

피치 간격에 따른 수평 슬링키형과 코일형 지중 열교환기의 열효율 평가

Evaluation of Heat Exchange Rate in Horizontal Slinky and Coil Type Ground Heat Exchangers Considering Pitch Interval

윤 석 ¹	Yoon, Seok	이 승 래 ²	Lee, Seung-Rae
김 민 준 ³	Kim, Min-Jun	김 우 진 ³	Kim, Woo-Jin
고 규 현 ⁴	Go, Gyu-Hyun	전 준 서 ⁴	Jeon, Jun-Seo

Abstract

The need of geothermal energy is constantly increasing for economical and environmental utilization. Horizontal ground heat exchangers (GHEs) can reduce installation cost and increase efficiency. There are many kinds of GHEs, and it is known that slinky and spiral coil type GHEs show high thermal performance. Therefore, this paper presents experimental results of heat exchange rates in horizontal slinky and spiral coil type GHEs installed in a steel box whose size is 5 m × 1 m × 1 m. Dried Joomunjin standard sand was filled in a steel box, and thermal response tests (TRTs) were conducted for 30 hours to evaluate heat exchange rates by changing different pitch spaces of horizontal slinky and spiral coil type GHEs. As a result, spiral coil type GHE showed 30~40% higher heat exchange rates per pipe length than horizontal slinky type GHEs. Furthermore, long pitch interval (Pitch/Diameter=1) showed 200~250% higher heat exchange rates per pipe length than short pitch interval (Pitch/Diameter=0.2) in both spiral coil and horizontal slinky type GHEs, respectively.

요 지

최근 들어 경제적이고 친환경적인 에너지 활용을 위하여 지열에너지 필요성이 증대되고 있다. 수평형 지중 열교환기는 설치 비용이 저렴하여 비용 대비 효율면에서 우수하다. 수평형 지중 열교환기의 타입에는 여러 가지가 있으나 이 중 슬링키형과 코일형이 우수한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 논문에서는 5m × 1m × 1m 크기의 모형 토조 내에 수평 슬링키형과 코일형 지중 열교환기를 각각 설치한 후 열교환율을 실험적으로 측정하였다. 모형 토조 내에는 건조 상태의 주문진 모래가 조성되었으며 수평 슬링키형과 코일형의 피치 간격에 따라 열교환율을 측정하기 위해 30시간 동안 연속으로 열응답 시험을 실시하였다. 실험 결과 코일형 지중 열교환기 이용시 수평 슬링키형 보다 약 30, 40% 정도의 높은 파이프 단위 길이당 열교환율을 보였다. 또한 수평 슬링키형과 코일형 이용시 피치 간격이

1 정회원, KAIST 건설및환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., KAIST)

2 정회원, KAIST 건설및환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., KAIST, Tel: +82-42-350-3617, Fax: +82-42-350-7200, srlee@kaist.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

3 비회원, KAIST 건설및환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., KAIST)

4 비회원, KAIST 건설및환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., KAIST)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

넓을 때(피치/직경 = 1)가 좁을 때(피치/직경 = 0.2)보다 약 200, 250% 정도의 높은 파이프 단위 길이당 열교환율을 나타냈다.

Keywords : Horizontal ground heat exchanger, Spiral coil, Horizontal slinky, Heat exchange rate

1. 서론

최근 들어 신·재생에너지 이용에 대한 관심과 필요성이 늘어나면서 지열원 열펌프 시스템(ground source heat pump systems)의 수요가 나날이 증대되고 있다. 지열 에너지는 연중 일정하게 유지되는 지중의 온도를 활용하는 친환경 에너지원으로서 최근에 화두가 되고 있는 신·재생에너지 정책에 잘 부합하며 태양에너지, 풍력 에너지 등과 함께 대체 에너지로서 각광을 받고 있다(Johnston & Narsilio, 2011). 지열원 히트펌프 시스템은 크게 지열 히트펌프(geothermal heat pump)와 지중 열교환기(ground heat exchanger)로 구성되는데, 지중에 설치된 지중 열교환기는 열교환기 파이프 내부로 유체를 순환하여 열을 추출 또는 배출함으로써 비교적 일정한 온도를 유지하는 지반을 열원으로 이용한다(Jun et al., 2009; Go et al., 2014). 지열원 열펌프 시스템은 지중 열교환기 형상에 따라 수직밀폐형과 수평밀폐형으로 구분될 수

있다. 이 중 수직밀폐형은 가장 널리 사용되는 타입으로써 일반적으로 깊이 150~200m의 수직밀폐형 타입이 가장 많이 사용되고 있다. 수직밀폐형 지중 열교환기는 수직으로 천공된 보어홀(시추공)과 지중과의 열교환 파이프, 그리고 보어홀과 파이프 사이의 빈 공간을 채우는 그라우트로 구성된다. 하지만 수직밀폐형은 수십미터에서 수백미터에 달하는 시추공을 설치해야 하는 이유로 과도한 초기 시공비가 발생하는 단점이 있다. 이에 대한 대안으로써 최근에는 말뚝과 같은 구조물의 기초 설치 시 지중 열교환기를 매입하는 에너지 파일이 널리 사용되고 있다(Laloui et al., 2006; Gao et al., 2008; Park et al., 2012; Park et al., 2013; Yoon et al., 2013; Yoon et al., 2014).

이렇듯 수직밀폐형과 에너지 파일에 대한 연구는 국내외적으로 활발하게 진행되고 있는 반면 수평형 지중 열교환기에 대한 연구는 상대적으로 미흡하다. 수평형 지중 열교환기(Fig. 1)는 설치부지가 충분할 경우 수직

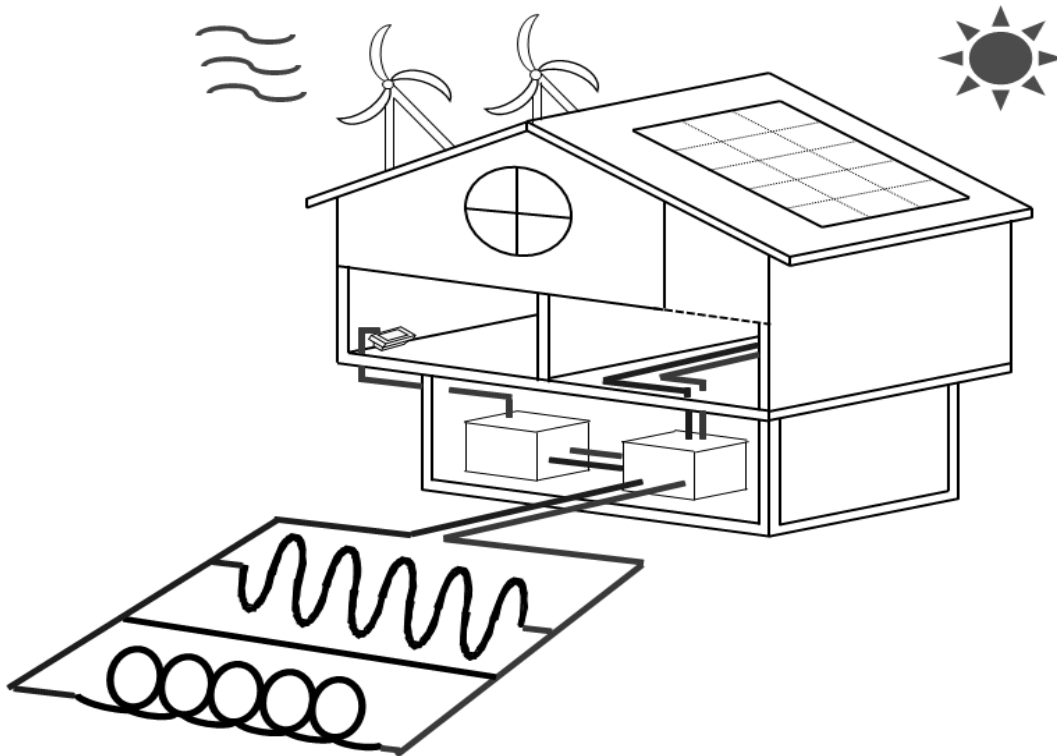


Fig. 1. Schematic view of horizontal GHE

형에 비해 상대적으로 저렴한 비용으로 설치할 수 있기에 비용 대비 효율이 우수한 것으로 알려져 있다(Demir et al., 2009; Sohn, 2011; Naili et al., 2013). 일반적으로 수직밀폐형이 수평형 시스템 대비 1.4배 정도 비용이 더 소요되는 것으로 알려져 있다(Minstry of Commerce, Industry and Energy, 2007). 수평형 지중 열교환기는 지표면에서 1.5~3m 깊이로 설치되기 때문에 지반의 열물성, 파이프 배치, 파이프 타입, 트렌치 깊이 등과 같은 다양한 인자에 대한 영향을 받기에 이에 대한 연구가 주로 이루어지고 있다(Pulat et al., 2009; Wu et al., 2010; Benazza et al., 2011; Chong et al., 2013; Sohn et al., 2013). 이중 다양한 파이프 타입에 따른 수평형 지중 열교환기 성능에 관한 연구는 부족한 실정이다. 현재 수평형 지중 열교환기를 설계할 수 있는 유일한 상용 프로그램인 GLD는 라인형과 슬링키형만 고려할 수 있다(Gaia geothermal, 2012). Congedo et al.(2012)는 GLD에서 고려하지 못하는 코일형 열교환기를 추가하여 일반 라인형과 슬링키형에 대한 열효율을 수치해석으로 분석하여 코일형의 우수성을 제시하였으나 실제 실증 실험을 통한 열교환

기 종류에 따른 성능 및 효율을 검증하지는 못했다. 따라서 본 연구에서는 열교환기 형태에 따른 열효율을 분석하기 위하여 5m × 1m × 1m 크기의 모형 토조를 제작한 후 실내 열응답 시험을 실시하였다. 코일형과 수평 슬링키형의 피치 간격을 조절하여 네 가지 경우에 대해 각각 실험을 실시하였으며 각각에 따른 열교환율을 분석하였다.

2. 실험 원리 및 방법

2.1 실내 모형 토조 열응답 시험 개요

본 연구에서는 5m × 1m × 1m 크기의 실내 모형 토조를 제작한 후 주문진 표준사로 이루어진 단일지반을 구성하였다. 토사는 주위 토양을 모사하기 위한 것으로 1차원 모델과 조화되기 위해서는 토사 영역도 원통형으로 이루어져야 하나 제작상 어려움으로 인하여 사각형 형태로 제작되었다. 모형 토조는 열연 코일형 철판 5mm 두께로 제작되었으며 10mm의 단열 폴리에틸렌폼으로 토조 내부, 외부 및 바닥에 이중으로 단열 처리되었다. 본 실험에서는 Yoon et al.(2014)이 개발한 열성능 및 열응답 시험기가 사용되었으며 Table 1은 장비의 제원을 나타낸다.

모형 토조 내에 건조 상태의 주문진 표준사가 균질하게 조성되었으며 열응답 시험기 내의 순환 배관은 토조 내의 지중 열교환기와 연결된 후 열응답 시험이 수행되었다. 수평 슬링키형과 코일형 지중 열교환기는 열교환기의 중심이 토조 상부로부터 50cm 깊이에 위치하도록

Table 1. TPT equipment (Yoon et al., 2014)

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


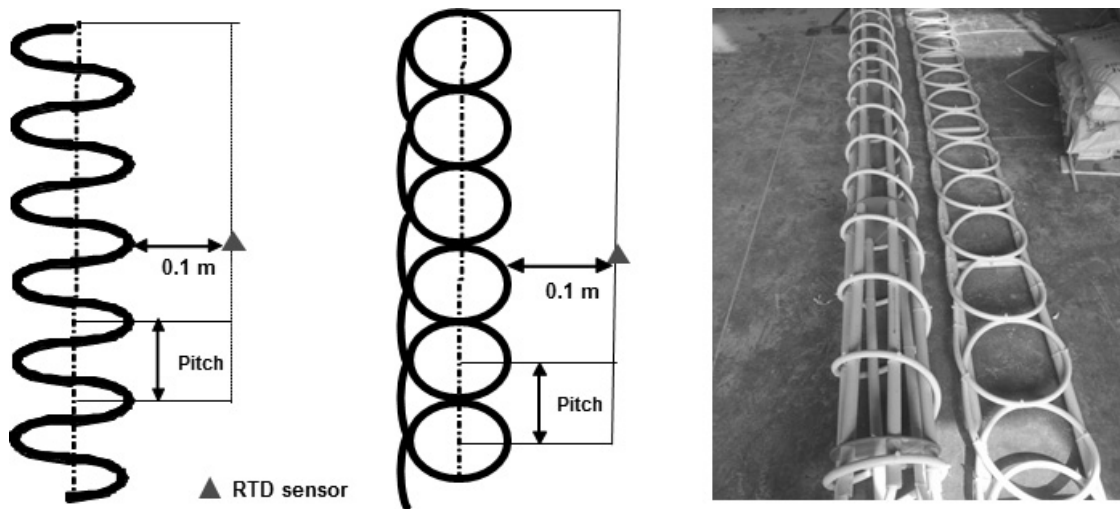



Fig. 2. Horizontal slinky and spiral coil type GHEs

설치되었다. 실험에 사용된 코일형과 수평 슬링키형의 지중 열교환기 직경은 30cm 였으며 PB(polybutylene) 소재의 파이프(외경/내경: 20mm/16mm)가 사용되었다(Fig. 2). 지반으로 확산되는 열거동을 분석하기 위해 파이프 끝단에서 10cm 떨어진 지점에 RTD(Resistance temperature detector)센서를 설치하였다. 코일형 지중 열교환기의 총 길이는 Park(2012)이 개발한 식 (1)에 의해 산정하였다.

$$L = \int_0^h \sqrt{w^2 r_0^2 + 1} dz = h \sqrt{w^2 r_0^2 + 1} \quad (1)$$

여기서 h 는 연직 길이이며 파수(w)는 $2N\pi/h$ 이며 N 은 코일의 감긴 횟수를 뜻한다. 그리고 r_0 는 코일의 반경을 나타낸다. 수평 슬링키형의 지중 열교환기 총 길이는 Ministry of Commerce, Industry and Energy(2006)이 개발한 식 (2)에 의해 산정하였다.

$$L = NL_l + 2PN + \pi d/2 + d \quad (2)$$

여기서 N 은 슬링키의 감긴 횟수이며 L_l 은 슬링키 루프 하나당 길이를 나타낸다. 또한 P 는 슬링키 루프의 피치를 뜻하며 d 는 슬링키의 반경을 나타낸다. 본 연구에서는 코일형과 수평 슬링키형의 피치 값이 6cm 일 때와 30cm 일 때 각각에 대해 열응답 시험을 실시하였으며

Table 2. Specification of GHEs

GHE	Pitch (P)	Number of Loop (N)	Total Length (L)
Spiral coil	P = 6 cm	N = 63	L = 62 m
	P = 30 cm	N = 15	L = 18 m
Horizontal slinky	P = 6 cm	N = 63	L = 66 m
	P = 30 cm	N = 15	L = 24 m

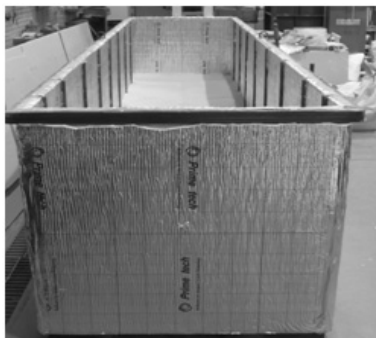
Table 2는 실험에 사용된 열교환기 파이프의 제원을 나타낸다. 지중 열교환기 파이프 형상에 따른 열교환율 차이를 분석하기 위해 파이프 형상 외에 다른 조건은 동일하게 조성하였지만 파이프 총 길이는 형상에 따라 어느 정도의 차이를 보일 수 밖에 없었다. 또한 Table 3은 토조 내에 조성된 주문진 표준사의 물리적 특성을 나타내고 있다. 토조 내 시료는 건조단위중량(γ_d) 14kN/m³에 맞추어 조성되었으며 모형 토조가 수평방향이고 함수비를 변화시켜가며 시료를 조성할 수는 없기에 건조한 상태에서 실험이 진행되었다. Fig. 3은 열응답 시험 과정을 보여주고 있다.

2.2 열응답 시험 원리

지중 열교환기의 열전달 메커니즘은 열전달 유체가 보어홀(시추공) 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; Choi et al., 2013). 열전달 방정식의 해를 구하는 방법은 선형 열원모델(line source model), 원통형 열원

Table 3. Physical properties of Joomunjin sand

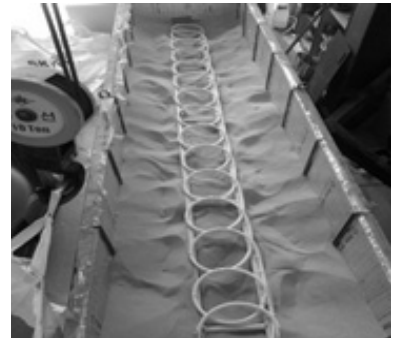
Properties	Value
Uniformity Coefficient, c_u	2.06
Curvature Coefficient, c_c	1.05
Specific Gravity, G_s	2.65
Maximum Dry Density, γ_{dmax} (kN/m ³)	16.17
Minimum Dry Density, γ_{dmin} (kN/m ³)	13.49
Water Content, w (%)	0



(a) Installation of steel box



(b) Preparation of specimens



(c) Installation of pipe

Fig. 3. Procedure of TRT

모델(cylindrical source model) 그리고 수치해석 모델 등이 있으며 이 중 무한 선형 열원 모델(infinite line source model)은 해석의 간편성과 편리성으로 인해 가장 많이 사용되고 있다. 열응답 시험은 수조 내에 일정한 열량을 주입한 후 순환수를 48시간 동안 연속으로 순환시킨 후 해석해를 이용하여 지반의 열전도도를 측정하기 위한 실험이다. 하지만 열응답 시험은 일정한 열량을 주입하기 때문에 지반에서 방출되는 열효율을 측정할 수는 없다. 이에 대한 대안으로 열성능 실험이 있는데 열성능 실험은 지반으로 투입되는 순환수 온도를 일정하게 제어한 후 식 (3)을 이용하여 지반에서 방출되는 열량을 측정하여 열효율을 구할 수 있다.

$$Q = \dot{m}c(T_{f,inlet} - T_{f,outlet}) \quad (3)$$

여기서, \dot{m} 은 순환수의 질량 흐름 속도(mass flow rate, kg/s)이고 c 는 순환수의 비열을 뜻한다. 또한 $T_{f,inlet}$ 과 $T_{f,outlet}$ 은 순환수의 입출구 온도를 나타낸다. 하지만 본 모형 토조에서는 지반의 열전도도가 낮아 열용량이 작기에 지반으로 투입되는 온도가 일정하게 제어되지 않았다. 수조 내의 온도를 일정하게 제어하고자 하였으나 시간이 지날수록 순환수 온도는 제어 온도 이상으로 계속 상승하는 현상이 발생하였다. 따라서 본 연구에서는 물탱크 내의 히터에는 전력을 투입하지 않았으며 순환 펌프 전력만으로 열응답 시험을 실시하여 식 (3)을 통하여 토조 내 토사에서 방출되는 열교환율을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

Table 2의 네 가지 케이스에 대하여 30시간 동안 열응

답 시험을 각각 실시하여 열교환율을 예측하였다. 열응답 시험 결과 대략 20시간 이후부터는 순환수의 온도상승이 미미하여 정상상태에 도달하였기에 30시간까지 열응답 시험을 수행하였다. 토조 내 주문진 표준사의 초기 온도는 17~18°C였으며 지중 열교환기 내 유체가 순환하기 위한 순환 펌프는 평균 4~5.5lpm(liter per minute) 유량으로 운전되었다. Fig. 4와 Fig. 5는 우선 피치 간격이 6cm로 피치/직경 값이 0.2일 때 시간에 따른 파이프 단위 길이당 열교환율과 순환수 평균 온도 변화를 보여주고 있다. 코일형과 수평 슬링키형 적용시 전체 평균 열교환량은 373.2W와 290.6W였으며 이를 파이프 길이당 열교환율로 산정하면 6.02W/m와 4.40W/m 값을 나타냈다. 순환수 온도 값은 수평 슬링키형이 코일형 보다 더 높았으며 순환수가 낮게 올라간다는 것은 그만큼 지반과의 열전달이 잘 이루어지고 있는 것을 의미하므로 코일형의 열교환이 수평 슬링키형 보다 우수하다는 것을 알 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7은 피치 간격이 30cm로 피치/직경 값이 1일 때 시간에 따른 파이프 단위 길이당 열교환율과 순환수 평균 온도 변화를 나타내고 있다. 전체 열량은 피치 간격이 6cm일 때보다 감소하였으나 파이프 단위 길이당 열량은 각각 14.45W/m(코일형), 10.64W/m(수평 슬링키형)로써 피치 간격이 6cm 일 때 보다 약 200, 250% 높은 값을 나타내었다. 이는 피치 간격이 좁을수록 전체 열교환량은 증가할 수 있지만 파이프 간 열 간섭으로 인해 파이프 길이당 열교환율은 감소하는 것으로 판단되며 그만큼 파이프 비용 대비 열효율 또한 감소할 것으로 예상된다(Park et al., 2013). 또한 Fig. 8은 실험 동안 측정된 지반의 온도 값을 보여주고 있으며 수평 슬링키형 적용시 지반의 온도가 높게 측정되었는데 이는 파이

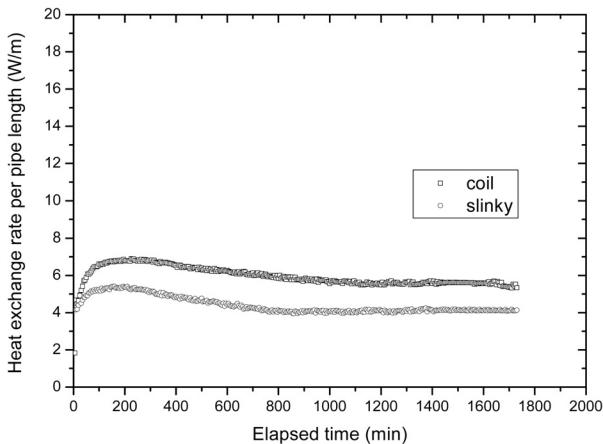


Fig. 4. Heat exchange rate per pipe length ($p = 6$ cm)

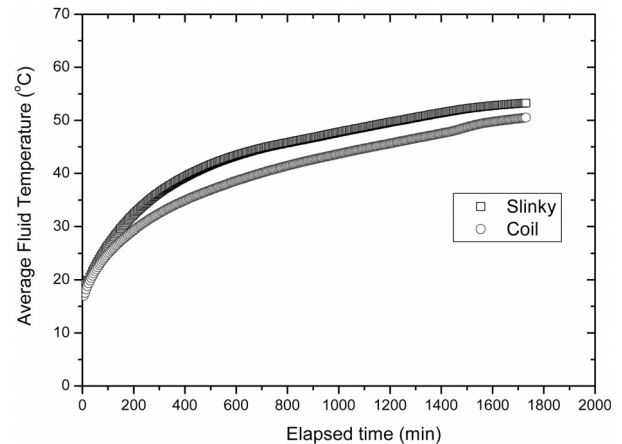


Fig. 5. Average fluid temperature distribution ($p = 6$ cm)

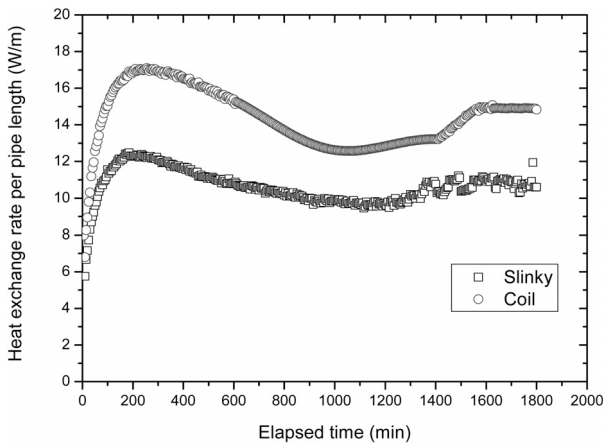


Fig. 6. Heat exchange rate per pipe length ($p = 30\text{ cm}$)

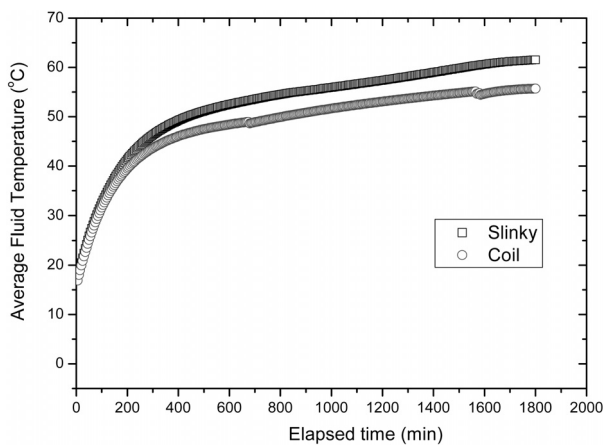


Fig. 7. Average fluid temperature distribution ($p = 30\text{ cm}$)

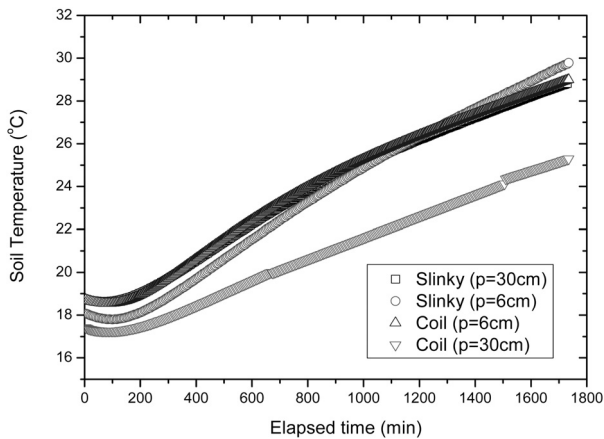


Fig. 8. Soil temperature distribution

프 내의 순환수 온도가 높게 형성되기에 지반의 온도도 높게 예측된 것으로 사료된다. Table 4는 실험 결과를 요약해주고 있다.

전체적으로 코일형이 수평 슬링키형 보다 파이프 길이 당 열교환율이 약 30, 40% 높게 나타났다. 현재 수평형을 설계할 수 있는 유일한 프로그램인 GLD에서는 코일형 지중 열교환기를 고려할 수 없기에 향후에는 이를 고려한 해석해 및 설계 기법 개발이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 수평형 지중 열교환기 타입에 따른 열교환율을 측정하기 위하여 코일형과 수평 슬링키형 열교환기를 $5\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ 크기의 모형 토조 내에 각각 설치한 후 열응답 시험을 수행하였다. 피치/직경 값이 0.2일 때와 1일 때, 각각 네 가지 경우에 대해 열교환율을 측정하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 연구에서는 물탱크 내의 히터에는 전력을 투입하지 않았으며 순환펌프 전력만으로 30시간 동안 연속으로 열응답 시험을 실시하여 토조 내 토사에서 방출되는 열교환율을 측정하였다. 피치 간격이 6cm로 피치/직경 값이 0.2일 때 코일형과 수평 슬링키형 적용시 전체 평균 열교환량은 각각 373.2W와 290.6W 였으며 이를 파이프 길이당 열교환율로 산정하면 6.02W/m와 4.40W/m 값을 나타냈다. 또한 피치 간격이 30cm로 피치/직경 값이 1일 때 코일형과 수평 슬링키형 적용시 전체 평균 열교환량은 각각 260.2W와 255.3W로 전체 열량은 피치 간격이 6cm일 때보다 감소하였으나 파이프 단위 길이당 열량은 각각 14.45W/m(코일형), 10.64W/m(수평 슬링키형)로써 피치 간격이 6cm 일 때 보다 약 200, 250% 높은 값을 나타내었다.
- (2) 피치 간격이 좁을수록 전체 열교환량은 증가할 수 있지만 파이프 간 열 간섭으로 인해 파이프 길이당

Table 4. Summary of test results

GHE	Pitch (P)	Heat exchange rate (W)	Heat exchange rate per pipe length (W/m)
Spiral coil	P = 6 cm	373.2	6.02
	P = 30 cm	260.2	14.45
Horizontal slinky	P = 6 cm	290.6	4.4
	P = 30 cm	255.3	10.64

열교환율은 감소하는 것으로 판단되며 그만큼 파이프 비용 대비 열효율 또한 감소할 것으로 사료된다. 전체적으로 코일형이 수평 슬링키형 보다 파이프 길이당 열교환율이 약 30, 40% 높게 나타났다.

- (3) 수평형 지중 열교환기 시스템은 비용 대비 열효율이 우수한 것으로 알려져 있으나 아직 국내외적으로 열교환율 측정 및 설계 기술 관련 연구가 미비한 실정이다. 현재 수평형을 설계할 수 있는 국내외 유일한 프로그램인 GLD에서는 코일형 지중 열교환기를 고려할 수 없기에 향후에는 이를 고려한 해석해 및 설계 기법 개발이 필요할 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 적용된 PB 재질은 직관형으로 사용되는 PE(polyethylene) 소재보다 단가가 많이 비싸기에 향후에는 PE 재질과 비교하여 비용대비 효율성에 대한 연구도 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업 연구개발사업(14DRP-B076575-01-000000)과 한국연구재단의 핵심개인연구 지원사업(2013R1A2A2A01067898)으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

- Benazza, A., Blanco, E., Aichouba, M., Rio, J. L., and Laouedj, S. (2011), "Numerical investigation of horizontal ground coupled heat exchanger", *Energy Procedia*, Vol.6, pp.29-35.
- Brandl, H. (2006), "Energy foundations and other thermo-active ground structures", *Geotechnique*, Vol.56, No.2, pp.81-122.
- Choi, J. C., Park, J. S., and Lee, S. R. (2013), "Numerical evaluation of the effects of groundwater flow on borehole heat exchanger arrays", *Renewable Energy*, Vol.52, pp.230-240.
- Chong, C.S.A., Gan, G., V. A., Garcia, R. G., and Vidale, P. L. (2013), "Simulation of thermal performance of horizontal slinky-loop heat exchangers for ground heat pump", *Applied Energy*, Vol.104, pp.603-610.
- Congedo, P.M., Colangelo, G., and Starace, G. (2012), "CFD simulation of horizontal ground heat exchangers: A comparison among different configurations", *Applied Thermal Engineering*, Vol.33-34, pp.24-32.
- Demir, H., Koyun, A., and Temir, G. (2009), "Heat transfer of horizontal parallel pipe ground heat exchanger and experimental verification", *Applied Thermal Engineering*, Vol.29, pp.224-233.
- Gaia Geothermal. Ground Loop Design Software, GLD2012.
- Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, K., and Yang, J. (2008), "Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles: an application", *Applied Energy*, Vol.85(10), pp.901-910.
- Go, G. H., Lee, S. R., Yoon, S., and Kang, H. B. (2014), "Design of spiral coil PHC energy pile considering effective borehole thermal resistance and groundwater advection effects", *Applied Energy*, Vol.125, pp.165-178.
- Johnston, I. W., Narsilio, G.A., and Colls, S. (2011), "Emerging geothermal energy technologies", *KSCE Journal of Civil Engineers*, Vol.15(4), pp.643-653.
- Jun, L., Xu, Z., Jun, G., and Jie, Y. (2009), "Evaluation of heat exchange rate of GHE in geothermal heat pump systems", *Renewable Energy*, Vol.34, pp.2898-2904.
- Laloui, L., Nuth, M., and Vulliet, L. (2006), "Experimental and numerical investigations of the behavior of a heat exchanger pile", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.30, pp.763-781.
- Ministry of Commerce, Industry and Energy (2006), "The development of ground heat exchangers that are more efficiency and lower price".
- Ministry of Commerce, Industry and Energy (2007), Development of design package for ground loop heat exchanger of ground source heat pump system".
- Naili, N., Hazami, M., Attar, I., and Farhat, A. (2013), "In-field performance analysis of ground source cooling system with horizontal ground heat exchanger in Tunisia", *Energy*, Vol.61, pp.319-331.
- Park, H., Lee, S. R., Yoon, S., Shin, H., and Lee, D. S. (2012), "Case study of heat transfer behavior of helical ground heat exchanger", *Energy and Building*, Vol.53, pp.137-144.
- Park, S. (2012), "Development and verification of ganalytical model and its solution for spiral coil type ground heat exchanger", Ph.D Thesis, KAIST.
- Park, S., Sohn, J. R., Park, Y. B., Ryu, H. K., and Choi, H. (2013), "Study on thermal behavior and design method for coil-type PHC energy pile", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.8, pp.37-51.
- Pulat, E., Coskun, S., Unlu, K., and Yamankaradeniz, N. (2009), "Experimental study of horizontal ground source heat pump performance for mild climate in Turkey", *Energy*, Vol.34, pp.1284-1295.
- Sohn, B. (2011), "Evaluation of ground temperature and soil thermal diffusivity using the soil temperature data of KMA", *Journal of the Korean Society of Geothermal Energy Engineers*, Vol.7, No. 1, pp.1-9.
- Sohn, B., Wi, J., Park, S., Lim, J., and Choi, H. (2013), "Evaluation of conventional prediction models for soil thermal conductivity to design horizontal ground heat exchangers", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.2, pp.5-14.
- Wu, Y., Gan, G., Verhoef, A., Vidale, P.L., and Gonzalez, R.G. (2010), "Experimental measurement and numerical simulation of horizontal-coupled slinky ground source heat exchangers", *Applied Thermal Engineering*, Vol.30, pp.2574-2583.
- Yoon, S., Lee, S. R., Park, H. K., Park, D. W., and Go, G. H. (2013), "Prediction of heat exchange rate in PHC energy piles", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 9, No.9, pp.31-41.
- Yoon, S., Lee, S. R., Go, G. H., Jianfeng, X., Park, H., and Park, D. (2014), "Thermal transfer behavior in two types of W-shaped ground heat exchangers installed in multilayer soils", *Geomechanics and Engineering*, Vol.6, No.1, pp.79-98.

Received : June 20th, 2014

Revised : July 16th, 2014

Accepted : July 22nd, 2014