

## 병렬 U형 현장타설 에너지파일의 열교환 효율 및 적용성 평가

박상우\* · 김병연\*\* · 성치훈\*\*\* · 최항식\*\*\*\*

Park, Sangwoo\* , Kim, Byeongyeon\*\* , Sung, Chihun\*\*\* , Choi, Hangseok\*\*\*\*

### Evaluation of Heat Exchange Efficiency and Applicability for Parallel U-type Cast-in-place Energy Pile

#### ABSTRACT

An energy pile is one of the novel ground heat exchangers (GHEX's) that is a economical alternative to the conventional closed-loop vertical GHEX. The combined system of both a structural foundation and a GHEX contains a heat exchange pipe inside the pile foundation and allows a working fluid circulating through the pipe, inducing heat exchange with the ground formation. In this paper, a group of energy piles equipped with parallel U-type (5, 8 and 10 pairs) heat exchange pipes was constructed in a test-bed by fabricating in large-diameter cast-in-place concrete piles. In addition, a closed-loop vertical GHEX with 30m depth was constructed nearby to conduct in-situ thermal response tests (TRTs) and to compare with the thermal performance of the cast-in-place energy piles. A series of thermal performance tests was carried out with application of an artificial cooling and heating load to evaluate the heat exchange rate of energy piles. The applicability of cast-in-place energy piles was evaluated by comparing the relative heat exchange efficiency and heat exchange rate with preceding studies. Finally, it is concluded that the cast-in-place energy piles constructed in the test-bed demonstrate effective and stable thermal performance compared with the other types of GHEX.

**Key words :** Energy pile, Closed-loop vertical ground heat exchanger, In-situ thermal response test, Thermal performance test, Applicability of energy pile

#### 초록

에너지파일은 기존의 수직밀폐형 지중열교환기를 경제적으로 대체할 수 있는 새로운 형태의 지중열교환기이다. 즉, 에너지파일은 건물의 기초 구조물과 지중열교환기의 역할을 동시에 수행하는 에너지 구조체로서, 말뚝 기초 내부에 열교환 파이프를 삽입하고 파이프를 통해 유체를 순환시켜 지반과의 열교환을 유도한다. 본 연구에서는 병렬 U형(5쌍, 8쌍, 10쌍)의 열교환 파이프를 대구경 현장타설 에너지파일에 삽입하여, 3본의 에너지파일을 실험규모로 시공하였다. 또한 현장 열응답 시험(In-situ thermal response tests, TRTs)을 수행하고 시공된 현장타설 에너지파일과의 열교환 효율을 비교하기 위하여 30m 깊이의 수직밀폐형 지중열교환기를 별도로 시공하였다. 병렬 U형 현장타설 에너지파일에 대해서는 냉난방 부하를 인공적으로 주입하는 열교환 성능 평가시험을 수행하여 열교환 성능(heat exchange rate)을 평가하였다. 마지막으로 현장타설 에너지파일의 적용성 평가를 위해 산정된 상대 열교환 효율(relative heat exchange efficiency) 및 열교환 성능을 선행 연구 결과와 비교하였으며, 본 연구에서 시공된 현장타설 에너지파일은 안정적이고 효율적인 열성능을 보이는 것으로 나타났다.

**검색어 :** 에너지파일, 수직밀폐형 지중열교환기, 현장 열응답 시험, 열교환 성능 평가시험, 에너지파일 적용성

\* 정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학부 석박사통합과정 (Korea University · ptstwt@korea.ac.kr)

\*\* 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Korea University · cratian@korea.ac.kr)

\*\*\* 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Korea University · hazlenut2@korea.ac.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 교신저자 · 고려대학교 건축사회환경공학부 교수, 공학박사 (Corresponding Author · Korea University · hchoi2@korea.ac.kr)

Received August 22, 2014/ revised October 13, 2014/ accepted February 6, 2015

## 1. 서론

지열 냉난방 시스템(geothermal heating/cooling system)은 지열에너지(geothermal energy)를 활용하는 친환경 시스템으로, 전세계적으로 에너지 위기가 큰 이슈가 되고 있는 최근 크게 각광받고 있다. 지열 냉난방 시스템은 열펌프(heat pump)와 지중열교환기(ground heat exchanger, GHEX)로 구성되며, 지중열교환기를 이용하여 냉방 시에는 건물 내의 열을 지중으로 방출하고 난방 시에는 지중의 열을 흡수함으로써 열펌프의 효율을 향상시켜 에너지 소비를 줄여준다. 지중의 온도는 연중 일정하기 때문에 지중의 열에너지를 열원으로 활용할 수 있게 된다.

일반적으로 지중열교환기를 통한 지반과의 열교환 정도 및 효율에 따라 지열 냉난방 시스템의 성능이 결정된다. 따라서 지반과의 열교환과 관계되는 지중열교환기의 형태, 지반의 열적 물성치 등이 지열 냉난방 시스템 설계에 가장 중요한 인자가 된다. 지중열교환기 중에서 가장 보편화되고, 시공사례가 많은 형태는 수직밀폐형 지중열교환기이다. 수직밀폐형 지중열교환기는 보통 직경 150 mm, 깊이 100~200 m의 보어홀에 싱글 U형 또는 더블 U형의 열교환 파이프를 삽입하는 형태로 시공된다. 그러나 수직밀폐형 지중열교환기의 시공을 위해서는 별도의 부지가 요구되고, 천공비 등의 초기 투자비가 크게 증가하여 지열 냉난방 시스템의 보급 활성화에 큰 걸림돌이 되고 있다. 따라서 최근 토목 또는 건축 구조물을 이용하여 지중열교환기를 설치하는 에너지 텍스타일(Markiewicz, 2004; Lee et al., 2012) 및 에너지파이프(Brandl, 2006; Laloui et al., 2003; 2006; Bourne-Webb et al., 2009) 관련 연구가 국내외적으로 활발히 진행 되고 있다.

에너지파이프이란 구조물 기초로 시공되는 현장타설 또는 기성 콘크리트 말뚝 내부에 열교환을 위한 순환 파이프를 설치하여 지중열교환기로 활용하는 구조물을 의미한다. 기초 구조물로 시공되는 말뚝을 지중열교환기로 활용함으로써 지중열교환기의 전체 시공비에 50% 이상 차지하는 천공비를 절감하는 경제적 효과를 얻을 수 있으며, 별도의 시공부지가 필요 없다는 장점을 갖는다. 그러나 에너지파이프의 시공 깊이는 일반적으로 20~50 m 정도로, 수직밀폐형 지중열교환기에 비해 깊이가 짧아, 연중 대기온도에 영향을 받고, 또한 깊은 지반에 존재하는 암반의 높은 열전도도를 활용하는데 제한이 있다. 또한 싱글 U형 또는 더블 U형의 열교환 파이프를 삽입할 경우, 수직밀폐형 지중열교환기와 비교하여 충분한 열교환 면적이 확보될 수 없으며, 이는 에너지파이프 열교환 성능 저하의 원인이 된다. 따라서 아직 세계적으로 에너지파이프가 활발하게 보급되고 있지 않은 실정이며, 특히 국내는 에너지파이프의 시공 및 활용 사례가 국외에 비하여 많이 부족하다.

기존 에너지파이프 관련 연구로서는 PHC 말뚝을 이용한 사례

(Morino and Oka, 1994; Li et al., 2006; Hamada et al., 2007; Nagano, 2007; Jalaluddin et al., 2011)가 다수 보고되고 있다. PHC 말뚝은 직경이 작아 다량의 열교환 파이프 삽입이 불가능하고 그라우트(grout) 종류에 따라 열전달의 영향을 크게 받는다(Monique de Noel et al., 2010). 따라서 최근에는 대규모 건물에 적용된 사례가 증가하고 있고, 큰 직경을 보유하고 있는 현장타설 콘크리트 말뚝을 이용한 에너지파이프가 크게 각광받고 있다. 특히, 국외에서는 현장타설 에너지파이프의 성능 향상을 위한 실증 연구(Gao et al., 2008; Jun et al., 2009; Wood et al., 2009)가 다수 수행되고 있으며, 실제 대규모 공공건물에 적용한 사례도 보고되고 있다(Sekine, K. et al., 2007; Pahud and Hubuck, 2007; Nam et al., 2007). 반면에 국내에서는 에너지파이프의 연구 및 시공사례(Park, et al., 2007; Yu, 2008; Lee et al., 2010; Park, et al., 2013)가 대부분 PHC 에너지파이프에 치중해 있으며, 현장타설 에너지파이프에 대한 실증 연구 및 시공사례는 전무한 실정이다.

이에 본 연구에서는 향후 국내 현장타설 에너지파이프 보급 활성화에 이바지 할 수 있도록 현장타설 에너지파이프의 성능 향상을 위한 연구를 수행하였다. 일반적으로 지중열교환기의 성능은 토양의 열전도도(thermal conductivity), 열용량(heat capacity), 지하수 유동 등의 지반 조건에 영향을 받으나, 이러한 인자는 시공 부지 및 주변 환경에 의해 결정되므로 임의로 제어할 수 없는 인자들이다. 따라서 대규모 현장타설 말뚝의 형태학적인 장점인 수직밀폐형 지중열교환기에 비해 약 30배 이상 큰 직경을 활용하여, 많은 수의 열교환 파이프를 설치하고 열교환 면적을 증가시킬 수 있는 방법을 고려하였다. 기존에 국외에서 현장타설 에너지파이프에 적용된 사례가 있는 병렬 U형 5쌍(Pahud and Hubuck, 2007) 열교환 파이프 형상을 확장하여 다수의 U형 열교환 파이프를 병렬로 삽입하는 형태를 고안하였으며, 설치된 U형의 수량에 따른 열교환 성능 및 효율을 평가하기 위하여 병렬 U형 5쌍, 8쌍, 10쌍이 삽입된 총 3본의 현장타설 에너지파이프를 테스트베드 현장에 시공하였다. 또한 U형 1쌍이 삽입된 30 m 깊이의 수직밀폐형 지중열교환기를 별도로 시공하여, 현장타설 에너지파이프와의 열교환 효율을 비교하였다. 현장타설 에너지파이프와 수직밀폐형 지중열교환기의 열교환 효율은 현장 열응답 시험(in-situ thermal response test, TRT)을 수행하고 시험결과를 바탕으로 상대 열교환 효율(relative heat exchange efficiency)을 산정함으로써 판단하였다. 추가적으로 기존에 수행되었던 수직밀폐형 지중열교환기에 대한 현장 열응답 시험 결과(Park et al., 2012; Lee et al., 2013)를 활용하여 각 수직밀폐형 지중열교환기별 상대 열교환 효율을 분석한 후, 현장타설 에너지파이프의 상대 열교환 효율과 비교하여 수직밀폐형 지중열교환기 대비 현장타설 에너지파이프의 적용성을 판단하였다.

또한, 현장타설 에너지파이프를 실제 건물 냉난방을 위한 지중열교

환기로 활용시, 열교환 성능을 평가하기 위하여 냉난방 열교환 성능 평가시험(thermal performance test)을 수행하였다. 열교환 성능 평가시험을 통하여 1주일간 획득한 열교환량을 산정하였고, 산정된 열교환량은 에너지파일의 근입 깊이 및 삽입된 열교환 파이프의 길이로 정규화하여 열교환 파이프 형태별 열교환 성능(W/m)으로 표현하였다. 시험결과는 기존 연구를 통해 산정된 수직밀폐형 지중열교환기와 개방형 지중열교환기 및 에너지파일에 대한 열교환 성능(Johnston et al., 2011)과 비교하여, 기존의 지중열교환기를 기준으로 현장타설 에너지파일의 열성능 및 적용성을 제시하였다.

## 2. 현장 시공

본 연구에서는 에너지파일의 성능 향상을 위한 인자로 에너지파일 내부에 삽입되는 열교환 파이프의 형상 및 집적도에 초점을 맞추고, 열교환 파이프와 복합매질 사이의 접촉 면적을 증가시키는 방법을 고려하였다. 기본적으로 국외에서 현장타설 에너지파일에 활용된 사례가 있는 병렬 U형 5쌍(Pahud and Hubbuck, 2007)의 형태를 선정하였고, 이 형태에서 열교환 면적을 증가시키면서 시공성과 열간섭의 영향을 평가할 수 있도록 병렬 U형 8쌍과 병렬

Table 1. Material Properties and Configurations of Heat Exchange Pipe

Material property of heat exchange pipe		High density polyethylene (HDPE)	
Cast-in-place energy pile	Specification	Inner diameter	21mm
		Outer diameter	27mm
	Configurations and total length	Parallel U-type 5 pairs	130m
		Parallel U-type 8 pairs	208m
Parallel U-type 10 pairs		260m	
Closed-loop vertical GHEX	Specification	Inner diameter	16mm
		Outer diameter	20mm
	Configurations and total length	Single U-type	60m

Table 2. Specification of Cast-In-Place Energy Piles and Closed-Loop Vertical GHEX

Type	Diameter	Penetration depth	Number	Configuration of heat exchange pipe
Large diameter cast-in-place energy pile	∅ 1,500mm	14.0m	3	Parallel U-type (5 pairs, 8 pairs, 10 pairs)
Closed-loop vertical GHEX	∅ 50mm	30.0m	1	Single U-type

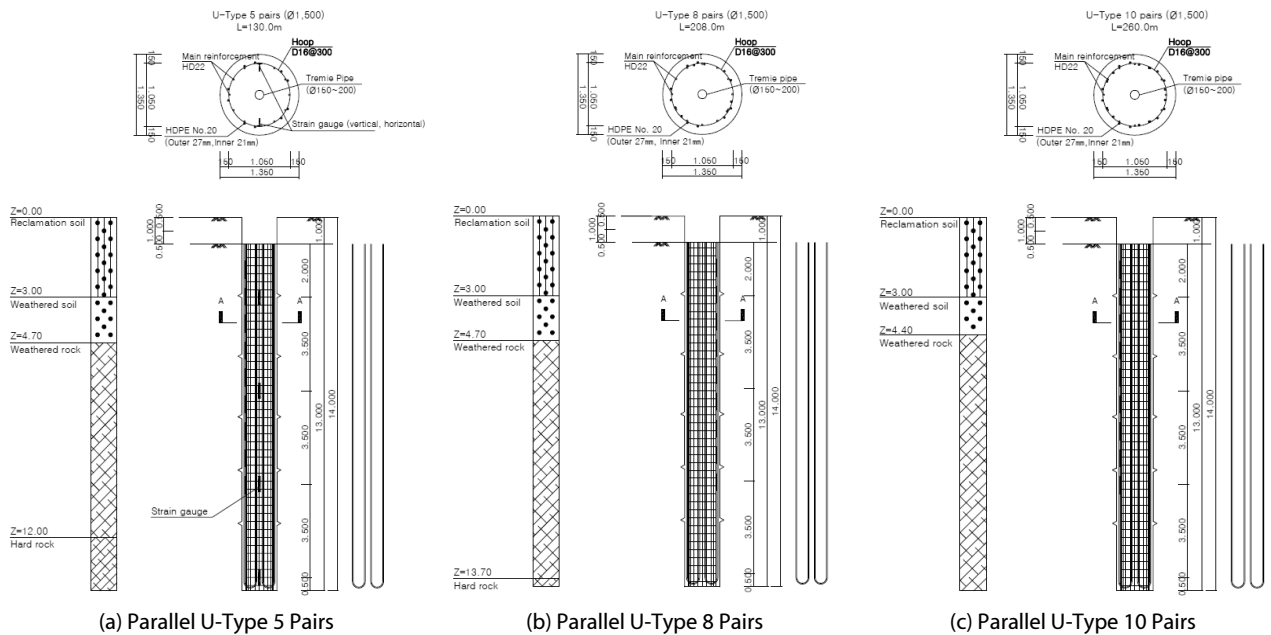


Fig. 1. Schematics of U Type Cast-In-Place Energy Piles

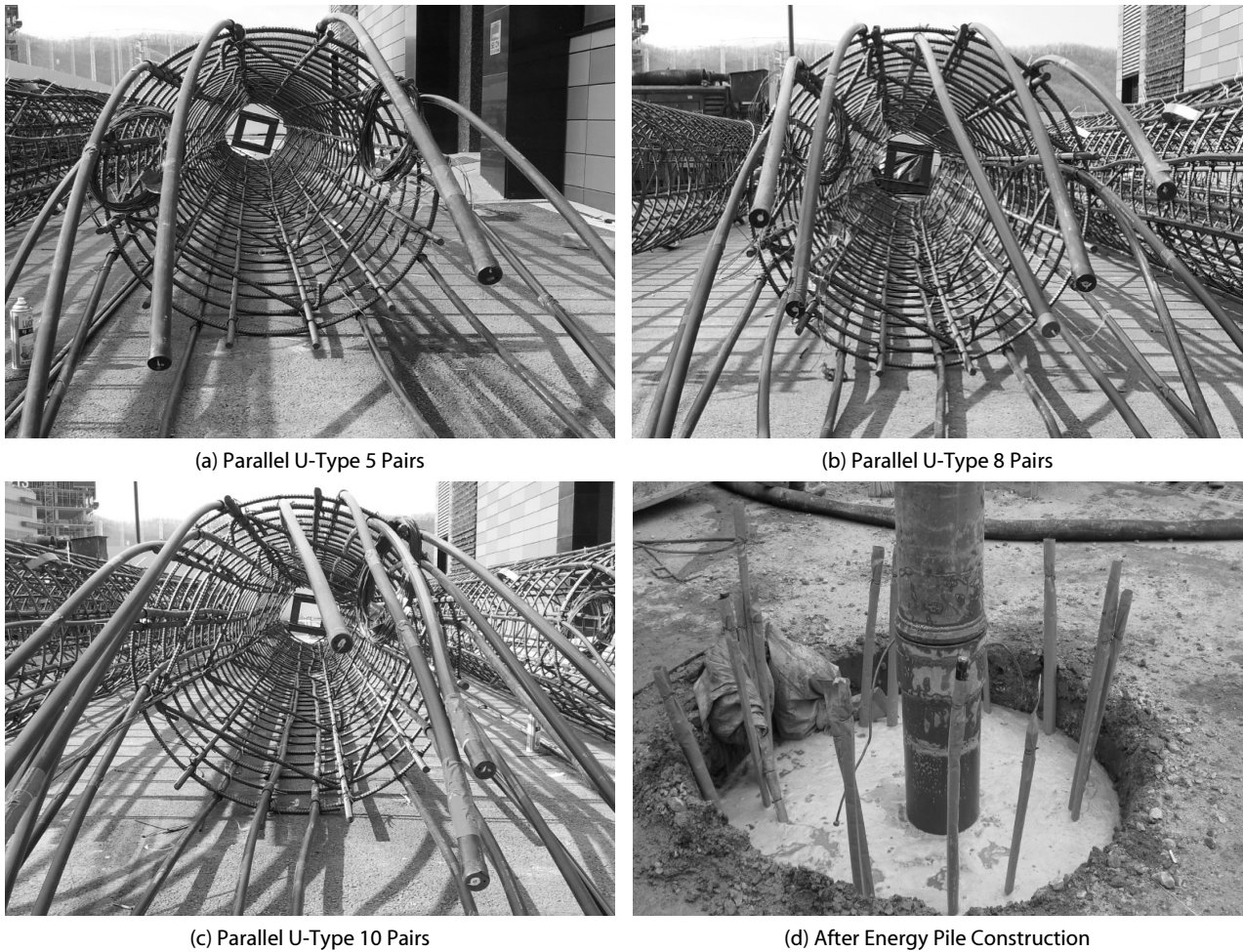


Fig. 2. Construction of Cast-In-Place Energy Piles

U형 10쌍의 형태를 추가로 설치하였다. Table 1은 각각의 지중열교환기에 대한 파이프의 제원 및 형태를 정리한 것이다.

지중열교환기 시공에 앞서 지반조사를 먼저 시행하였다. 지표로부터 3 m까지는 매립층, 3~5 m 구간은 풍화토, 5~13.5 m 구간은 풍화암이 분포하고, 약 13.5 m부터 경암층이 출현하였다. 따라서 현장타설 에너지파일은 경암층까지의 깊이인 14 m의 천공 심도로 시공하였으며, 직경은 부지의 면적을 고려하여 1,500 mm로 선정하였다. 현장타설 에너지파일과 수직밀폐형 지중열교환기의 제원은 Table 2에 정리하였으며, 현장타설 에너지파일의 단면도 및 모식도는 Fig. 1에 나타났다.

에너지파일의 시공은 열교환 파이프를 현장타설말뚝의 철근망에 형상에 따라 부착한 후, 철근망을 근입하고 콘크리트를 타설하는 순서로 진행된다. 병렬 U형 5쌍의 열교환 파이프는 철근망의 외부 전단면을 활용하여 피치간격 500 mm로 부착되었다. 병렬 U형 8쌍의 경우에는 5쌍은 철근망 외부에, 나머지 3쌍은 철근망 내부에

부착되었으며, 병렬 U형 10쌍의 경우에는 5쌍은 철근망 외부에, 나머지 5쌍은 철근망 내부에 부착되었다. 병렬 U형 8쌍과 10쌍의 피치 간격은 250 mm이다. 열교환 파이프 부착 후의 모습은 Fig. 2에 나타났다.

### 3. 현장 열응답 시험(In-situ thermal response test)

#### 3.1 시험 개요

현장 열응답 시험이란, 일정한 열량을 지속적으로 주입하였을 때 순환수의 온도변화를 통하여 지중열교환기의 효율을 평가하고, 대상 지반의 열적 물성치를 획득하기 위한 실험이다(Wagner and Clauser, 2005; Sharqawy et al., 2009). 즉, 지반과 열교환 후 유출되는 순환수에 열응답 시험기를 통해 일정한 열량을 주입한 후 다시 지반으로 유입시켜 열교환을 수행한다. 현장 열응답 시험은 48시간 이상 수행되며 초기 천이구역 이후 일정하게 유지되는

입출구의 온도차를 통해 지반의 열적 물성치를 예측하거나 지중열 교환기의 효율을 평가할 수 있다.

실무적으로는 현장 열응답 시험 결과를 선형 열원 모델(line source model, Carslaw and Jaeger, 1959)을 통해 분석한 후, 지반의 유효 열전도도(effective thermal conductivity)를 평가한다(Mogensen, 1983). 선형 열원 모델은 선형 열원을 기준으로 반경방향 임의의 위치에서 시간에 따른 온도변화를 예측할 수 있는 모델이다. 이때 선형 열원 모델은 열원 이외의 모든 매질을 균일한 매질 즉, 지반으로 가정한다. 따라서 선형 열원 모델을 통해 산정된 지반의 열전도도는 열교환 파이프와 그라우트의 열저항을 포함한 유효 열전도도이다(Park et al., 2012). 또한 선형 열원 모델은 열원을 무한 선형으로 가정하므로 에너지파일, 에너지 텍스타일(energy textile), 스탠딩 컬럼 웰(standing column well, SCW) 등 다양한 형태의 지중열교환기에 직접 적용하기에는 한계가 있다. 에너지파일의 경우에는 원통형 열원 모델(cylinder source model, Ingersoll, 1954), 개선된 일체 원통형 열원 모델(modified solid cylinder source model, Man et al., 2010), 링-코일 열원 모델(ring-coil source model, Cui et al., 2011) 등 선형 열원 모델의 가정 조건을 개선한 모델들이 개발되었으나, 신뢰성 검증이 충분하지 않고 모델 적용이 어려워 실무적으로는 사용되지 않고 있는 실정이다(Park et al., 2013).

따라서 본 연구에서는 시공된 수직밀폐형 지중열교환기 및 병렬 U형 현장타설 에너지파일에 대한 현장 열응답 시험 결과를 선형 열원 모델에 적용하고, 현장타설 에너지파일에 대한 선형 열원 모델의 적용 가능성을 평가하였다. 또한 현장 열응답 시험 결과를 통해 지중열교환기 형태별 열교환 효율을 평가하기 위하여, 시간에 따른 입출구 온도 경사를 입력 열량과 열교환 파이프의 길이 또는 보어홀의 근입 길이로 환산하여 상대 열교환 효율 인자(relative heat exchange efficiency factor)를 도출하였다.

### 3.2 선형 열원 모델(Line source model) 적용 결과

병렬 U형 현장타설 에너지파일 3본과 별도로 시공된 30 m 깊이의 수직밀폐형 지중열교환기를 대상으로 현장 열응답 시험을 수행하고, 이를 선형 열원 모델로 분석하여 대상 지반의 유효 열전도도를 산정하였다. 수직밀폐형 지중열교환기를 30 m 깊이까지만 시공한 이유는 일반적으로 20~50 m 깊이로 시공되는 현장타설 에너지파일에 적용할 수 있는 유효 열전도도 산정 방법을 검증하기 위해서이다.

선형 열원 모델은 열전달이 지중열교환기와 지반의 접촉면에서 일정한 열유속으로 반경 방향으로만 전달되며, 열원의 열량은 일정하게 유지된다고 가정한다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 열원을 제외한 매질의 열적 물성치는 동일하고, 열원은 매우 가는 무한

선형으로 구성되었다고 가정한다. 선형 열원 모델에서 반경방향 임의의 위치 온도는 다음과 같다.

$$T(r,t) = T_i + \frac{Q}{4\pi k_s L} \int_{x_0}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (1)$$

여기서,  $T_i$ 는 지반의 초기온도,  $k_s$ 는 지반의 열전도도(W/mK),  $L$ 은 보어홀의 깊이(m)를 나타낸다. 이때,  $T(r,t)$ 와 지반의 초기온도 차이를  $\Delta T$ 라 하면 위 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta T = \frac{Q}{4\pi k_s L} \ln(t) + \frac{Q}{L} \left[ \frac{1}{4\pi k_s} \ln\left(\frac{4\alpha}{\gamma r_b^2}\right) + R_b \right] \quad (2)$$

여기서,  $r_b$ 는 보어홀의 반지름(m),  $\alpha$ 는 열확산계수(m<sup>2</sup>/s)를 나타낸다. 즉, 시간 축의 자연로그 값과 온도차의 변화를 도식한 후 계산된 직선의 기울기로 지반의 열전도도( $k_s$ )를,  $y$ 축 절편값으로 열확산계수( $\alpha$ )와 열저항( $R_b$ )을 산정할 수 있다. 이때, 시간의 자연로그 값과 온도차의 변화 관계에서 기울기를 slope라 하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$k_s = \frac{Q}{4\pi \times slope \times L} \quad (3)$$

다음 Fig. 3은 수직밀폐형 지중열교환기와 현장타설 에너지파일에 대한 시험 결과를 나타낸 것이며, Table 3은 각각의 결과를 정리한 것이다.

수직밀폐형 지중열교환기에 대한 현장 열응답 시험 결과를 선형 열원 모델에 적용한 결과, 대상 지반의 유효 열전도도는 3.30 W/mK로 산정되었다. 반면에 현장타설 에너지파일의 시험 결과를 선형 열원 모델에 적용한 결과, 지반의 유효 열전도도는 각각 6.68 W/mK, 7.02 W/mK, 9.78 W/mK의 값을 나타냈다. Salomone and Marlowe (1993)이 제안한 일반적인 지반의 열전도도가 모래 및 점토는 1.5~2.6 W/mK, 암석은 2.0~5.5 W/mK의 범위를 가지는 것으로 비추어 볼 때, 현장타설 에너지파일의 현장 열응답 시험 결과를 바탕으로 산정된 지반의 유효 열전도도는 오차가 매우 큰 값으로 판단된다. 즉, 선형 열원 모델은 에너지파일과 같이 보어홀의 직경에 비하여 근입 깊이가 짧은 즉, 선형 열원으로 가정하기 힘든 에너지 구조체에 대해서는 적용이 어렵다는 결론이다. 또한 현장타설 에너지파일의 경우에는 큰 직경에 콘크리트를 채움재로 사용하여 지반 이외의 매질이 차지하는 용적이 매우 크므로, 열원 이외의 매질을 모두 동일한 열적 물성치를 갖는 지반으로 가정하는 선형 열원 모델을 적용할 경우에는 오차가 커진다.

수직밀폐형 지중열교환기에 대한 현장 열응답 시험 결과를 통하

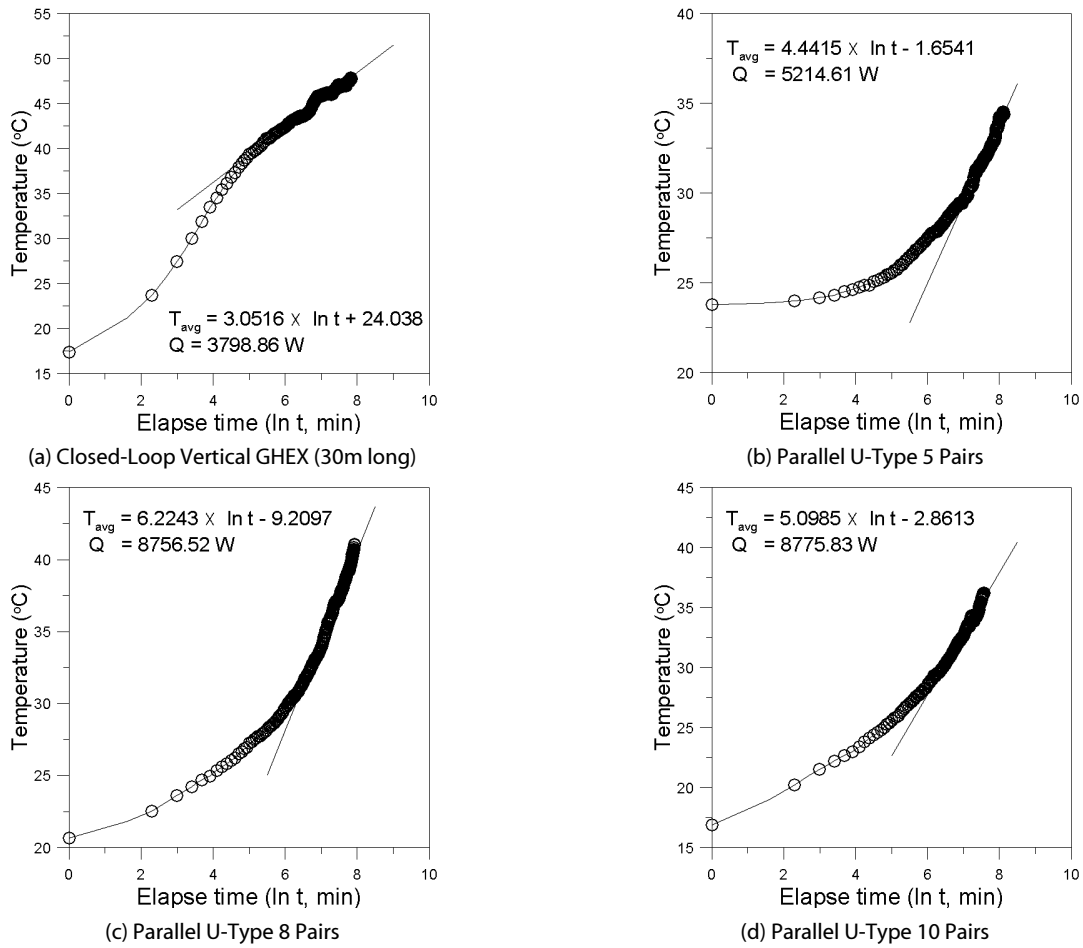


Fig. 3. Results of TRTs on Different GHEXs

Table 3. Results of TRTs Along with Line Source Model

Type	Depth of borehole	Applied heat amount	slope	Thermal conductivity of ground
U-type 5 pairs	14.00m	5214.61 W	4.44	6.68 W/mK
U-type 8 pairs	14.00m	8756.52 W	6.22	7.02 W/mK
U-type 10 pairs	14.00m	8775.83 W	5.10	9.78 W/mK
Closed-loop vertical GHEX	30.00m	3798.86 W	3.05	3.30 W/mK

여 대상 지반의 유효 열전도도는 3.30 W/mK로 결정하였다. 단, 일반적인 지반의 열전도도보다 약간 높은 값을 보이는데, 이는 현장시험이 수행된 지층에서 비교적 높은 열전도도를 보유한 기반암이 얇은 깊이(6 m)부터 출현했기 때문으로 사료된다.

### 3.3 상대 열교환 효율(Relative heat exchange efficiency)

#### 산정 결과

앞 절에서 설명한 바와 같이 에너지파일은 말뚝 직경에 비하여 길이가 충분히 길지 않으므로 선형 열원 모델을 적용하기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 상대 열교환 효율 인자를 적용하여 에너지파일 및 수직밀폐형 지중열교환기에 대한 열교환 효율을 평가하였다. 상대 열교환 효율 인자는 시간에 따른 입출구 온도 경사를 입력 열량과 열교환 파이프 길이 또는 에너지파일 길이로 환산하여 Eq. (4)와 같이 산정한다.

$$eff_{borehole} = \frac{Q}{slope \times L_{borehole}}; \quad eff_{pipe} = \frac{Q}{slope \times L_{pipe}} \quad (4)$$

Eq. (4)에서  $eff_{borehole}$  은 지중열교환기의 보어홀(에너지파이일에 서는 파일 근입깊이) 단위 길이 당 열교환 효율,  $L_{borehole}$  은 보어홀의 근입 깊이를 나타내며,  $eff_{pipe}$  은 열교환 파이프의 단위 길이 당 열교환 효율,  $L_{pipe}$  은 보어홀에 삽입된 열교환 파이프의 총 길이를 의미한다.

본 논문에서는 현장 시험시공된 1본의 수직밀폐형 지중열교환기와 3본의 병렬 U형 현장타설 에너지파이일에 대한 현장 열응답 시험 결과 이외에, 선행연구에서 수행되었던 수직밀폐형 지중열교환기에 대한 현장 열응답 시험 결과(Park et al., 2012; Lee et al., 2013)를 활용하여 각 수직밀폐형 지중열교환기별 상대 열교환 효율을 분석하였다. Lee et al. (2013) 및 Park et al. (2012)은 그라우트의 종류 및 파이프의 종류에 따라 총 6본의 수직밀폐형 지중열교환기를 시공하였으며, 각 지중열교환기에 대한 현장 열응답 시험을 수행하였다. 총 6본의 수직밀폐형 지중열교환기의 형태 및 현장 열응답 시험 결과는 Table 4에 정리하였다. 또한 Table 4에 정리한 기존의 현장 열응답 시험 연구 결과와 본 연구에서 수행한 현장 열응답 시험 결과를 바탕으로 Table 5에 산정된 상대 열교환 효율을 정리하였으며, 각 지중열교환기 형태별 열교환 효율을 비교하였다.

열교환기 형태에 따른 병렬 U형 현장타설 에너지파이일의 상대

열교환 효율을 비교하면, 병렬 U형 10쌍이 병렬 U형 5쌍에 비해 200%만큼 긴 열교환 파이프를 삽입하고 있으나 보어홀 근입 깊이 당 열교환 효율( $eff_{borehole}$ )은 150%의 차이만을 보였으며, 병렬 8쌍 역시 병렬 U형 5쌍에 비하여 160%의 열교환 파이프가 더 길게 삽입된 것에 비해  $eff_{borehole}$  는 120%배의 차이만 보였다. 이는 에너지파일 내부에 열교환 파이프가 많이 삽입될수록 더 조밀하게 설치되어 집적도가 증가하며, 이로 인해 순환수를 통한 열주입시 인접 파이프 간 열간섭이 발생하여 지반과 에너지파일 간의 열교환을 방해했기 때문으로 판단된다. 이 현상은 복합 U형 5쌍에서 열교환 파이프 길이 당 열교환 효율( $eff_{pipe}$ )이 가장 높게 산정된 사실에서도 확인할 수 있다. 병렬 U형 8쌍과 10쌍에서는 상대적으로 긴 길이의 열교환 파이프 삽입을 위하여 철근망의 내부와 외부를 모두 사용하였기 때문에, 철근망 외부만을 사용한 병렬 U형 5쌍보다 열간섭이 많이 발생한 것으로 판단된다.

단, 병렬 U형 10쌍과 병렬 U형 8쌍을 비교하면, 전체 열교환 파이프 길이 비는 1.25이고  $eff_{borehole}$  의 비는 1.23으로 산정되어, 에너지파일 길이 당 열교환 효율의 비가 삽입된 열교환 파이프 길이의 비와 유사하게 평가되었다. 이는 두 형태 모두 철근망 외부와 내부를 모두 사용함에 따라 피치간격이 비슷하게 시공되었고, 따라서 발생하는 열간섭 정도에서도 큰 차이를 나타내지 않았다는

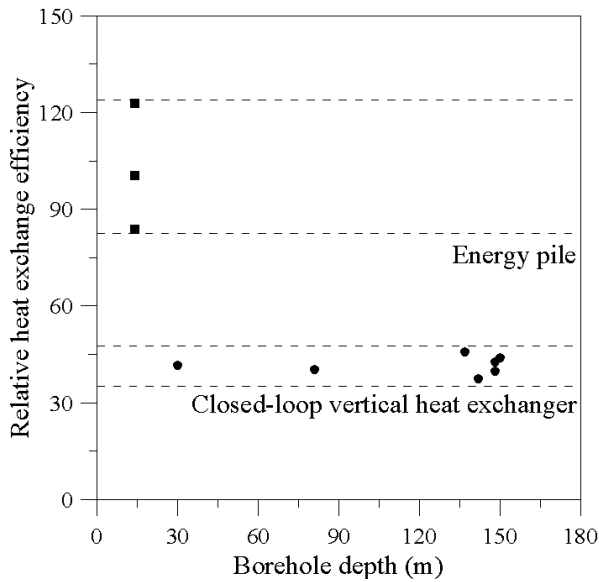
Table 4. Reference Values for TRT in Other Closed-Loop Vertical GHEs (Park et al., 2012; Lee et al., 2013)

Type	No.	Grout type	borehole depth	Applied heat amount	slope
U-type	1	Cement+Silica sand	81m	10618.48W	3.26
	2	Bentonite+Silica sand	142m	10811.47W	2.04
	3	Cement+Silica sand+Graphite	150m	10591.38W	1.61
	4	Bentonite+Silica sand+Graphite	148m	10730.06W	1.82
3 pipe type	5	Cement+Silica sand	137m	10619.65W	1.69
	6	Bentonite+Silica sand	148m	9168.93W	1.45

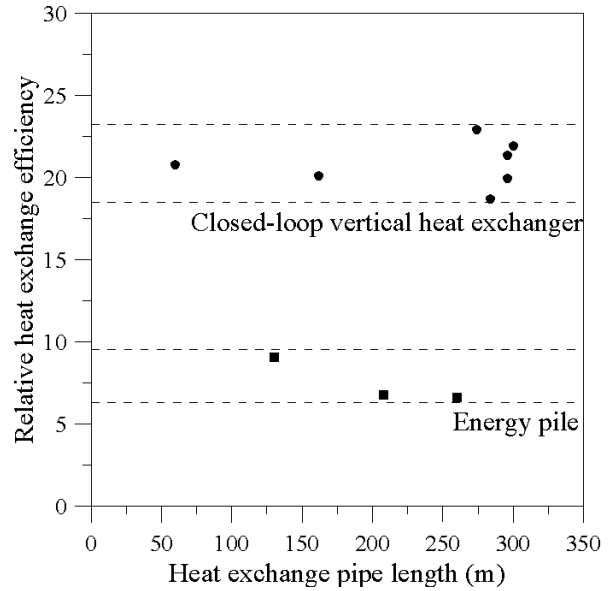
Table 5. Relative Heat Exchange Efficiency of Various Types of GHEs

Type	Length of pipe / borehole	slope	$eff_{borehole}$	$eff_{pipe}$
U-type 5 pairs	130 m / 14 m	4.44	83.86	9.03
U-type 8 pairs	208 m / 14 m	6.22	100.49	6.76
U-type 10 pairs	260 m / 14 m	5.10	122.95	6.62
Closed-loop vertical GHEX	60 m / 30 m	3.05	41.52	20.76
Borehole 1*	162 m / 81m	3.26	40.21	20.10
Borehole 2*	284 m / 142m	2.04	37.32	18.66
Borehole 3*	300 m / 150m	1.61	43.85	21.92
Borehole 4*	296 m / 148m	1.82	39.83	19.93
Borehole 5*	274 m / 137m	1.69	45.86	22.93
Borehole 6*	296 m / 148m	1.45	42.72	21.36

\*Closed-loop vertical GHEs in Table 4 (Park et al., 2012; Lee et al., 2013)



(a) Relative Heat Exchange Efficiency Per Borehole Depth



(b) Relative Heat Exchange Efficiency Per Heat Exchange Pipe Length

Fig. 4. Comparison of Relative Heat Exchange Efficiency

것을 의미한다. 이 결과는 병렬 U형 10쌍과 병렬 U형 8쌍의  $eff_{pipe}$  이 비슷한 값을 나타낸다는 결과를 통해서도 알 수 있다.

전술한 현장 열응답 시험결과는 에너지파일 성능 향상을 위해 열교환 파이프를 많이 삽입할수록 열간섭이 발생하므로 에너지파일 길이 당 열교환 효율은 선형 비례하지 않으며, 따라서 열교환 파이프 형태 및 피치간격에 따른 열간섭도 중요한 설계 인자로 고려되어야 한다는 것을 시사한다(Park et al., 2013).

Fig. 4에서는 현장타설 에너지파일과 수직밀폐형 지중열교환기에 대한 상대 열교환 효율을 비교하였다. 현장타설 에너지파일의  $eff_{borehole}$  은 85~123인 반면 수직밀폐형 지중열교환기의  $eff_{borehole}$  은 37~45로, 수직밀폐형 지중열교환기의  $eff_{borehole}$  이 상대적으로 작았다. 반면  $eff_{pipe}$  의 경우, 현장타설 에너지파일은 4.5~6의 범위, 수직밀폐형 지중열교환기는 18~22의 범위, 수직밀폐형 지중열교환기에서 상대적으로 높은  $eff_{pipe}$  를 갖는다. 수직밀폐형 지중열교환기는 싱글 U형 또는 더블 U형으로 시공되므로 인접 파이프 간 집적도가 낮아 열간섭이 비교적 적게 발생하여  $eff_{pipe}$  가 에너지파일에 비하여 높은 값을 보인다. 반면, 보어홀 근입 깊이당 삽입 가능한 열교환 파이프의 용적은 현장타설 에너지파일이 훨씬 크기 때문에 보어홀 근입 깊이당 얻을 수 있는 열교환량은 현장타설 에너지파일이 더 큰 값을 나타냈다. 즉, 수직밀폐형 지중열교환기와 비교하여 짧은 근입 깊이로 인한 에너지파일의 열교환 성능감소는 약 10배 이상의 큰 직경을 활용, 더 많은 열교환 파이프를 설치하여 전체 열교환 면적을 증가시키는 방법으로 보완할 수 있다고 사료된다.

#### 4. 냉난방 열교환 성능 평가시험(Thermal performance test)

##### 4.1 시험 개요

수직밀폐형 지중열교환기의 경우 다수의 열성능 평가시험을 통해 일반적으로 50 m에서 약 1RT 즉, 3,516 W의 열교환 열량을 획득할 수 있다고 알려져 있다. 그러나 현장타설 에너지파일에 대한 성능 평가는 수행된 예가 없다. 따라서 본 논문에서는 병렬 U형 열교환 파이프가 삽입된 현장타설 에너지파일의 실제 건물의 냉난방 운용 시 효율 및 성능 평가를 위하여 냉난방 열교환 성능 평가시험을 수행하였다. 냉난방 열교환 성능 평가시험은 냉방 또는 난방 운전온도 조건에서 에너지파일 지중열교환기의 유출수 온도 변화를 파악함으로써 에너지파일의 열교환량을 평가하는 시험이다. 즉, 순환수 항온수조를 통해 에너지파일로 유입되는 유입수 온도(LWT, Leaving Water Temperature)를 30°C(냉방) 또는 8°C(난방)로 유지하면서, 유출수 온도(EWT, Entering Water Temperature)의 변화를 측정하였다. 또한, 실제 상업용 건물의 냉난방 운전에 따른 열교환 효율을 평가하기 위해 간헐적 냉난방 부하패턴(일일 8시간 운전~16시간 정지)을 적용하였다. 실시간 입출구 온도, 유량, 외기 온도 등을 데이터로거를 통해 수집하였으며, 시험장비 모식도는 Fig. 5에 나타났다. 열교환량은 에너지파일의 근입 깊이와 열교환 파이프의 길이로 정규화하여, 에너지파일 단위 길이 당 열교환 성능(W/m) 또는 열교환 파이프 단위 길이 당 열교환 성능(W/m)으로 표현하였다.



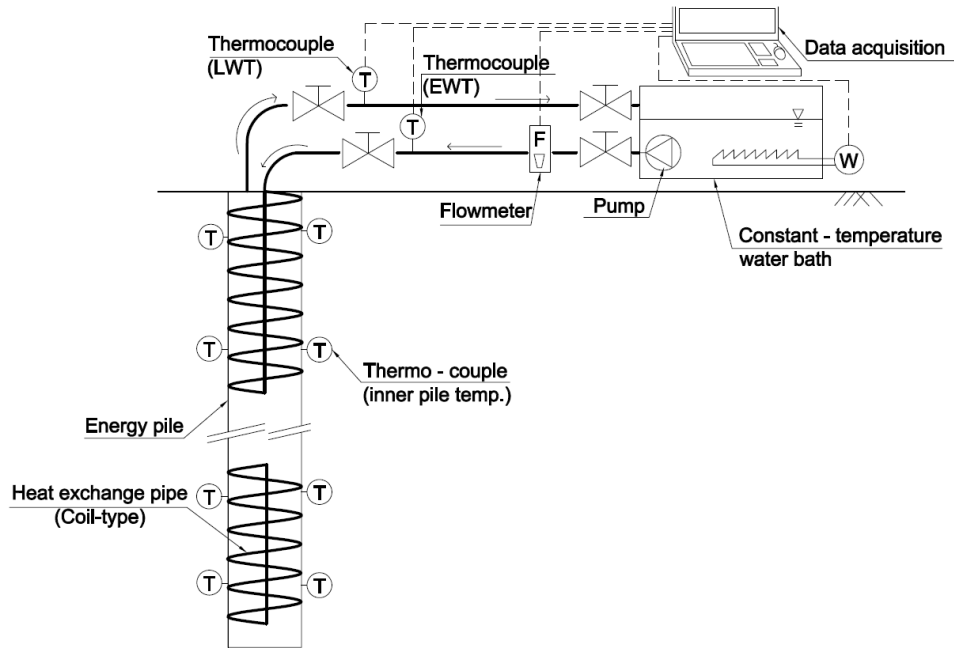


Fig. 5. Experimental Setup for Thermal Performance Test

에너지파일의 열교환량( $Q$ )은 유입수 온도 ( $LWT$ )와 유출수 온도( $EWT$ )의 차와 순환유체의 질량유속( $\dot{m}$ ), 비열( $c_p$ )의 곱으로 Eq. (5)와 같이 표현된다.

$$Q = c_p \times \dot{m} \times (LWT - EWT) \quad (5)$$

#### 4.2 시험 결과

냉방 열교환 성능 평가시험은 각 에너지파일에서 1주일간 수행 되었으며, 각 열교환 파이프 형태별 시험 결과는 Figs. 6-8에 나타났다. 시험 결과는 시간에 따른 유량 및 입출구 온도 변화와 에너지파일의 열교환량을 시간에 대해 나타냈다.

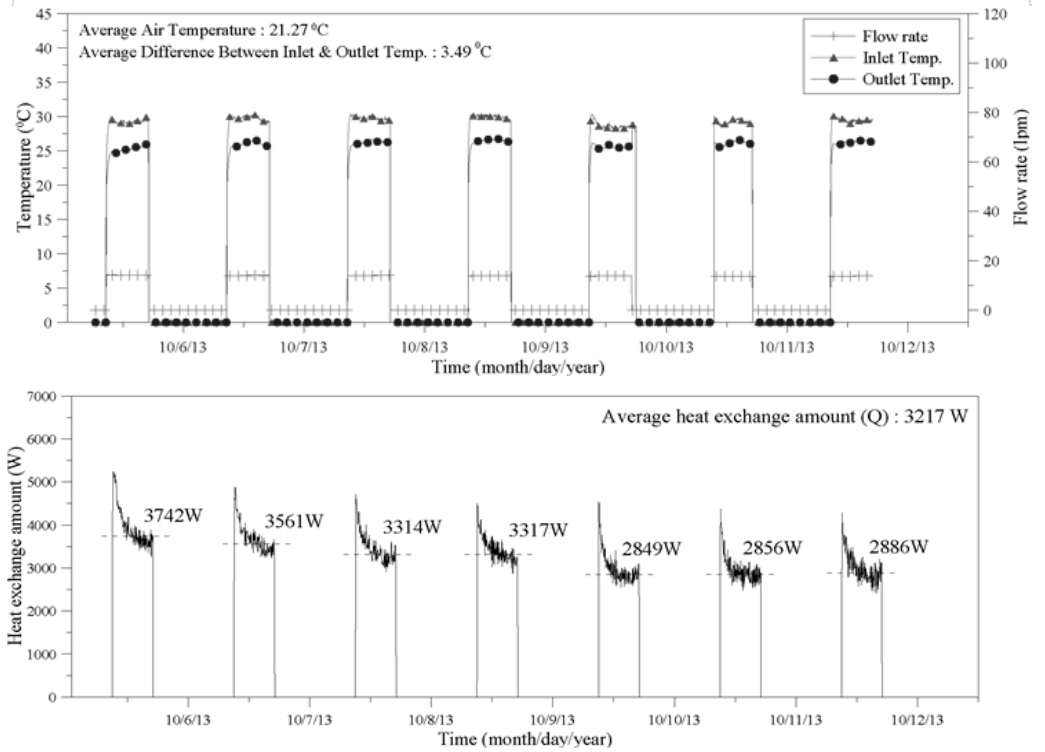
상기의 시험 결과를 바탕으로 1주일간 평균 열교환량과 에너지 파일 단위 길이 당 열교환 성능, 그리고 열교환 파이프 단위 길이 당 열교환 성능을 Table 6에 나타냈다. 에너지파일 단위 길이 당 열교환 성능( $Q_{pile}$ )과 열교환 파이프 단위 길이 당 열교환 성능( $Q_{pipe}$ )은 병렬 U형 5쌍 형태의 열교환 성능을 기준으로 비율을 산정하여 비교하였다.

열교환 성능 평가 결과, 전반적으로 난방 가동의 열교환 성능이 냉방 가동 시 보다 낮게 산정되었다. 이는 실험 조건인 운전 온도와 지반의 온도 차이가 다르기 때문이다. 즉, 냉난방 열교환 성능 평가시험 중 지반의 온도는 약 16°C로 측정되어, 운전 온도와 지반의 평균 온도 차이는 난방 가동시에는 약 8°C로, 냉방 가동시에는 약 14°C로 산정되었다. 일반적으로 에너지파일의 복합매질(유

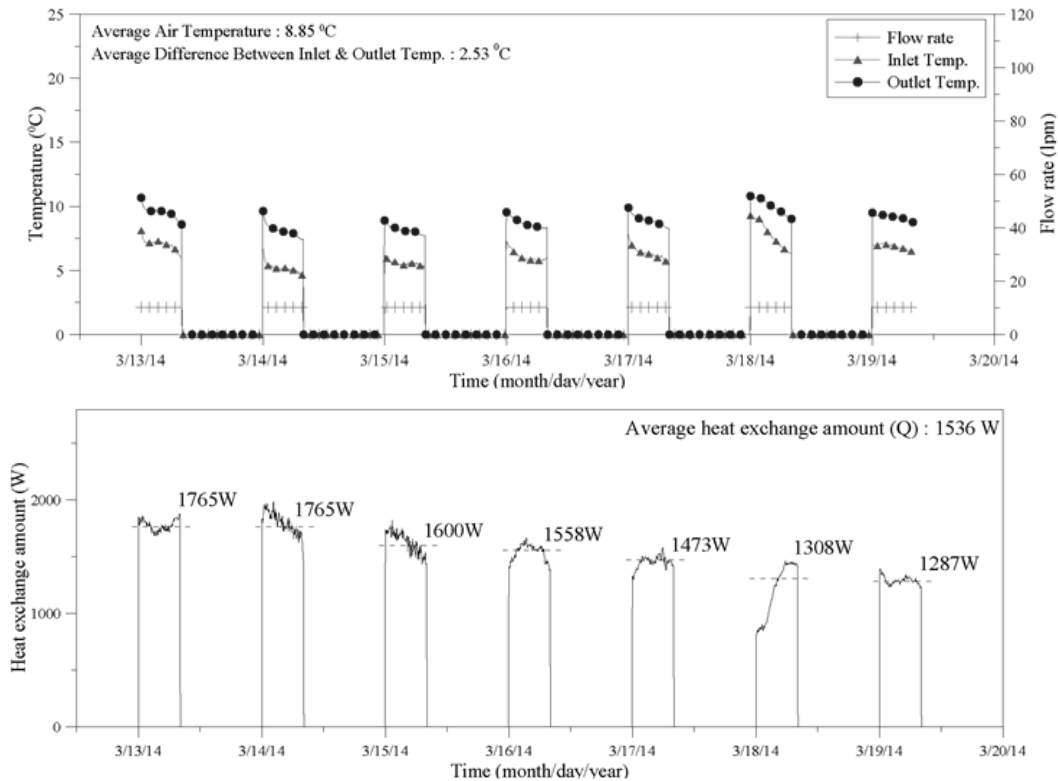
체, 파이프, 그라우트 등)과 지반과의 열교환은 전도에 의해 발생하는데, 전도에 의해 단위시간에 전달되는 열량(J/s)은 두 면의 온도와 면적에 비례한다. 따라서 가동 시에 운전온도와 지반의 온도 차가 큰 냉방 가동 시험에서 열교환 성능이 더 높게 평가된 것이다.

열교환 파이프의 형상에 따른 영향은 에너지파일 내부에 삽입되는 열교환 파이프의 길이가 길수록 에너지파일과 지반과의 열교환을 통해 획득하는 열량이 커지는 현상을 보였다. 단, 현장 열응답 시험을 통해 산정된 상대 열교환 효율과 유사하게 에너지파일 근입 깊이가 당 열교환 성능( $Q_{pile}$ )은 에너지파일 내부에 삽입된 열교환 파이프 길이가 160%, 200%로 증가하는데 비해서  $Q_{pile}$ 은 115%, 121%로 증가하였다. 즉,  $Q_{pile}$ 이 삽입된 열교환 파이프의 길이와 비례하여 증가하지 않았다. 이는 전술한 바와 같이 에너지파일 내부에 삽입되는 열교환 파이프의 총 길이가 길어질수록 인접 파이프 루프 간 피치간격이 작아지고 집적도가 높아져 열교환 파이프 사이에 열간섭이 발생하고, 이로 인하여 지반과 에너지파일 사이의 열교환 효율이 저하되기 때문이다. 또한,  $Q_{pipe}$ 가 병렬 U형 5쌍에서 가장 크게 산정된 것도 열교환 파이프의 집적도와 높은 에너지파일에서 큰 열간섭이 발생함을 보여준다. 이는 에너지 파일 설계 시 삽입되는 열교환 파이프의 길이 및 형태 이외에도 발생 가능한 열간섭과 열교환 효율 저하를 고려해야 하며, 따라서 목표로 하는 설계 부하량 외에도 시공성 및 비용 측면에서의 경제성을 모두 만족시킬 수 있는 적정 길이의 지중열교환기 설계가 매우 중요하다는 것을 시사한다.

병렬 U형 현장타설 에너지파일의 열교환 효율 및 적용성 평가

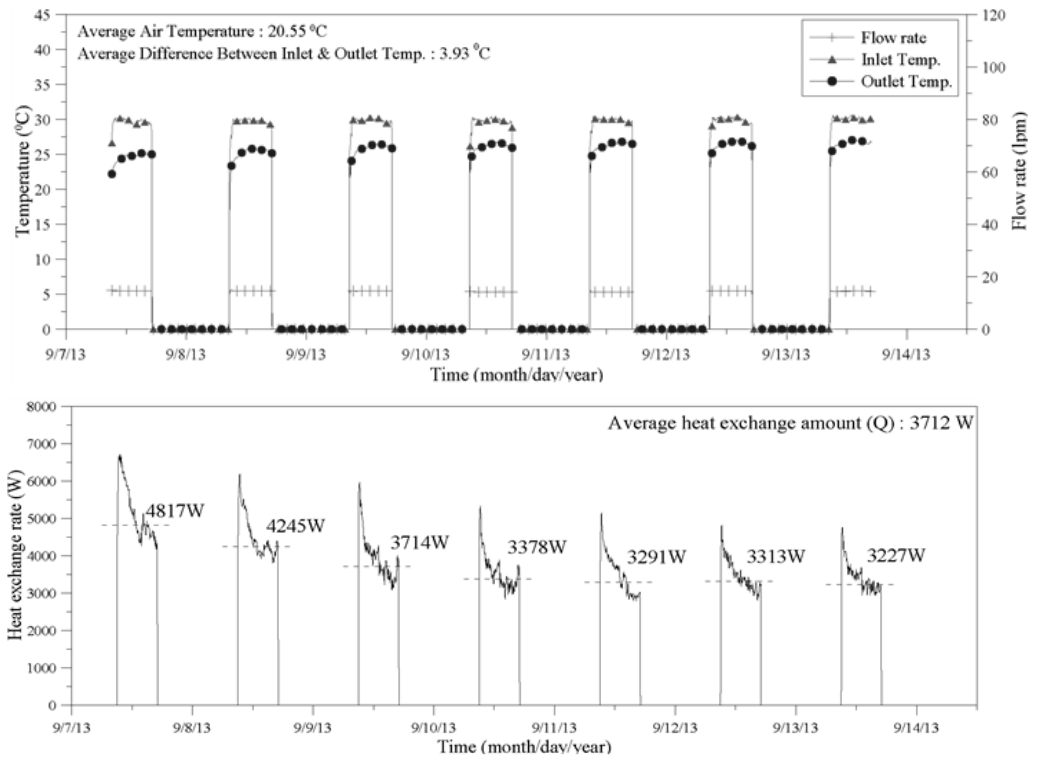


(a) Cooling Operation (1 week)

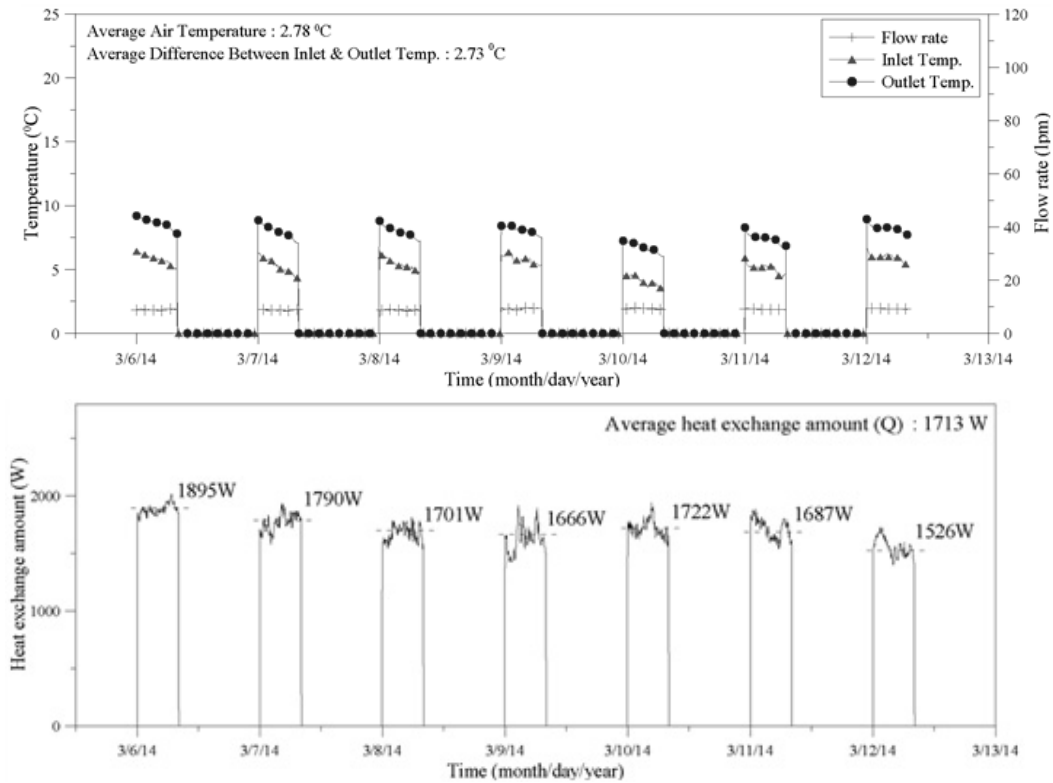


(b) Heating Operation (1 week)

Fig. 6. Results of the Thermal Performance Test for 5 Pairs U-Type



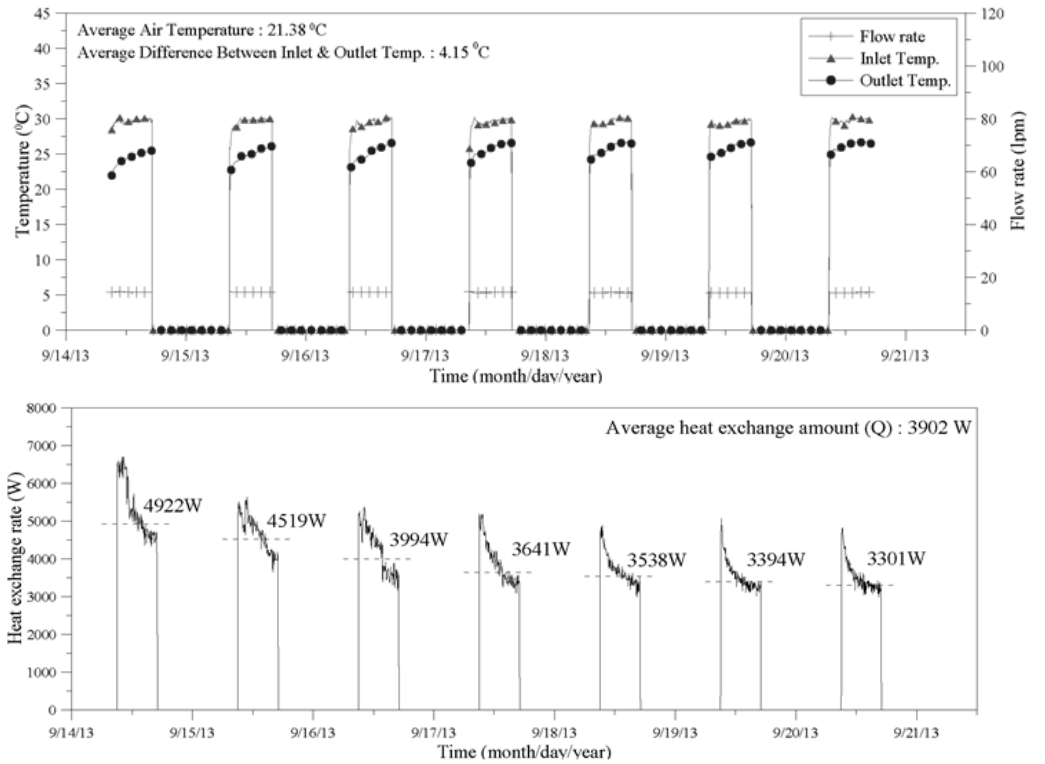
(a) Cooling Operation (1 week)



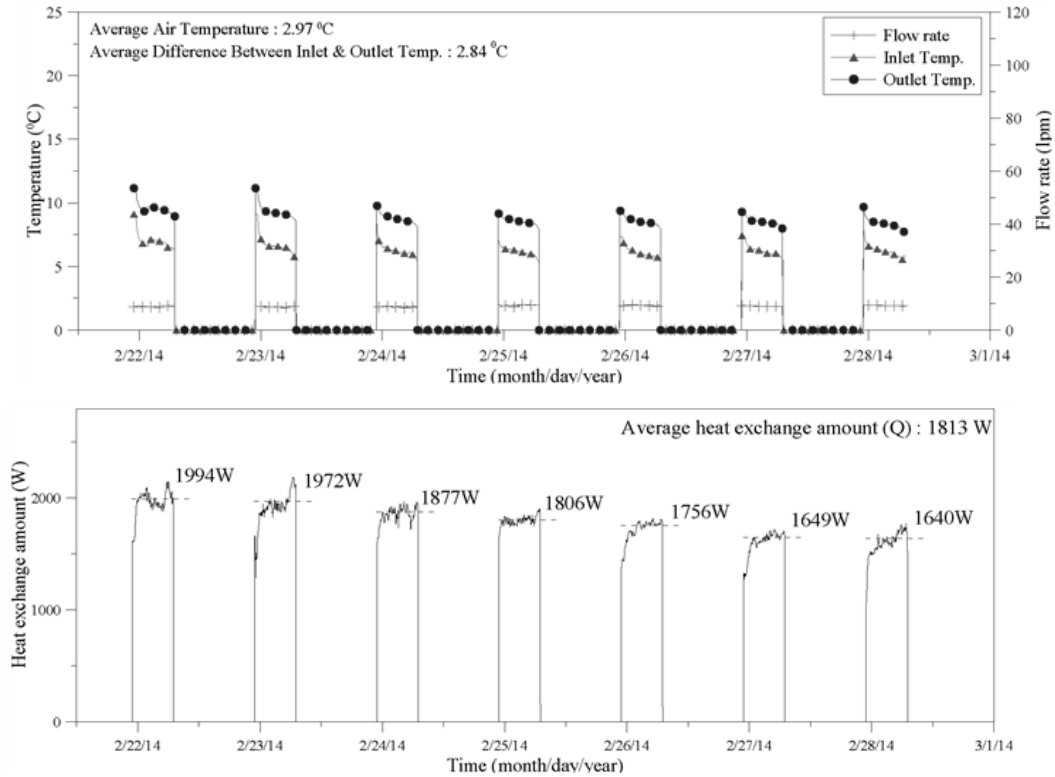
(b) Heating Operation (1 week)

Fig. 7. Results of the Thermal Performance Test for 8 Pairs U-Type

병렬 U형 현장타설 에너지파일의 열교환 효율 및 적용성 평가



(a) Cooling Operation (1 week)

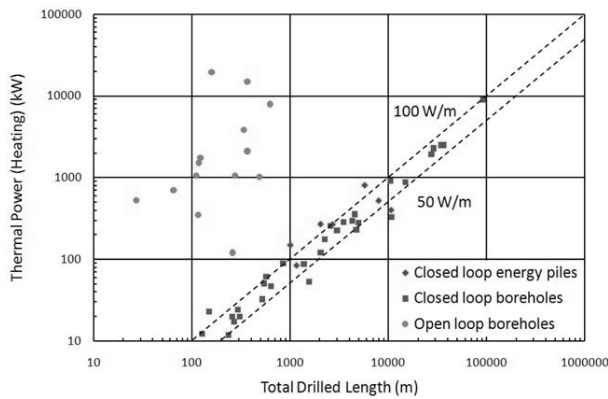


(b) Heating Operation (1 week)

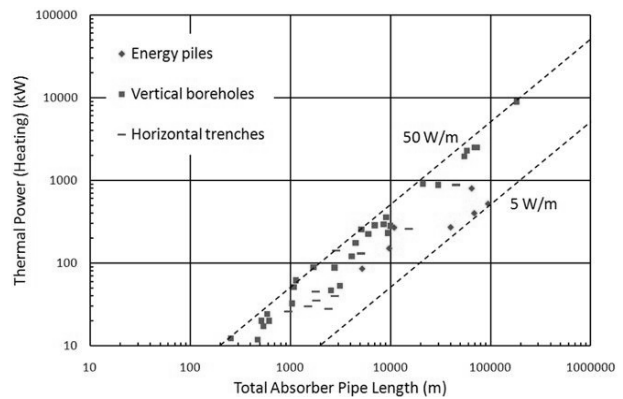
Fig. 8. Results of the Thermal Performance Test for 10 Pairs U-Type

Table 6. Estimation of Heat Exchange Rate Per Pile Length and Pipe Length

Type		Length of pipe		Heat exchange amount	Heat exchange rate per unit pile length		Heat exchange rate per unit pipe length	
		$L$	Ratio	$Q$ (W)	$Q_{pile}$ (W/m)	Ratio	$Q_{pipe}$ (W/m)	Ratio
U-type 5 pairs	Cooling	130m	1.00	3217	229.79	1.00	24.75	1.00
	Heating			1536	109.73	1.00	11.82	1.00
U-type 8 pairs	Cooling	208m	1.6	3712	265.14	1.15	17.85	0.72
	Heating			1713	122.32	1.12	8.23	0.70
U-type 10 pairs	Cooling	260m	2.00	3902	278.71	1.21	15.00	0.61
	Heating			1813	129.54	1.18	6.98	0.59

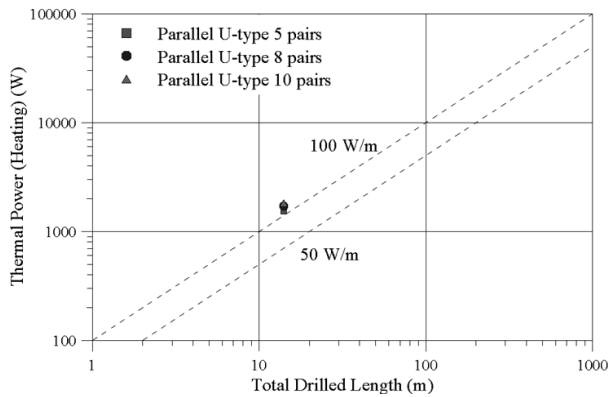


(a) Heat Exchange Rate Per Borehole Depth

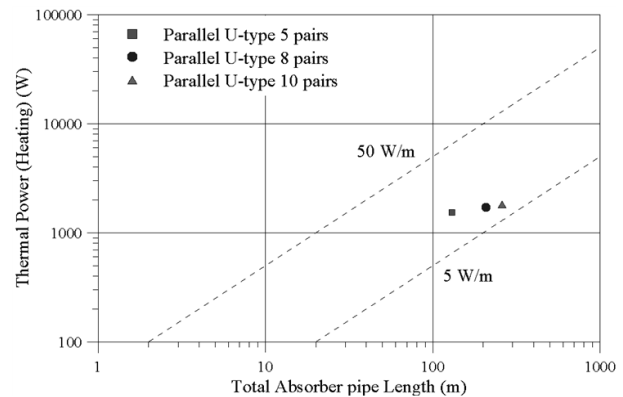


(b) Heat Exchange Rate Per Pipe Length

Fig. 9. Heat Exchange Rate for Drilled Depth and Pipe Length of Various GHEX (Johnston et al., 2011)



(a) Heat Exchange Rate Per Borehole Depth



(b) Heat Exchange Rate Per Pipe Length

Fig. 10. Heat Exchange Rate for Parallel U-Type Cast-In-Place Energy Pile

### 4.3 현장타설 에너지파일의 적용성 평가

냉난방 열교환 성능 평가시험을 통해 산정된 현장타설 에너지파일의 열교환 성능을 기존 연구를 통해 산정된 다양한 형태의 지중열교환기 열교환 성능과 비교하여, 본 논문에서 시공된 현장타설 에너지파일의 적용성을 평가하였다. Fig. 9는 Johnston et al. (2011)이 기존 연구결과를 바탕으로 난방 시에 평가된 수직밀폐형 지중열교환기, 개방형 지중열교환기, 수평형 지중열교환기, 그리고

에너지파일에 대한 근입 깊이가 당 열교환 성능과 열교환 파이프 길이가 당 열교환 성능을 정리하여 표로 나타낸 것이다. 에너지파일에는 PHC 에너지파일과 현장타설 에너지파일이 포함되었다.

Johnston et al. (2011)이 제시한 다양한 지중열교환기 형상에 대한 열교환 성능은 근입 깊이에 따라서는 50 W/m에서 100 W/m의 범위를 보이고, 삽입된 열교환 파이프 길이에 따라서는 5 W/m에서 50 W/m의 범위를 보였다. 단, Fig. 9에서 에너지파일의 경우

열교환 파이프 길이 당 열교환 성능은 대략 5 W/m 근처로, 수직밀폐형 지중열교환기에 비해 비교적 낮은 값을 보였다.

본 연구에서 시험 시공된 현장타설 에너지파일의 난방 가동 시 근입 깊이 당 열교환 성능은 최대 129.54 W/m에서 최소 109.73 W/m의 값이 산정되었으며, 열교환 파이프 길이 당 열교환 성능은 최대 11.82 W/m에서 최소 6.98W/m의 값이 산정되었다. 열교환 성능 평가 결과는 Fig. 10에 나타났다. 열교환 파이프 길이 당 열교환 성능은 Johnston et al. (2011)이 제시한 일반적인 범위 내에 해당하며, 근입 깊이 당 열교환 성능은 Johnston et al. (2011)이 제시한 최대 범위(100 W/m)보다 큰 값이 산정되었다. 즉, 본 연구에서 시공된 병렬 U형 5쌍, 8쌍, 10쌍의 현장타설 에너지파일은 기존 지중열교환기인 수직밀폐형, 개방형, 수평형 지중열교환기보다 더 높은 열교환 성능을 보유한 것으로 평가되었으며, 이는 본 연구에서 시공된 현장타설 에너지파일은 다른 지중열교환기에 비해 약 10배 이상의 큰 직경을 가지는 대구경 현장타설말뚝을 활용, 열교환 파이프를 최대한 많이 삽입하여 열교환 면적을 증가시켰기 때문이다. 현재까지 국내외 대부분의 에너지파일은 상대적으로 작은 직경을 가지는 PHC 말뚝, 강관 말뚝 등의 기성 말뚝을 활용하여 시공된 사례가 많으며, 특히 국내의 경우에는 에너지파일의 연구 및 보급이 기성 말뚝에 치중해 있다는 점을 비추어 볼 때, 본 연구에서 제시한 현장타설 에너지파일의 큰 직경을 활용하는 기술은 향후 에너지파일 성능 향상 및 보급에 긍정적인 영향을 줄 것으로 기대된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 에너지파일의 성능 향상을 위하여 에너지파일 내부에 삽입되는 열교환 파이프의 형상 및 길이에 초점을 맞추고 대구경 현장타설말뚝의 큰 용적을 활용하는 방법을 제시하였으며, 병렬 U형 5쌍, 8쌍, 10쌍을 갖는 총 3분의 현장타설 에너지파일을 시공하였다. 시공된 현장타설 에너지파일에 대해서는 현장 열응답 시험을 수행하여 열교환 파이프의 길이에 따른 상대 열교환 효율을 평가하였다. 또한, 건물의 실제 냉난방 운용시, 현장타설 에너지파일의 열교환량을 평가하기 위하여 냉난방 열교환 성능 평가시험을 수행하였으며, 시험 결과를 통해 열교환 성능을 평가하였다. 마지막으로 다양한 형태의 지중열교환기의 상대 열교환 효율 및 열교환 성능의 비교를 통하여 현장타설 에너지파일의 적용성을 평가하였으며, 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 현장에 시험시공된 병렬 U형 현장타설 에너지파일과 수직밀폐형 지중열교환기에 대한 현장 열응답 시험을 수행하고 선형 열원 모델을 적용하여 지반의 유효 열전도도를 예측하였다. 수직밀폐형 지중열교환기와 달리 병렬 U형 현장타설 에너지파일에 대한 현장 열응답 시험 결과로부터는 합리적인 지반의

- 유효 열전도도를 예측할 수 없었다. 즉, 보어홀의 직경 대비 근입 깊이가 짧고 파이프, 그라우트 등의 열원의 매질 용적이 큰 에너지파일에 대해서는 선형 열원 모델을 적용할 수 없었다.
- (2) 현장타설 에너지파일의 형태별 열교환 효율을 비교하면, 병렬 U형 8쌍과 10쌍이 삽입된 현장타설 에너지파일은 철근망의 내부와 외부 모두 사용하여 열교환 파이프를 시공하였기 때문에, 철근망 외부만을 사용한 병렬 U형 5쌍보다 열간섭이 많이 발생하였으며, 이로 인하여 열교환 파이프 길이 당 상대 열교환 효율은 작게 평가 되었다.
- (3) 수직밀폐형 지중열교환기는 인접 파이프 간 열간섭이 적게 발생하여 열교환 파이프 길이 당 효율은 에너지파일에 비하여 높은 값을 가졌으나, 보어홀 근입 깊이가 당 삽입 가능한 열교환 파이프의 용적은 현장타설 에너지파일이 더 크기 때문에 전체 보어홀에서 얻을 수 있는 전체 부하는 현장타설 에너지파일이 더 큰 값을 가졌다.
- (4) 현장타설 에너지파일에 대한 실제 건물의 냉난방 운용을 모사하기 위해 냉난방 열교환 성능 평가시험을 수행하였다. 시험 결과, 열교환 파이프 길이 당 열교환 성능은 기존 문헌에서 제시한 지중열교환기의 일반적인 범위 내에 포함되며, 근입 깊이가 당 열교환 성능은 문헌에서 제시한 최대 범위(100 W/m)보다 다소 크게 평가되었다.
- (5) 일련의 현장 시험 결과, 수직밀폐형 지중열교환기와 비교하여 짧은 근입 깊이로 인한 에너지파일의 열교환 성능감소는 약 10배 이상의 큰 직경을 활용, 더 긴 길이의 열교환 파이프를 설치하여 열교환 면적을 증가시키는 방법으로 보완할 수 있다는 결론이다.

## 감사의 글

본 연구는 지식경제부 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No. 20113030110010과 No. 2013T10020057)으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## References

- Bourne-Webb, P. J., Amatya, B., Soga, K., Amis, T., Davidson, C. and Payne, P. (2009). "Energy pile test at Lambeth College, London: Geotechnical and Thermodynamic Aspects of Pile Response to Heat Cycles." *Geotechniques*, Vol. 59, No. 3, pp. 237-248.
- Brandl, H. (2006). "Energy foundation and other thermo-active ground structures." *Geotechniques*, Vol. 56, No. 2, pp. 81-122.
- Carslaw, S. H. and Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of Heat in Solids*, Second Ed., Clarendon Press, Oxford.
- 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, No. 11, pp. 4113-4119.
- Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, K. and Yang, J. (2008). “Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles.” *Applied Energy*, Vol. 85, pp. 901-910.
- Hamada, Y., Saitoh, H., Nakamura, M., Kubota, H. and Ochifuji, K. (2007). “Field performance of an energy pile system for space heating.” *Energy and Building*, Vol. 39, pp. 517-524.
- Ingersoll, L. R., Zobel, O. J. and Ingersoll, A. C. (1954). *Heat conduction with engineering, geological and other application*, McGraw-Hill, New York.
- Jalaluddin, Akio Miyara, Koutaro Tsubaki, Shuntaro Inoue and Kentaro Yoshida (2011). “Experimental study of several types of ground heat exchanger using a steel pile foundation.” *Renewable Energy*, Vol. 36, No. 2, pp. 764-771.
- Johnston, I. W., Narsillio, G. A. and Colls, S. (2011). “Emerging geothermal energy technologies.” *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 643-653.
- Jun, L., Zhang, X., Gao, J. and Yang, J. (2009). “Evaluation of heat exchange rate of GHW in geothermal heat pump system.” *Renewable Energy*, Vol. 34, pp. 2898-2904.
- Laloui, L., Moreni, M. and Vulliet, L. (2003). “Behavior of a dual-purpose pile as foundation and heat exchanger.” *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40, No. 2, pp. 388-402.
- 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.
- Lee, C., Park, M., Park, S., Won, J. and Choi, H. (2013). “Back-analyses of in-situ thermal response test (TRT) for evaluating ground thermal conductivity.” *International Journal of Energy Research*, Vol. 37, No. 11, pp. 1397-1404.
- Lee, C., Park, S., Won, J., Jeoung, J., Sohn, B. and Choi, H. (2012). “Evaluation of thermal performance of energy textile installed in tunnel.” *Renewable Energy*, Vol. 42, pp. 11-22.
- Lee, S. J., Min, H. S., Song, J. Y. and Jeong, S. S. (2010). “Thermal influential factors of energy pile.” *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 30, No. 6C, pp. 231-239.
- Li, X., Chen, Y., Chen, Z. and Zhao, J. (2006). “Thermal performances of different types of underground heat exchangers.” *Energy and Building*, Vol. 38, pp. 543-547.
- Man, L., Yang, H., Diao, N., Liu, J. and Fang, J. (2010). “A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchangers.” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 2593-2061.
- Markiewicz, R. (2004). *Umerische und experimentelle Untersuchungen zur Nutzung von geothermischer Energie mittels erdberührter Bauteile und Neuentwicklungen für den Tunnelbau*, Ph.D. Thesis, Technical Univ. of Vienna (in Austrian).
- Mogensen, P. (1983). “Fluid to duct wall heat transfer in duct system storages.” *Proceedings of the International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice*, Swedish Council for Building Research, June 6-8.
- Monique de Moel, P. M., Bach, A. B., Rao, M. S., JingLiang, O. S. (2010). “Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 9, pp. 2683-2696.
- Morino, K. and Oka, T. (1994). “Study on heat exchanged in soil by circulating water in a steel pile.” *Energy and Buildings*, Vol. 21, No. 1, pp. 65-78.
- Nagano, K. (2007). “Energy pile system in new building of sapporo city university.” *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption*, Vol. 234, pp. 245-253
- Nam, Y., Hwang, S. and Ooka, R. (2007). “Geothermal heat pump system using foundation pile structures.” *Journal of Korea Society of Geothermal Energy Engineers*, Vol. 3, No. 1, pp. 51-60.
- Pahud, D. and Hubuck, M. (2007). “Measured thermal performances of the energy pile system of the duck midfield as Zurick airport.” *Proceedings European Geothermal Congress 2007; Unterhaching, Germany*, 30 May-1 June.
- Park, M., Lee, C., Park, S., Sohn, B. and Choi, H. (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.
- 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.
- Park, Y. B., Park, J. B. and Lim, H. S. (2007). “Construction method of ground heat exchanger using energy pile in ground source heat system.” *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 55, No. 7, pp. 41-46.
- Salomone, L. A. and Marlowe, J. I. (1989). *Soil and rock classification according to thermal conductivity : Design of Ground-coupled Heat Pump Systems : Final Report*, Electric Power Research Inst. (EPRI), EPRI-CU-6482.
- Sekine, K., Shiba, Y., Ooka, R., Hwang, S. H. and Yokoi, M. (2007). “Development of a ground-source heat pump system with ground heat exchanger utilizing the cast-in-place concrete pile foundations of buildings.” *ASHRAE Transactions*, pp. 558-566.
- Sharqawy, M. H., Mokheimer, E. M., Habib, M. A., Badr, H. M., Said, N. A. and Al-Shayea, S. A. (2009). “Energy, energy and uncertainty analyses of the thermal response test for a ground heat exchanger.” *International Journal of Energy Research*, Vol. 33, pp. 582-592.
- Wagner, R. and Clauser, C. (2005). “Evaluating thermal response tests using parameter estimation for thermal conductivity and thermal capacity.” *Journal of Geophysics and Engineering*, Vol. 2, pp. 349-356.
- Wood, C. J., Liu, H. and Riffat, S. B. (2009). “Use of energy piles in a residential building, and effects on ground temperature and heat pump efficiency.” *Geotechniques*, Vol. 59, No. 3, pp. 287-290.
- Yu, H. K. (2008). “Development and performance evaluation of ground heat exchanger utilizing PHC pile foundation of building.” *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 28, No. 5, pp. 56-64.