

## 밀폐형과 개방형이 결합된 복합지열시스템의 지중열교환기 성능 분석

박영윤<sup>1</sup> · 송재용<sup>2\*</sup> · 이근춘<sup>2</sup> · 김기준<sup>2</sup> · 목종구<sup>3</sup> · 박유철<sup>1</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 지질지구물리학과

<sup>2</sup>(주)산하이앤씨

<sup>3</sup>(주)지오쓰리에코

## Performance Analysis of Ground Heat Exchanger in Combined Well and Open-Closed Loops Geothermal (CWG) System

Youngyun Park<sup>1</sup> · Jae-Yong Song<sup>2\*</sup> · Geun-Chun Lee<sup>2</sup> · Ki-Joon Kim<sup>2</sup>

Jong-Koo Mok<sup>3</sup> · Yu-Chul Park<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Geology and Geophysics, Kangwon National University

<sup>2</sup>SanHa E&C Co., Ltd.

<sup>3</sup>Geo3eco Co., Ltd.

### ABSTRACT

This study was conducted to evaluate performance of geothermal heat exchanger (GHE) in the combined well and open-closed loops geothermal (CWG) systems. The CWG systems were designed to combine open loop geothermal heat pumps and closed loop geothermal heat pumps for high energy efficiency. GHE of the CWG systems could be installed at pumping wells for agricultural usage. To get optimal heat exchange capacity of GHE of the CWG systems, 4 GHEs with various materials and apertures were tested at laboratory scale. Polyethylene (PE) and stainless steel (STS) were selected as GHE materials. The maximum heat exchange capacity of GHEs were estimated to be in the range of 33.0~104 kcal/min. The heat exchange capacity of STS GHEs was 2.4~3.2 times higher than that of PE GHE. The optimal cross section area of GHE and flow rate of circulating water of GHE were estimated to be 2,500 mm<sup>2</sup> and 113 L/min, respectively. For more complicated GHE of the CWG systems, it is necessary to evaluate GHEs at various scales.

**Key words :** Combined well and open-closed loop geothermal system, Geothermal heat exchanger, Open loop geothermal heat pump, Closed loop geothermal heat pump, Circulating water

### 1. 서 론

2000년 초부터 국내에 도입된 지열냉난방시스템은 정부 주도의 보급정책으로 인해 사용이 크게 증가되었다(Kwon et al., 2012; Song and Lee, 2015). 2015년까지 국내에 설치된 지열냉난방시스템의 총용량은 약 852 MW이며(NREC, 2016), 최근에 시설농업분야에서 사용하는 사례가 점차 증가하고 있다(Song and Lee, 2015).

국내 시설재배는 1990년대부터 급격히 증가하다가 최근에 증가율이 감소하기는 하였지만 규모가 큰 시설에 적용되는 사례는 증가하고 있다. 국내 시설재배 면적은

1980년에 178.9 km<sup>2</sup>였으나 2015년에는 525.3 km<sup>2</sup>로 약 3배가 증가하였다(KOSIS, 2017). 시설재배의 가온에 사용되는 에너지원은 유류, 가스류, 전기 및 지열 등이 사용된다. 2015년에는 가온에 사용된 전체 에너지원 중에 유류(91.4%)를 가장 많이 사용하였으며 유류에는 경유, 중유, 등유 등이 포함된다(KOSIS, 2017). 최근에 에너지원 중에 지열이 차지하는 비율이 점차 증가하여 2015년에는 전체 에너지원 중에 1.5%였다(KOSIS, 2017). 지열냉난방시스템은 화석연료를 사용하는 냉난방시스템에 비해서 초기 설치비용이 많이 들기는 하지만 유지비가 14원/Mcal로 경유(113원/Mcal), 중유(72원/Mcal), 등유(116원/Mcal)에 비

\*Corresponding author : sjy1010@hanmail.net

Received : 2017. 7. 18 Reviewed : 2017. 9. 22 Accepted : 2017. 10. 23

Discussion until : 2017. 12. 31

해서 현저히 적게 들기 때문에 빠르게 보급되고 있다 (Jeong et al., 2010). 지열 냉난방시스템 설치로 인해 냉난방비의 절감뿐만 아니라 작업환경의 개선으로 일의 효율도 증가하는 사례가 보고되고 있으며 특히 파프리카와 화훼 같은 작물에 집중적으로 이용되고 있다.

그러나 수리지질학적 특성을 고려하지 않고 지열냉난방시스템을 설치하는 경우에 지하수 오염, 지중열축적, 지하수 고갈, 지반침하 등의 환경문제가 발생할 가능성이 있으며 (Jo et al., 2009; Park et al., 2015), 이러한 우려로 인해 지열냉난방시스템의 사용에 제약을 받기도 한다. 이러한 우려를 종식시키고 다양한 환경문제들을 해결하기 위해 설계, 시공 및 운영 등 관련 분야의 연구개발이 꾸준히 이루어지고 있다. 최근에는 지열공에 대한 에너지 효율을 높이기 위한 연구들도 활발하게 이루어지고 있으며 이를 위해 지중열교환기의 개발뿐만 아니라 수리지질학적 특성을 활용하는 사례도 점차 증가하고 있다 (Chang et al., 2010; Bae et al., 2017). 이번 연구는 고효율의 지열시스템을 개발하기 위한 기초연구로, 개방형과 밀폐형이 결합된 복합지열시스템의 지중열교환기 재질과 규격에 따른 열교환효율과 지중열교환기 내 단위 단면적당 최적의 순환수량을 비교 및 분석하기 위해 수행하였다.

## 2. 복합지열시스템 개요

국내에 설치된 지열냉난방시스템은 열교환 유체를 순환시키는 방식에 따라 밀폐형과 개방형으로 구분된다. 밀폐형은 밀폐된 배관에 유체를 순환시키는 방식이며 개방형은 지하수 또는 지표수를 직접 열교환유체로 사용하는 방식이다. 개방형에서 동일한 지열공에서 양수와 환수를 병행하는 스탠딩 컬럼 웰(standing column well) 방식이 있다. 이 연구에서 제안한 복합지열시스템은 개방형의 단일 지열공(one well type) 내부에 밀폐형 방식의 지중열교환기를 결합한 시스템이다 (Fig. 1). 복합지열시스템은 지하수를 많이 사용하는 시설재배에 적합한 시스템으로 관정으로부터 뽑아낸 지하수는 지상에서 개방형 방식으로 열교환을 한 후 농업용수로 사용할 수 있다. 기존의 밀폐형에서는 지중열교환기의 재질과 주변 매질의 낮은 열전도도로 인해 지열을 활용하는데 제한이 있었지만 복합지열시스템은 지중열교환기의 재질을 이전의 PE(polyethylene)관에서 스테인리스관으로 교체하고 이를 지하수 관정 내부에 설치함으로써 기존의 밀폐형 시스템에 비해서 열교환효율을 크게 증가시킬 수 있다. 또한 지열공 내부의 지하수를 지속적으로 양수함으로써 밀폐형의 열교환기로부터

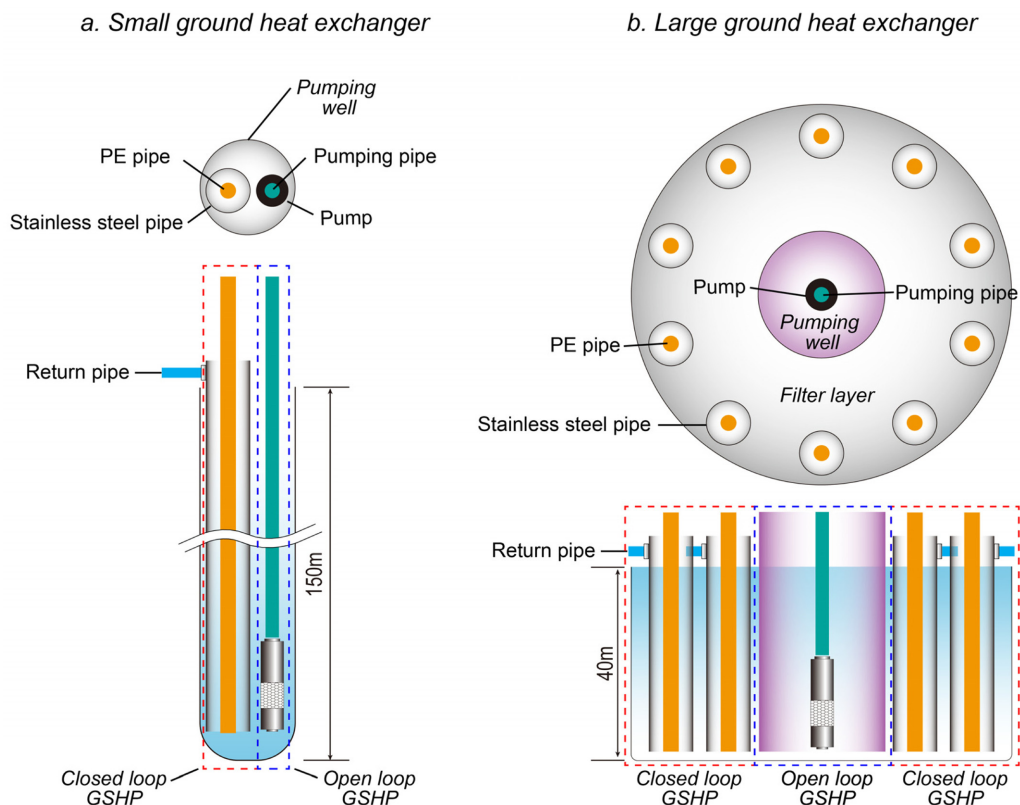
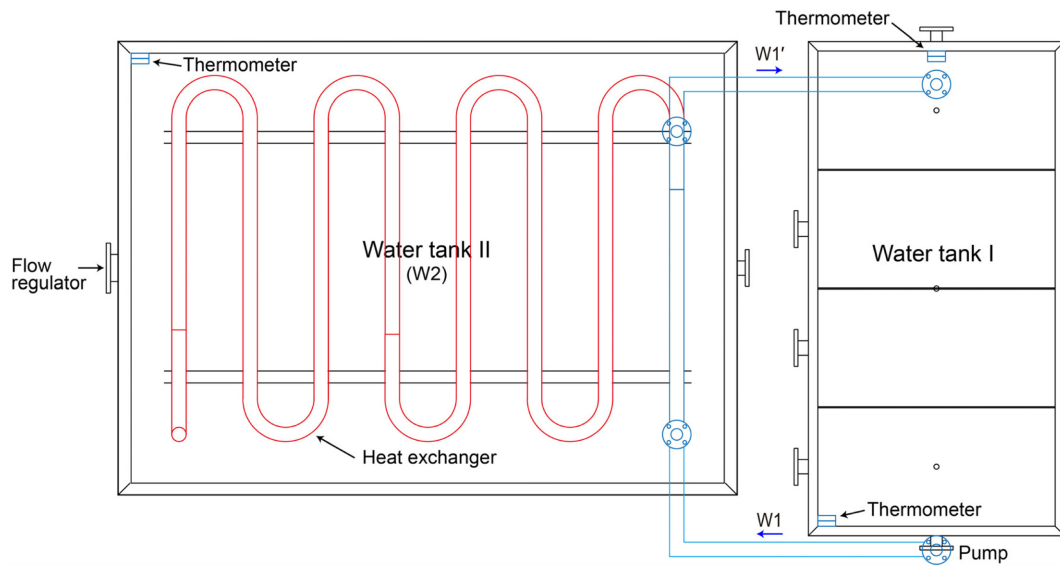


Fig. 1. Schematic diagram showing configuration of complex geothermal heat pump combined with closed and open loop systems.



**Fig. 2.** Schematic diagram showing configuration of equipment to test ground heat exchanger in complex geothermal heat pump.

**Table 1.** Configuration and specification of equipment to test heat exchanger

Configuration	Specification
Water tank I	Size: 2.0 m (L) × 1.0 m (W) × 1.2 m (H)
Water tank II	Size: 2.5 m (L) × 1.8 m (W) × 1.2 m (H)
Pump	Maximum pumping rate: 250 L/min
Flow regulator	Flow range: 6~333 L/min
Thermometer	Range: -200~137°C, Precision: ± 0.0002°C
Heat exchanger	PE pipe (32 mm), Stainless steel pipe (28.6, 42.7, and 60.5 mm)

터 방출된 열이 지중에 머무르지 않고 지상으로 배출되며 이로 인해 지하수의 수온을 일정하게 유지시킬 수 있다. 따라서 기존의 밀폐형에 비해서 에너지 효율이 크게 개선 될 것으로 예측되며 지중에 열이 축적되는 것도 방지할 수 있다.

### 3. 실험방법

복합지열시스템 내 밀폐형 형태의 지중열교환기의 열교환효율을 측정하기 위해서 시험장치를 제작하였다(Fig. 2). 시험장치는 항온수조(water tank I), 열교환기수조(water tank II), 펌프, 유량계(flow regulator), 온도계 및 열교환기로 구성된다(Table 1). 열교환기는 PE관과 스테인리스관으로 각각 제작하였으며 복합지열시스템에 적합한 열교환기 규격 및 순환수량을 산정하기 위해 스테인리스관의 직경이 28.6(ST-20A), 42.7(ST-32A), 60.5(ST-50A) mm 인 열교환기를 제작하였으며 각각의 열교환기에 10, 20, 30, 50, 70 및 100 L/min의 주입량으로 각각 4시간씩 시

험장치를 운영하였다. 이때 주입수의 수온( $W1$ ), 열교환기 수조 내 수온( $W2$ ), 유출수의 수온( $W1'$ )을 매 30초마다 측정하였다. 실험을 하는 동안에  $W1$ 과  $W2$ 의 초기 수온을 각각 26°C와 17°C로 유지하였다.  $W1$ ,  $W2$ ,  $W1'$ 의 온도차를 이용하여 열교환효율( $\Delta H$ )을 식 (1)와 같이 계산하였다.

$$\Delta H = \frac{W1 - W2}{W1 - W1'} \times 100(\%) \quad (1)$$

또한 측정된 수온을 이용하여 열교환기수조에서 교환된 열량( $\Delta Q$ )을 계산하였다.

$$\Delta Q = q \text{ (L/min)} \times c \text{ (kcal/kg)} \times (W1 - W1')_{\text{average}} \text{ (kcal/min)} \quad (2)$$

위의 식에서  $q$ 는 순환수의 유량,  $c$ 는 물의 비열(1 kcal/kg),  $(W1 - W1')_{\text{average}}$ 는 4시간의 시험동안에 주입수와 유출수에서 측정된 수온차의 평균값을 의미한다. 이번 연구에서는 물의 비중이 1 kg/m<sup>3</sup>으로 가정하고 열량을 계산하였다.

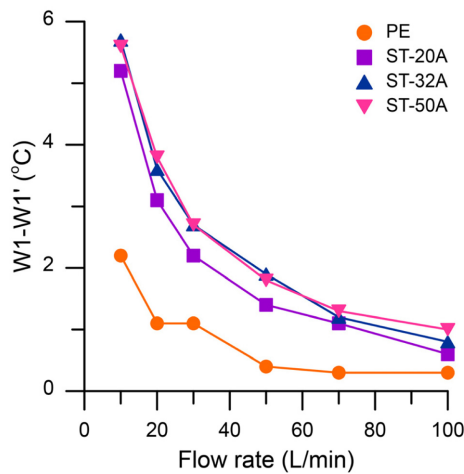


Fig. 3. Variation of water temperature of inflow and outflow with materials of heat exchanger and flow rate. PE and ST represent polyethylene and stainless steel pipes, respectively.

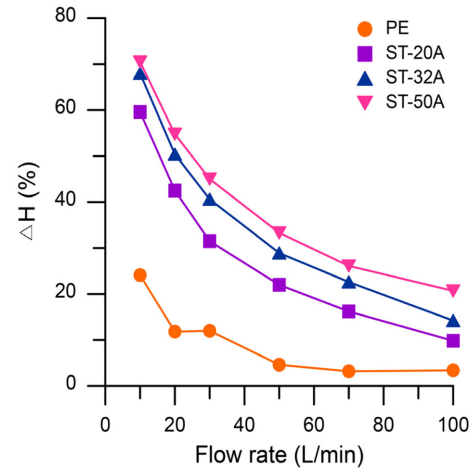


Fig. 4. Rate of heat loss with materials of heat exchanger and flow rate. PE and ST represent polyethylene and stainless steel pipes, respectively.

## 4. 결과 및 토의

### 4.1. 열교환기 재질과 규격에 따른 열교환효율

시험을 하는 동안에 PE, ST-20A, ST-32A, ST-50A에서  $W1$ 과  $W1'$ 에서 수온차이는 각각 0.3~2.2, 0.6~5.2, 0.4~5.7, 0.7~5.6°C의 범위를 보였으며 스테인리스관은 PE관에 비해서 수온변화가 뚜렷하게 나타났으며 스테인리스관의 규격에 상관없이 동일한 순환수의 유량에서는 거의 0.5°C 범위 이내에서 차이를 보였다(Fig. 3).

지중열교환기에서 측정된 수온차이를 이용하여 각 지중열교환기의  $\Delta H$ 를 계산하였다. PE, ST-20A, ST-32A, ST-50A에서  $\Delta H$ 는 각각 3.2~24.1, 9.8~59.6, 14.2~68, 20.7~70.5%의 범위를 보였다. 스테인리스관과 PE관의 열전도도(heat conductivity)는 각각 16 W/mk와 0.33~0.50 W/mk로 스테인리스관의 열전도도가 PE관보다 32~48배 더 크기 때문에(ETB, 2017), 스테인리스관의  $\Delta H$ 가 PE관에 비해서 더 컸다. 또한 모든 지중열교환기에서 순환수의 유량이 증가할수록  $\Delta H$ 는 감소하고 스테인리스관의 규격이 커질수록  $\Delta H$ 가 증가하는 경향을 보였다(Fig. 4).  $\Delta H$ 의 감소는 동일한 단면적에서 단위시간에 따른 유량을 증가시켜 유체의 속도가 증가되는 것이므로 유량이 증가할수록 열교환기수조 내 물과 열을 교환하는 시간이 줄어들었기 때문이며,  $\Delta H$ 의 증가는 규격의 증가는 열교환기수조 내 물과 반응하는 지중열교환기의 면적이 넓어졌다는 것을 의미하여 이로 인해 열교환기수조 내 수온에 더 많은 영향을 주었기 때문이다.

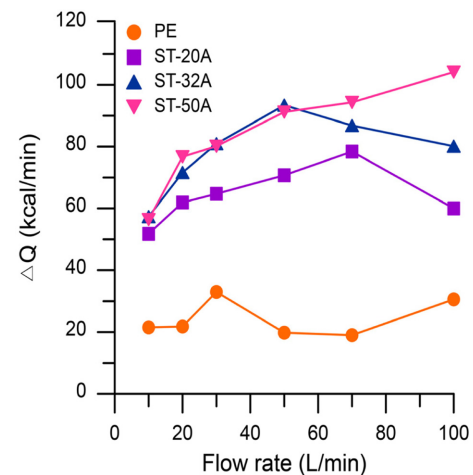


Fig. 5. Heat exchange between inflow( $W1$ ) and outflow( $W1'$ ) with materials of heat exchanger and flow rate. PE and ST represent polyethylene and stainless steel pipes, respectively.

### 4.2. 열교환기 재질과 규격에 따른 열교환량

$\Delta Q$ 는  $\Delta H$ 와 순환수의 유량과 비례관계에 있지만  $\Delta H$ 와 순환수의 유량은 반비례관계에 있다(식 2). 따라서 복합지열시스템 설계 시  $\Delta H$ 와 순환수의 유량을 고려한 최적의  $\Delta Q$ 를 산정하는 것이 매우 중요하다. PE, ST-20A, ST-32A, ST-50A에서  $\Delta Q$ 는 각각 19.0~33.0, 51.8~78.4, 57.3~93.4, 56.4~104 kcal/min의 범위를 보였다(Fig. 5). PE관에 비해서  $\Delta H$ 가 컸던 스테인리스관에서  $\Delta Q$ 가 2배 이상 더 크게 계산되었다. 각각의 스테인리스관에서는 순환수 유량과 열교환량은 뚜렷한 비례관계를 보이지 않았다. ST-20, ST-32A, ST-50A에서  $\Delta Q$ 는 순환수의 유량이 각각 70 L/min(78.7 kcal/min), 50 L/min(93.4 kcal/min), 100 L/min(104 kcal/min)의 범위를 보였다.

min(104 kcal/min)일 때, 최댓값을 보였다.

현재 국내에 설치된 밀폐형에서 지중열교환기 주변의 매질인 그라우팅의 열전도도가 0.77~0.87 W/mk로 매우 낮기 때문에(Sohn and Shin, 2006), 기존의 밀폐형 지중열교환기의 재질을 PE관에서 스테인리스관로 바꾸더라도 열교환효율의 개선을 기대하기는 어려우며 PE관(약 1,300 원/m)에 비해서 스테인레스관(약 8400원/m)의 가격이 약 6배 이상 더 비싸므로 오히려 설치비만 증가하게 된다. 그러나 이번 연구에서 제안하는 복합지열시스템은 지하수 관정 내부에 밀폐형 형태의 지중열교환기를 설치하는 시스템이므로 지중열교환기의 재료를 기존의 PE관보다 열전도도가 더 좋은 스테인리스관으로 교체하는 경우에는 열교환효율이 크게 개선될 것이다. 결과적으로는 이번 실험과 유사한 환경에서 복합지열시스템을 설치 시 밀폐형에 비해서 지열공 수까지도 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

#### 4.3. 주입수와 열교환기수조의 수온 조건에 따른 열에너지 교환량

일반적으로 지열냉난방시스템에서 순환수는 열교환 후 지하로 다시 주입된 순환수의 수온이 주변 지하수의 영향으로 순환수의 수온이 빠르게 열교환 전으로 회복되는 것으로 가정한다. 그러나 지중환경에 따라서 순환수 수온의 회복속도가 다르게 나타날 수 있다. 이번 연구에서는 주입수( $W1$ )과 열교환기수조의 수온( $W2$ )을 수온차이  $\Delta T$  ( $W1 - W2$ )를 이용하여  $\Delta T$ 가 3, 5, 7, 10°C일 경우에 지중열교환기의 재질, 규격 및 순환수 유량에 따른 열에너지 교환량을 평가하였다(Fig. 6).  $\Delta T$ 는 시험초기의  $W1$ 과  $W2$ 의 수온차이를 나타내며 모든 시험에서  $W1$ 은 26°C로 고정하였다.  $\Delta T$ 가 작은 것은 순환수 수온의 회복이 느린 환경을 의미하고 큰 것은 순환수 수온이 빠르게 회복되는 환경을 의미한다. PE관은  $\Delta T$ 가 3, 5, 7, 10°C일 때  $\Delta Q$ 는 각각 6.7~10.8, 11.1~18.0, 15.5~25.2, 22.1~36.1 kcal/min

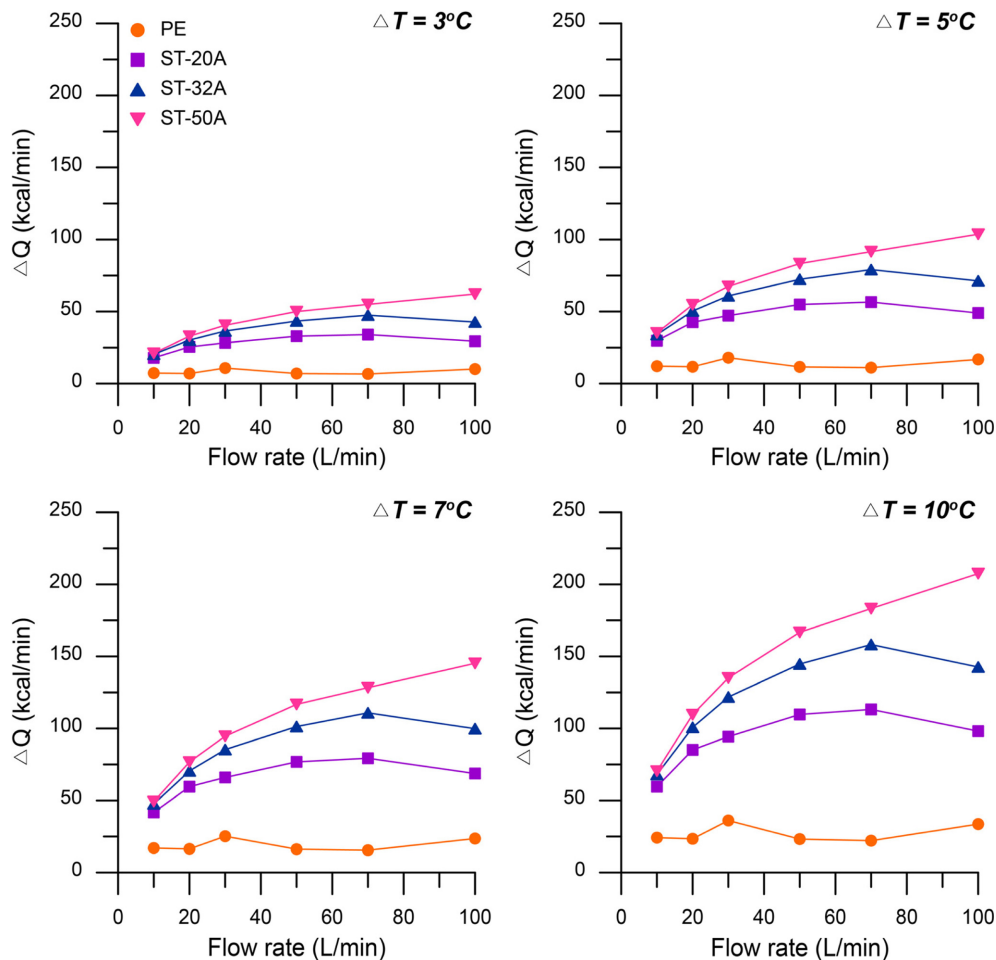


Fig. 6. Heat exchange between inflow ( $W1$ ) and outflow ( $W1'$ ) with materials of heat exchanger and flow rate at  $\Delta T=3, 5, 7$ , and  $10^\circ\text{C}$ . PE and ST represent polyethylene and stainless steel pipse, respectively.



**Table 2.** Relationship between flow rate and kind of stainless steel pipe

Kind	Regression equation	Optimal flow rate (L/min)
20A	$y = -0.008x^2 + 1.073x + 21.83$ ( $R^2=0.976$ )	66.2
32A	$y = -0.007x^2 + 1.160x + 28.27$ ( $R^2=0.925$ )	87.9
50A	$y = -0.006x^2 + 1.406x + 25.76$ ( $R^2=0.983$ )	113

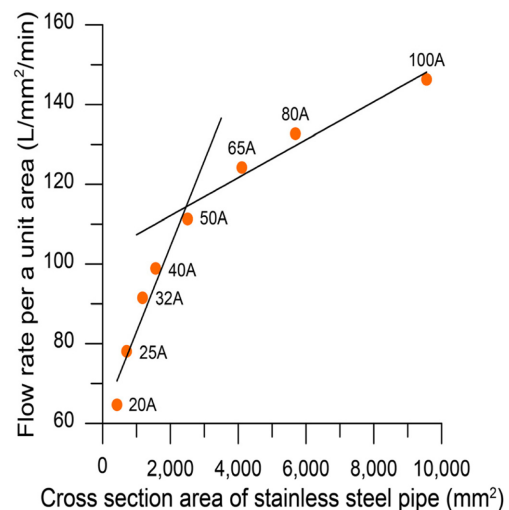
**Table 3.** Specification of commercial stainless steel and flow rate per a unit area calculated from the result of this study

Kind	Diameter (mm)		Cross section area (mm <sup>2</sup> )	Flow rate per a unit area (L/mm <sup>2</sup> /min)
	Outside	Inside		
20A	27.2	23.2	423	64.7
25A	34.0	30.0	707	78.1
32A	42.7	38.7	1,176	91.5
40A	48.6	44.6	1,562	98.9
50A	60.5	56.5	2,507	111
65A	76.3	72.3	4,105	124
80A	89.1	85.1	5,688	133
100A	114.3	110.3	9,555	146

의 범위를 보였다. PE관은 모든 경우에서 순환수의 유량이 30 L/min 일 때 열교환량이 가장 컸으며  $\Delta T$ 가 증가할수록  $\Delta Q$ 는  $y=3.61x-0.06$  ( $R^2=1$ )의 경향성을 가지고 증가하였다. ST-20A는 17.9~34.0, 29.8~56.6, 41.7~79.3, 59.6~113.2 kcal/min, ST-32A는 20.4~47.5, 34.0~79.1, 47.6~111, 68~158 kcal/min, ST-50A에서는 21.1~62.2, 35.2~104, 49.3~145, 70.4~208 kcal/min의 범위를 보였다(Fig. 6). ST-20A, ST-32A, ST-50A는 모든 경우에서 순환수의 유량이 각각 70, 70, 100 L/min일 때 열교환량이 가장 컸다. 스테인리스관에서도  $\Delta T$ 가 증가할수록  $\Delta Q$ 는 크게 증가하였으며 이들은 각각  $y=11.3x+0.04$  ( $R^2=1$ ),  $y=15.8x+0.04$  ( $R^2=1$ ),  $y=20.8x-0.08$  ( $R^2=1$ )의 경향성을 가지고 증가하였으며 스테인리스관의 규격이 커질수록  $\Delta Q$ 의 증가율이 증가하였다. 이러한 결과는 지중열교환기를 지하수와 직접 접하게 설치하는 경우에 지중환경에 상관없이 PE관보다 스테인리스관의 열교환효율이 더 좋으며 스테인리스관의 경우에는 규격이 클수록 열교환효율이 더 좋다는 것을 의미한다. 그러나 복합지열시스템 운영 시 개방형 방식도 같이 사용하기 때문에 에너지부하량에 따라 밀폐형과 개방형 방식의 부하를 적절하게 분배하여 운영하는 것이 중요하며 복합지열시스템 운영 시 수치모델링을 통해 밀폐형과 개방형 방식의 사용 비율을 결정할 예정이다.

#### 4.4. 지중열교환기 최적 단면적 및 단위 단면적당 순환수 유량 산정

스테인리스로 제작된 지중열교환기의 규격의 증가에 따

**Fig. 7.** Estimation of optimal cross section area of stainless steel pipes using optimal pumping rate per unit area.

라서 순환수의 유량이 선형관계로 증가하다가 증가폭이 감소하는 것을 확인하였다(Fig. 5). Fig. 5의 결과로부터 스테인리스관 규격별 회귀방정식과 이로부터 계산된 최적 순환수량을 계산하였다(Table 2). 최적 순환수량은  $y=26.2\ln(x)-93.5$  ( $R^2=0.983$ )의 경향성을 가지고 증가하였다. Table 3에 국내에서 판매되는 스테인리스관의 규격을 정리하였으며 이를 이용하여 각 규격별 스테인리스관의 단면적을 계산하였다. 또한 위의 증가 경향성을 이용하여 계산된 스테인리스관 규격별 최적 순환수 유량을 정리하였다. Fig. 7에서 단면적이 약 2,500 mm<sup>2</sup>(ST-50A)이후부터 기울기가 줄어들어 증가하는 폭이 감소하였다. 이것은 스

테인리스관의 규격을 증가시키는데 소요되는 비용에 비해서 열교환효율이 크게 증가하지 않는다는 것을 의미하므로 복합지열시스템 설치 시 ST-50A로 지중열교환기를 제작하는 것이 비용대비 효과를 최대로 볼 수 있을 것으로 판단되며 이때 단위 단면적당 유량은  $113 \text{ L/m}^2/\text{min}$ 이다. 이번 연구에서 제시한 지중열교환기의 최적 단면적과 순환수 유량은 시스템의 규격 및 형태에 따라 달라질 수 있으므로 향후 복합지열시스템 설계 시 이번 연구에서 제시한 산정방법에 따라 지중열교환기 최적 단면적과 순환수 유량을 산정할 필요가 있다.

## 5. 결 론

이 연구는 지열냉난방시스템에서 지열공의 에너지 효율을 높이기 위해서 개발된 복합지열시스템 내 밀폐형 형태의 지중열교환기의 열교환효율을 평가하기 위해서 수행되었다. 복합지열시스템은 이전의 밀폐형과 개방형을 결합한 형태로 지하수 관정에 밀폐형 지중열교환기를 설치하는 방식이다. 이 연구에서 PE관과 ST-20A, ST-32A, ST-50A에서 최대 열교환량은 각각 33.0, 78.4, 93.4, 104 kcal/min으로 PE관에 비해서 스테인리스관의 열교환량이 2.4~3.2배 더 높은 것으로 평가되었다. 이것은 기존의 밀폐형의 지중열교환기에 비해서 열교환효율이 크게 개선될 수 있다는 것을 나타낸다. 복합지열시스템의 지중열교환기의 최적 단면적은  $2,500 \text{ mm}^2$ 로 산정되었으므로 시중에서 판매되는 ST-50A 규격이 적당하며 이때 순환수의 단위 단면적당 최적 유량은  $113 \text{ L/min}$ 으로 계산되었다. 그러나 실제로 복합지열시스템을 설계할 경우에는 시스템의 규모와 사용하는 용도에 적합하게 이와 같은 설계인자들을 재산정할 필요가 있다.

## 사 사

이 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과

제입니다(No. 20153030111120). 이 논문을 심사하는데 도움을 주신 분들과 논문의 질이 향상될 수 있도록 좋은 의견을 주신 익명의 심사위원께 감사의 마음을 전합니다.

## References

- Bae, S., Kim, H., Kim, H., and Nam, Y., 2017, Hydraulic feasibility study on the open-loop geothermal system using a pairing technology, *KIEAE J.*, **17**, 119-124.
- Chang, J.H., Park, D.H., Park, S.S., and Na, S.M., 2010, Evaluation of application of effective hydraulic conductivity in SCW ground heat pmmp system, *2010 Korea Geo-Environmental Society Fall Conference*, Seoul, p.141-146.
- ETB (Engineering ToolBox), 2017, [www.engineeringtoolbox.com](http://www.engineeringtoolbox.com) [accessed 17.07.04]
- Jeong, E.M., Lee, W.Y., and Oh, S.I., 2010, A study on energy use of the farmers. Korea Rural Economic Institute, Seoul, 65 p.
- Jo, Y.J., Lee, J.Y., Lim, S.Y., and Hong, G.P., 2009, A review on potential effects of installation and operation of ground source heat pumps on soil and groundwater environment, *J. Soil Groundw. Environ.*, **14**, 22-31.
- KOSIS (Korean Statistical information service), 2017, [kosis.kr](http://kosis.kr) [accessed 17.07.04]
- Kwon, K.S., Lee, J.Y., and Mok, J.K., 2012, Update of current status on ground source heat pumps in Korea, *J. Geol. Soc. Korea*, **48**, 93-199.
- NREC (New & Renewable Energy Center), 2016, [www.knrec.or.kr](http://www.knrec.or.kr). [accessed 17.07.04]
- Park, Y., Mok, J.K., Jang, B.J., Lee, J.Y., and Park, Y.C., 2015, Influence of closed loop ground source heat pumps on groundwater: a case study, *J. Geol. Soc. Korea*, **51**, 243-251.
- Sohn, B.H. and Shin, H.J., 2006, Thermal conductivity measurement of grouting materials for ground heat exchanger borehole, *Korean J. Air-Cond. Refrig. Eng.*, **18**, 493-500.
- Song, Y. and Lee, T.J., 2015, Geothermal development in the Republic of Korea: Country update 2010-2014, *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, Melbourne.