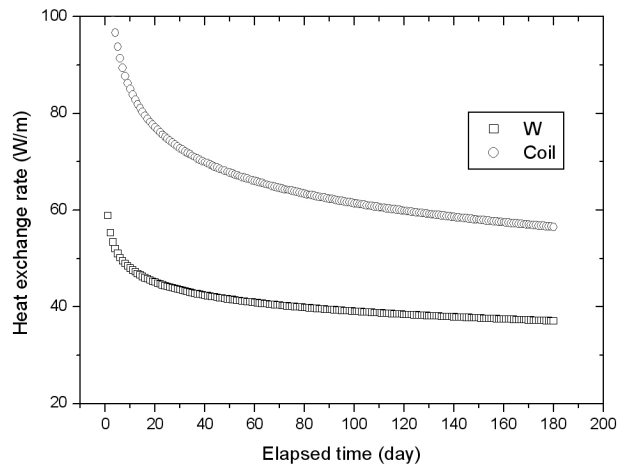


Fig. 9. Heat Exchange Rate for Sixth Months Under the Intermittent Operation Condition

Table 2. Summary of TPT (Thermal Performance Test) Results

GHE	Heat exchange rate under the continuous operation (W/m)		Heat exchange rate under the intermittent operation (W/m)						
	100hr average	6-month average	1day	2day	3day	4day	5day	5-day average	6-month average
U	35.74	24.10	-	-	-	-	-	-	-
W	40.76	27.11	58.7	55.6	53.6	52.2	50.7	54.2	40.63
2U	39.03	27.62	-	-	-	-	-	-	-
Coil	76.8	32.84	117.5	107.1	100.6	96.4	94	103.1	65.6

설치된 보어홀 수직깊이가 30~50mm로 얇고 지중 열전도도가 2.15W/m·K 근처로 다소 낮게 측정되었기 때문인 것으로 추정된다.

5. 결론

본 논문에서는 매립지 지반으로 구성된 인천국제공항 제 2여객 터미널이 건설될 부지에 U, W, 2U 그리고 코일형 지중 열교환기를 설치하여 현장 열응답 및 열성능 실험을 실시하여 지반의 열전도도 및 열교환율을 산정하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) U, W 그리고 2U자형 지중 열교환기 이용에 따른 지반의 열전도도는 각각 2.13, 2.15, 2.17W/m·K 값을 보였다. 열교환기 형태별 지반의 열전도도가 1~2% 범위 내에서 차이를 보였으나 이는 지반의 초기온도가 완전히 일치하지 않았고 열교환기 형태의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 열교환기 형태와 관계없이 무한 선형 열원 모델을 적용하여 열응답 실험을 통해 지반의 열전도도 추정이 가능하다.
- (2) U, W, 2U 그리고 코일형 지중 열교환기가 설치된 보어홀에 100시간 동안 연속으로 냉방 운전 조건으로 열성능 실험을 수행한 후 평균 열교환율 값을 산정한 결과 U자형 열교환기 이용시 35.71W/m, W자형 열교환기 이용시 40.76W/m, 2U자형 이용시는 39.03W/m 그리고 코일형 열교환기 이용시 76.8W/m의 열교환율을 보였다. W자형과 2U자형 지중 열교환기 이용시 U자형에 비해 10~15% 정도 열교환율이 상승되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 W자형과 2U자형 지중 열교환기는 U자형에 비해 더 넓은 열교환 접촉면적을 가지기 때문인 것으로 판단되며 W자형이 2U자형보다 4~5% 높은 열교환율 값을 보였으나 서로 간에 상대적인 우월성을 가지지는 않는 것으로 판단된다. 하지만 일반적인 U자형 열교환기는 30~40mm 직경의 HDPE (high density Polyethylene) 파이프가 사용되며 150mm의 보어홀 직경에 30mm 이상의 W자형 열교환기를 설치하기에는

시공상 어려움이 클 것으로 판단된다. 따라서 20~25mm 직경의 W자형 열교환기와 30~40mm 직경의 U자형 열교환기 적용시 상대적인 열성능을 비교 분석하는 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 코일형 지중 열교환기 이용시 나머지 타입들보다 대략 2배 정도 높은 열교환율을 나타내었는데 코일형 열교환기의 총 길이가 대략 350m 인 것을 감안하면 그만큼 그라우트와의 열접촉 면적이 넓기에 높은 열교환율 값을 가지는 것으로 판단된다.

- (3) W자형과 코일형 지중 열교환기를 이용하여 5일간의 부분 운전 실험 결과 W자형 열교환기 이용시 평균 열교환율 값은 54.16W/m, 코일형 열교환기 이용시는 평균 103W/m의 열교환율 값을 보였다. 즉 부분 운전 조건이 연속 운전 조건에 비해 30~40% 가량 높은 열교환 효율을 유발하는 것으로 나타났다. 이는 연속 운전 조건은 부분 운전 조건에 비해 지반으로 열이 계속 축적되기에 열전달 효율 감소가 크게 나타난 것으로 판단된다. 또한 계속된 값을 근거로 추세선 식을 산출하여 6개월 열교환율 값을 추정할 결과 U자형 연속 운전시 24.10W/m, W자형의 경우 연속 운전: 29.19W/m, 부분 운전: 40.63W/m의 값을 나타냈다. 또한 코일형의 경우 6개월 연속 운전시 32.84W/m, 부분 운전시는 65.58W/m 값을 나타냈다. 시간이 지날수록 지반으로의 방출되는 열량이 축적되기에 그만큼 열교환율 값이 감소되는 것을 알 수 있다. 6개월 예측에서도 부분 운전 조건이 연속 운전 조건에 비해 30~100% 가량 높은 열교환 효율을 유발하는 것으로 나타났다.
- (4) 이와 같이 지중 열교환기 형태별 열교환율은 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 또한 운전 조건에 대해서도 지반으로 축적되는 열량으로 인해 열교환율은 30~100% 정도 차이가 나는 것을 알 수 있다. 실제 지열시스템 가동시 연속 운전보다는 주기적으로 운전을 하는 것이 큰 효과를 볼 수 있을 것으로 판단되며 본 연구에서는 지중 열교환기 형태별 열효율만 분석하였기에 향후에는 지중 열교환기 형태별 시공비를 산정하여 경제성을 고려한 지중 열교환기 성능 분석이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원 건설기술혁신산업(11기술혁신E04)과 미래창조과학부 한국연구재단의 기초과학연구사업(2012-0005074)의 지원사업으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Brandl, H. (2006). "Energy foundations and other thermo-Active ground structures." *Geotechnique*, Vol. 56, No. 2, pp. 81-122.
- Cui, P., Li, X., Man, Y. and Fang, Z. (2011). "Heat transfer analysis of pile geothermal heat exchangers with spiral coils." *Applied Energy*, Vol. 88, pp. 4113-4119.
- European Geothermal Energy Council. (2008). *Ground source heat pump: A guide book*, Brussel.
- Geothermal Energy Education Center. (2011). *Geothermal system design*, Konkiwon (in Korean).
- Lee, C., Park, M., Min, S., Choi, H. and Sohn, B. (2010). "Evaluation of performance of grouts and pipe sections for closed-loop vertical ground heat exchanger by in-situ thermal response test." *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 26, No. 7, pp. 93-106 (in Korean).
- Lim, H. J., Kong, H. J., Kang, S. J. and Choi, J. H. (2011). "The effect of the installation condition of ground loop heat exchanger to the thermal conductivity and borehole resistance." *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 23, No. 2, pp. 95-102 (in Korean).
- Man, Y., Yang, H., Diao, N., Liu, J. and Fang, Z. (2010). "A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchangers." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 2593-2601.
- Min, K. C. and Choi, J. H. (2011). "Effect of the design parameters of goethemral heat exchanger design length." *Journal of Korean Society of Geothermal Energy Engineers*, Vol. 7, No. 2, pp. 10-15 (in Korean).
- Pahud, D. and Matthey, B. (2001). "Comparison of the thermal performance of double U-pipe borehole heat exchangers measured in situ." *Energy and Building*, Vol. 33, pp. 503-507.
- Park, H. K., Lee, S. R., Yoon, S. and Choi, J. C. (2013). "Evaluation of thermal response and performance of PHC energy pile: Field experiments and numerical simulation." *Applied Energy*, Vol. 103, pp. 12-24.
- Park, M. S., Lee, C. H., Park, S. W., Shon, B. H. and Choi, H. S. (2012). "Evaluation of ground thermal conductivity by performing in-situ thermal response test (TRT) and CFD back-analysis." *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 28, No. 12, pp. 5-15 (in Korean).
- Sohn, B. H., Shin, H. J. and Park, S. K. (2005). "Evaluation of effective thermal conductivity and thermal resistance in ground heat exchanger boreholes." *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 695-703 (in Korean).
- Yoon, S., Lee, S. R., Park, H. and Park, S. (2012). "Thermal conductivity estimation of soils using coil shaped ground heat exchanger." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 5C, pp. 177-183 (in Korean).