

# 수평형 지중 열교환기 시스템의 시공비 및 영향인자 분석

윤 석\*, 이승래\*\*

## Analysis of Construction Cost and Influence Factors on Horizontal Ground Heat Exchangers

Seok Yoon\* and Seungrae Lee\*\*

### Abstract

This paper presents a computational study of thermal performance and construction cost of horizontal ground heat exchangers (GHEs). GLD (ground loop design) simulations of various type of GHEs were carried out. Construction costs were also calculated based on standard estimating, and compared with vertical type GHE system. Besides that, dummy regression analysis was conducted to study the influence of design parameters on the simulation results in horizontal ground heat exchanger system.

### Key words

Horizontal ground heat exchanger(수평형 지중 열교환기), Ground loop design simulation(GLD simulation), Construction cost(시공비), Dummy regression analysis(더미회귀분석)

(접수일 2014. 6. 20, 수정일 2014. 8. 14, 게재확정일 2014. 8. 14)

\* KAIST 건설및환경공학과 (Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST)  
■ E-mail : busybeeyoon@kaist.ac.kr ■ Tel : (042)350-3657 ■ Fax : (042)350-7200

\*\* KAIST 건설및환경공학과 (Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST)  
■ E-mail : srlee@kaist.ac.kr ■ Tel : (042)350-3617 ■ Fax : (042)350-7200

### Nomenclature

$\lambda_s$  : ground thermal conductivity,  $W/m \cdot K$

### subscrip

$B$  : unstandardized coefficient  
 $\beta$  : standardized coefficient

$SE$  : standard error

$t$  :  $B/SE$

$p$  : significant probability

$VIF$  : variance inflation factor

$SS$  : sum of square

$DF$  : degree of freedom

$MS$  : mean square

$D$  : dummy

## 1. 서론

연중 일정한 온도를 유지하는 지열히트펌프 시스템은 크게 밀폐형과 개방형으로 분류될 수 있다. 밀폐형은 가장 보편적인 시스템으로 지열을 보유하고 있는 지중에 열교환기 파이프를 설치한 후 이들 파이프 내에 순환수를 순환시켜 지중과의 열교환을 통해 지중의 열을 흡수 또는 방출하는 시스템이다. 이러한 밀폐형은 수직형과 수평형으로 나뉠 수 있다. 이 중 수직 밀폐형은 약 15cm 정도 직경의 보어홀을 수직으로 약 150~200m까지 천공한 후 내부에 열교환기를 설치한다. 그 후 파이프와 보어홀 내부를 속채움재로 그라우팅하여 지반과의 열교환이 원활하게 이루어지게 한다. 수직 밀폐형은 시공 면적이 상대적으로 적게 소요되기에 설치 면적이 제한적인 상황에서 가장 적합한 방법으로 알려져 있으며 국내에서 현재 설치되어진 지열 히트펌프 시스템의 대부분은 수직 밀폐형이라 할 수 있다. 따라서 이러한 수직밀폐형의 성능 향상을 위한 연구는 꾸준히 증가하고 있으며 현재에도 활발하게 이루어지고 있다.<sup>(1-5)</sup>

하지만 수직 밀폐형은 개방형과 비교하여 열전달 성능이 다소 떨어지며 초기 시공비가 비싸다는 단점이 있다. 이에 대한 대안으로 구조물의 기초를 직접 열교환기로 이용하는 에너지파일 시스템이나 수평형 혹은 개방형 등에 대한 연구가 최근들어 조금씩 진행되고 있다. 이 중 수평형 시스템은 설치 부지가 충분할 경우 수직형에 비해 적은 비용으로 설치할 수 있기 때문에 경제적인 시스템이다.<sup>(6)</sup> 즉 넓은 부지만 확보된다면 별도의 천공 작업 없이 설치가 가능하기에 농어촌 지역에 효율적인 활용이 가능할 것이다. 수평형 시스템의 적용에 관련된 국외 연구의 경우 Wu et al.<sup>(7)</sup>은 수평형 열교환기 직경 및 간격에 따른 열성능을 검토하였으며 Chong et al.<sup>(8)</sup>은 지반의 물성, 열교환기 직경 및 간격에 따른 열성능을 근거로 시공비 등을 검토하였다. 또한 Congedo et al.<sup>(9)</sup>은 열교환기 형태 열교환기 설치 깊이 및 열교환기 종류에 따른 효율성을 제시하였다. 하지만 국외에 비해 국내에서는 수평형에 대한 연구 및 기술개발은 미진한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 국외에서 수행되었던 내용들을 토대로 GLD(ground loop design)<sup>(10)</sup>을 이용하여 수평형 시스템에 대한 효율 및 경제성 분석을 수행하고자 하였으며 통계적 방법을 이용하여 수평형 시스템에 미치는 영향 인자를 분석하고자 하였다.

## 2. 수평형 시스템 경제성 분석

### 2.1 GLD 시뮬레이션

현재 신·재생에너지설비의 지원 등에 관한 지침에 의하면 지열히트펌프를 이용하여 지중 열교환기를 설계할 수 있는 프로그램은 GLD, EED, GLHEPro, GChpCalc와 같다. 이 중 GLD 프로그램은 유일하게 수평형 지중 열교환기를 설계할 수 있는 프로그램이다. 따라서 본 연구에서는 GLD를 이용하여 열교환기 형태, 굴착 깊이, 지반의 열전도도와 같은 인자들을 변화시키며 소요 트렌치 길이와 그에 따른 시공비를 산출하고자 하였다. Table 1은 GLD 시뮬레이션에 적용된 입력 변수를 보여주고 있다.

### 2.2 트렌치 길이 산정

일반적으로 수평형 열교환기의 경우 지면에서 1.5~3m 깊이로 굴착되며 일반 라인형에 비해 Slinky 타입의 열교환기의 열성능이 더 우수한 것으로 알려져 있다.<sup>(9)</sup> 따라서 GLD 시뮬레이션의 입력 인자로 굴착 깊이는 지면에서 2.5m, 지반

Table 1. Input parameters in GLD simulation

Classification	Properties
Annual Equivalent Full-Load Hour (hr)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cooling : 332</li> <li>▪ Heating : 390</li> </ul>
Heat Pump	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ COP : 2.9 (Cooling), 3.8 (Heating)</li> <li>▪ Flow Rate : 11.4 (L/min)/3.5 kW</li> </ul>
Unit Inlet (°C)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cooling : 32.2</li> <li>▪ Heating : 4.4</li> </ul>
Solution Properties	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fluid Type : Ethanol, 20%</li> <li>▪ Specific Heat : 4124 J/K·kg</li> <li>▪ Density : 969.1 kg/m<sup>3</sup></li> </ul>
Ground Condition	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ground Temperature : 15°C</li> <li>▪ Thermal Conductivity : 1.1 W/m·K</li> <li>▪ Thermal Diffusivity : 0.058 m<sup>2</sup>/day</li> </ul>
Trench configuration	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Trench Number : 4</li> <li>▪ Trench Separation : 1.8 m</li> <li>▪ Trench Width : 1 m</li> </ul>
Pipe types	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 3U line, horizontal slinkyk, vertical slinky</li> </ul>
Pipe Parameters	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pipe Type : SDR 11</li> <li>▪ Flow Type : Turbulent</li> <li>▪ Pipe Size : 25 mm</li> <li>▪ Outer Diameter : 33.3 mm</li> <li>▪ Inner Diameter : 27.2 mm</li> </ul>

열전도도는 1.1W/m·K, 그리고 열교환기 종류는 수직 slinky 와 수평 slinky를 선택하여 열교환기 pitch에 따른 소요 트렌치 길이를 산정하였다(Fig. 1 & Table 2). 시뮬레이션 결과 열교환기 pitch와 diameter가 동일한 경우 총 시공비가 가장 적게 산출되었다(Fig. 2).

Slinky 타입 열교환기의 Pitch와 직경은 91cm로 유지한 채 3U, 수평 slinky, 수직 slinky에 대하여 굴착 깊이별로 소요 트렌치 길이를 산정하였다(Table 3 & Fig. 3). 이는 냉방 과 난방 소요 길이 중 큰 값을 나타낸다. 지반의 굴착 깊이가 증가할수록 열교환기와 지반과의 열전달 범위가 증가하기에

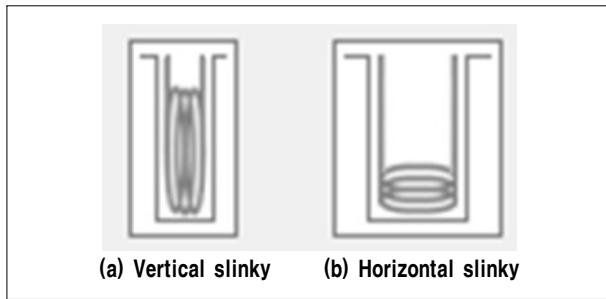


Fig. 1 Slinky type GHEs

Table 2. Trench length vs pitch interval

Pitch	Horizontal slinky	Vertical slinky
25 cm	282 m	286 m
50 cm	381 m	386 m
100 cm	515 m	521 m
142 cm	595 m	602 m

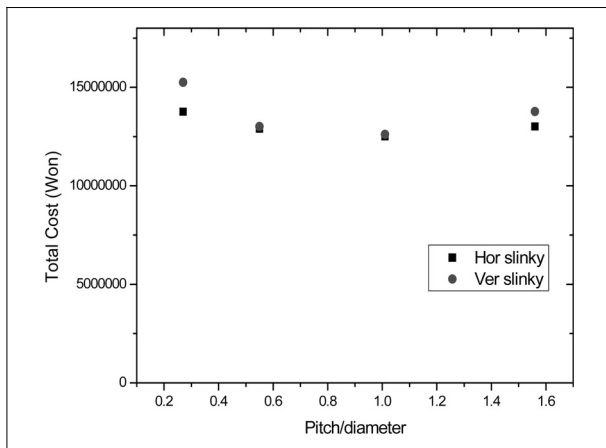


Fig. 2 Construction cost versus pitch/diameter

트렌치 소요 길이는 감소하였다. slinky 타입이 3U 타입보다 열전달이 우수하기에 트렌치 소요 길이는 10~30% 가량 적게 소요되었으나 굴착 깊이가 3m 이상에서는 세가지 타입 모두 큰 차이를 보이지는 않았다. 또한 굴착 깊이가 5m에서는 오히려 소요길이가 더 증가하였는데 이는 지반의 온도가 일정한 상태에서 냉방 난방 소요 길이가 바뀌기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 굴착 깊이가 3m에서 5m로 증가할 때 냉방 요구 길이는 증가하고 난방 소요 길이는 감소하는 경향을 보였다.

### 2.3 시공비 산정

수평형 열교환기를 설치하기 위한 공정은 크게 굴착공정, 파이프 설치 공정, 되메우기 공정 그리고 다짐을 통한 부지정리 공정으로 구성된다. Table 3의 결과를 바탕으로 2014년도 건설공사 토목표준품셈<sup>(13)</sup>을 이용하여 각 공정에 대한 단가를 산출하여 Table 4와 같이 시공비를 산정하였으며 장비 일수를 고려하여 전체 공사 공기를 계산하였다(Table 5). 이 중 파

Table 3. Trench length versus excavation depth

Excavation depth	3U	Horizontal slinky	Vertical slinky
1 m	1,269 m	816 m	1,167 m
1.5 m	878 m	635 m	794 m
2 m	695 m	532 m	623 m
2.5 m	584 m	486 m	526 m
3 m	540 m	508 m	488 m
5 m	606 m	551 m	547 m

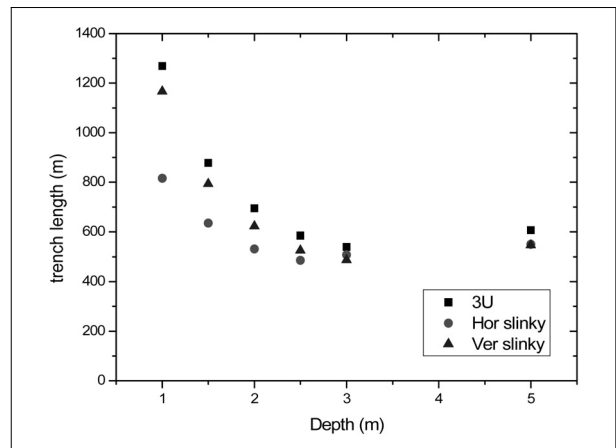


Fig. 3 trench length versus excavation depth

Table 4. Construction cost

Excavation depth		1	1.5	2	2.5	3	5
3U	Excavation & back filling	6,186,375	6,420,375	6,776,250	7,117,500	7,897,500	14,771,250
	Compaction	3,172,500	2,195,000	1,737,500	1,460,000	1,350,000	1,515,000
	Pipe	4,949,100	3,424,200	2,710,500	2,281,500	2,106,000	2,363,400
	Total	14,307,975	12,039,575	11,224,250	10,873,688	11,353,500	18,649,650
Hor-Slinky	Excavation & back filling	3,978,000	4,643,438	5,187,000	5,923,125	7,429,500	13,430,625
	Compaction	2,040,000	1,587,500	1,330,000	1,215,000	1,270,000	1,377,500
	Pipe	12,585,000	9,795,000	8,211,000	7,497,000	7,827,000	8,490,000
	Total	18,603,000	16,025,938	14,728,000	14,635,125	16,526,500	23,298,125
Ver-Slinky	Excavation & back filling	5,689,125	5,806,125	6,074,250	6,410,625	7,137,000	13,333,125
	Compaction	2,917,500	1,985,000	1,557,500	1,315,000	1,220,000	1,367,500
	Pipe	18,003,000	12,249,000	9,612,000	8,106,000	7,527,000	8,427,000
	Total	26,609,625	20,040,125	17,243,750	15,831,625	15,884,000	23,127,625

Table 5. Construction period

Period of compaction				Period of excavation and back filling			
Excavation depth	3U	Hor-slinky	Ver-slinky	Excavation depth	3U	Hor-slinky	Ver-slinky
1	0.50	0.32	0.46	1	7.93	5.10	7.29
1.5	0.34	0.25	0.31	1.5	8.23	5.95	7.44
2	0.27	0.21	0.24	2	8.69	6.65	7.79
2.5	0.23	0.19	0.21	2.5	9.13	7.59	8.22
3	0.21	0.20	0.19	3	10.13	9.53	9.15
5	0.24	0.22	0.21	5	18.94	17.22	17.09

이프 설치 공정은 견적으로 처리하였다.

같은 냉난방 부하를 지중에서 처리한다는 가정하에 최적의 굴착 깊이는 2~2.5m인 것으로 나타났으며 3U 타입이 수평 slinky와 수직 slinky 타입보다 약 30~40% 정도 시공비가 적게 드는 것으로 나타났다. 이는 slinky형의 경우 파이프 제작 단가가 3U와 같은 직관에 비해 2~3배 비싸며 굴착 및 다짐 공사와 같은 공사비보다 파이프와 같은 설비비가 차지하는 비중이 크기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 공사 기간의 경우 3U 타입의 경우 트렌치 굴착 면적이 많이 소요되므로 공기는 가장 크게 나타났으며 수평 slinky보다 공사기간이 대략 1~2일 더 많이 소요되는 것으로 나타났다. 또한 Table 3과 같이 3U 타입의 경우 수평 slinky 타입 보다 굴착 길이가 약 20% 더 많이 요구되기에 그만큼 차지하는 부지면적도 증가할 것이다. 전체적으로 효율 대비 비용은 3U 타입이 유리하며 공사기간 그리고 부지면적 등을 고려해봤을 때는 slinky 타입이 유리한 것으로 판단된다.

또한 수평형 열교환기의 타당성 검증을 위해 수직 밀폐형을 시공했을 때 공사비와 공사 기간을 똑같은 과정을 통하여 산출하였다(Table 6). 수직밀폐형의 경우 역시 GLD를 이용하여 수평형에 적용된 냉난방 부하와 히트펌프를 동일하게 적용하였으며 일반적으로 적용되는 보어홀 및 지반 조건을 입력인자로 사용하였다.<sup>(11)</sup> 또한 U자형 및 W자형 열교환기 배치 형태를 각각 고려하였으며 A, B, C 종류는 열교환기가 보어홀 내부에 배치되는 형태를 뜻한다.<sup>(12)</sup> 수평형의 경우 굴착 깊이는 2m와 2.5m로 설정하였으며 열교환기 파이프의 피치와 직경비를 1로 설정하였다. 또한 지반의 열전도도를 변화시키며 수직 밀폐형과의 공사비와 공기를 비교하였다.

Table 6에서와 같이 지반의 열전도도가 0.8W/m·K 이상인 경우 수평형이 수직 밀폐형보다 약 2배 이상 공사비가 저렴한 것으로 나타났으며 공기는 약 2배정도 더 소요되는 것으로 나타났다. 지반의 열전도도가 1W/m·K 이상의 값에서는 공사기간에 있어서도 수직 밀폐형과 큰 차이가 없었으며

Table 6. Comparison of vertical and horizontal ground heat exchangers

Classification		Horizontal type			Vertical type
		3U	Hor-slinky	Ver-slinky	
Area (m <sup>2</sup> )	$\lambda_s=0.5$	1159~1379	999~1100	1159~1379	- U type (A,B,C) : 620~780 m - W type (A,B,C) : 530~630 m
	$\lambda_s=0.8$	765~909	647~708	700~828	
	$\lambda_s=1.1$	580~700	480~530	520~620	
Period (day)	$\lambda_s=0.5$	17~19	16~17	17	5~6 day
	$\lambda_s=0.8$	12~13	10~11	11	
	$\lambda_s=1.1$	8~10	6~8	8~9	
Total cost (1,000 won)	$\lambda_s=0.5$	23,000~26,000	30,000~33,000	27,000~30,000	30,000~45,000
	$\lambda_s=0.8$	16,000~18,000	20,000~22,000	21,000~23,000	
	$\lambda_s=1.1$	11,000~12,000	14,000~15,000	15,000~17,000	

공사비도 2~3배 정도 적게 산출되었다. 하지만 열전도도가 0.5W/m·K 인 경우, 공사비 측면에서 경제성은 있을 수 있지만 공사 기간이 3배 이상 소요되어 종합적인 면을 고려해봤을 때 타당성은 없을 것으로 판단된다. 따라서 비용, 기간 및 소요 면적 등을 종합적으로 고려하여 현장에 유리한 열교환기 형태를 적용해야 할 것이다. 특히 도서 산간지역과 같이 부지 제약을 받지 않는 곳에서는 수평형 열교환기의 적용성을 고려해 볼 수 있을 것으로 생각된다.

### 3. 영향인자 분석

앞에서와 같이 수평형 시스템은 수직 밀폐형과 비교해 보았을 때, 공사비 측면에서는 상당히 유리하다고 할 수 있다. 따라서 수평형 열교환기 설계에 미치는 영향 인자들을 살펴볼 필요성이 있다. 열교환기 타입, 트렌치 굴착 깊이, 지반의 열전도도를 독립 변수로 설정하였으며 그에 따른 트렌치 깊이를 종속변수로 설정하였다. 열교환기 타입은 앞과 동일하게 3U자형, 수평 slinky형 그리고 수직 slinky형태의 세가지 수준으로 하였으며 트렌치 깊이는 1m에서 5m까지 그리고 지반의 열전도도는 0.5~1.1까지 값을 변화시키며 종속 변수에 미치는 영향을 분석하였다. 열교환기 타입의 경우 연속형 변수가 아닌 범주형 변수이기에 일반적인 회귀분석을 실시할 수가 없으며 이를 더미변수(dummy variable)로 변환하여 더미회귀분석을 실시하여야 한다.<sup>(14)</sup> 본 연구에서는 SPSS 평가

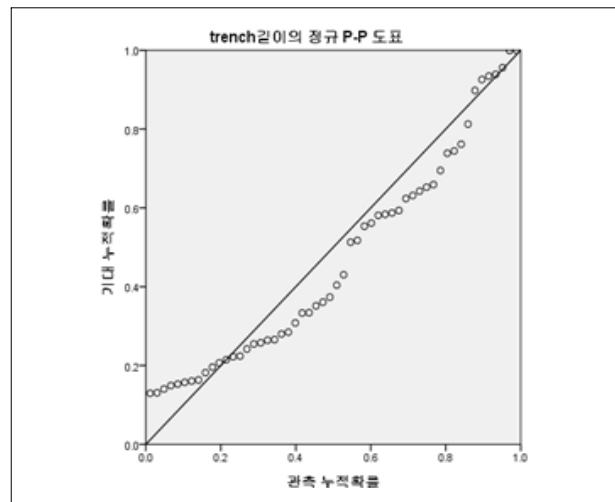


Fig. 4 P-P diagram

판 프로그램을 이용하여 더미회귀분석을 실시하였다. 3U형을 기본으로 수평 slinky(D수평S)와 수직 slinky(D수직S)를 더미 변수로 설정하였다. Fig. 4는 더미회귀분석 전 종속변수의 정규성 검증을 나타내기 위한 P-P 도표이며 종속변수들이 직선에 모여 있으므로 정규분포 가정을 만족한다고 할 수 있다. 지반 열전도도, 열교환기 종류, 굴착 깊이가 트렌치 깊이에 미치는 영향에 대하여 열교환기 종류를 더미변수로 설정하여 인자별 상관분석과 다중회귀분석을 실시하였다. 상관분석 결과 지반의 열전도도와 굴착 깊이가 트렌치 깊이에 미치는 영향이 가장 크게 나타났으며 음의 상관관계를 나타냈다. 다중회귀분석을 실시하기 전 독립변수 간 다중공선성

Table 7. Correlation analysis

		Correlation coefficient				
Classification		Trench length	$\lambda_s$	D hor-slinky	D ver-slinky	Excavation depth
Pearson correlation	Trench length	1,000	-.649	-.204	.036	-.433
	$\lambda_s$	-.649	1,000	.000	.000	.000
	D hor-slinky	-.204	.000	1,000	-.500	.000
	D ver-slinky	.036	.000	-.500	1,000	.000
	Excavation depth	-.433	.000	.000	.000	
P-value	Trench length	-	.000	.069	.398	.001
	$\lambda_s$	.000	-	.500	.500	.500
	D hor-slinky	.069	.500	-	.000	.500
	D ver-slinky	.398	.500	.000	-	.500
	Excavation depth	.001	.500	.500	.500	-

Table 8. Dummy regression analysis

	B	SE	$\beta$	t	p	VIF
Coefficient	2387,181	152,890		15,614	<.001	
$\lambda_s$	-1161,111	149,562	-.649	-7,763	<.001	1,000
D horizontal slinky	-230,722	89,737	-.248	-2,571	.013	1,333
D vertical slinky	-81,889	89,737	-.088	-.913	.366	1,333
Excavation depth	-147,006	28,377	-.433	-5,180	<.001	1,000

$$adj R^2 = .629, F = 23,476 (p < .001)$$

(multi-collinearity)을 검토하였다. 독립변수의 VIF 값이 1.000~1.333으로 10.0 미만으로 나타나 독립변수간 다중공선성이 없는 것으로 드러났다.<sup>(14)</sup> 회귀분석을 실시한 결과, 지반 열전도도( $p < .001$ ), 수평slinky 열교환기( $p < .05$ ), 굴착 깊이( $p < .001$ )는 trench 깊이에 유의한 영향을 주는 것으로 나타났다. 열전도도가 클수록( $B = -1161.111$ ) 굴착 깊이가 깊을수록( $B = -147.006$ ) 트렌치 길이가 짧은 것으로 나타났으며, 열교환기 종류는 Line 형보다 수평 slinky( $B = -230.722$ )의 트렌치 길이가 짧은 것으로 드러났다. 또한 Line 형과 수직 slinky와는 유의한 차이가 없었다. 더미회귀분석결과 트렌치 길이를 설명하는 설명력은 62.9%이며, 지반 열전도도( $\beta = -.649$ ), 굴착 깊이( $\beta = -.433$ ) 순으로 영향을 주는 것으로 드러났다. 통계분석 결과 수평형 열교환기를 설계하는데 있어서는 지반의 열전도도와 굴착 깊이가 중요한 인자라는 것을 알 수 있었다.

## 4. 결론

본 연구에서는 GLD 프로그램을 이용하여 수평형 지중 열교환기 시스템에 대한 효율 및 경제성을 분석하였으며 더미회귀분석을 이용하여 이에 미치는 인자 분석을 실시하였다.

같은 냉난방 부하를 지중에서 처리한다는 가정하에 최적의 굴착 깊이는 2~2.5m인 것으로 나타났으며 3U 타입이 수평 slinky와 수직 slinky 타입보다 약 30~40% 정도 시공비가 적게 드는 것으로 나타났다. 하지만 공사 기간의 경우 3U 타입의 경우 트렌치 굴착 면적이 많이 소요되므로 공기는 가장 크게 나타났으며 수평 slinky보다 공사기간이 대략 1~2일 더 많이 소요되는 것으로 나타났다. 또한 3U 타입의 경우 수평 slinky 타입 보다 굴착 깊이가 약 20% 더 많이 요구되기에 그만큼 차지하는 부지면적도 증가할 것이다. 전체적으로 효율 대비 비용은 3U 타입이 유리하며 공사기간 그리고 부지면적 등을 고려해봤을 때는 slinky 타입이 유리한 것으로 판단된다.

또한 수평형 열교환기의 타당성 검증에 위해 수직 밀폐형

을 시공했을 때 공사비와 공사 기간을 똑같은 과정을 통하여 산출하였다. 지반의 열전도도가  $0.8\text{W/m}\cdot\text{K}$  이상인 경우 수평형이 수직 밀폐형보다 약 2배 이상 공사비가 저렴한 것으로 나타났으며 공기는 약 2배 정도 더 소요되는 것으로 나타났다. 지반의 열전도도가  $1\text{W/m}\cdot\text{K}$  이상의 값에서는 공사기간에 있어서도 수직 밀폐형과 큰 차이가 없었으며 공사비도 2~3배 정도 적게 산출되었다. 하지만 열전도도가  $0.5\text{W/m}\cdot\text{K}$  인 경우, 공사비 측면에서 경제성은 있을 수 있지만 공사기간이 3배이상 소요되어 종합적인 면을 고려해봤을 때 타당성은 없을 것으로 판단된다. 따라서 비용, 기간 및 소요 면적 등을 종합적으로 고려하여 현장에 유리한 열교환기 형태를 적용해야 할 것이다.

수평형 열교환기 설계에 미치는 영향 인자들을 분석하기 위하여 열교환기 타입, 트렌치 굴착 깊이, 지반의 열전도도를 독립변수로 설정하였으며 그에 따른 트렌치 길이를 종속변수로 설정하여 인자별 상관분석과 더미 회귀분석을 실시하였다. 통계분석 결과 수평형 열교환기를 설계하는데 있어서는 지반의 열전도도와 굴착 깊이가 중요한 인자라는 것을 알 수 있었으며 향후 이를 고려한 수평형 열교환기 설계 모듈 개발이 필요할 것으로 판단된다.

## 후 기

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

## References

- [1] Jun, L., Xu, Z., Jun, G. Jie, Y., 2009, "Evaluation of heat exchange rate of GHE in geothermal heat pump systems", *Renewable energy*, Vol. 34, pp. 2898-2904.
- [2] Min, H. S., Yun, T. S., Jeong, S. S., 2011, "Effect of group spacing of energy piles on thermal analysis", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 8, pp. 39-50.
- [3] Min, S., Lee, C., Park, M., Koh, H., and Choi, H., 2010, "Numerical study of heat transfer efficiency, performance and mechanical behavior induced by thermal stress of energy pile", *Transaction of the Korea Society of Geothermal Energy Engineers*, Vol. 6, No. 2, pp. 9-13.
- [4] Park, H. K, Lee, S. R, Yoon, S, 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.
- [5] Yoon, S., Lee, S. R., Go, G. H., Jianfeng, X., Park, H., Park, D., "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.
- [6] Sohn, B., Wi, J., Park, S., Lim, J., 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.
- [7] Wu, Y., Gan, G., Verhoef, A., Vidale, P.L., Gonzalez, R.G., "Experimental measurement and numerical simulation of horizontal-coupled slinky ground source heat exchangers", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, pp. 2574-2583.
- [8] Chong, C.S.A., Gan, G., V. A., Garcia, R. G., 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.
- [9] Congedo, P.M., Colangelo, G., Starace, G., 2012, "CFD simulation of horizontal ground heat exchangers: A comparison among different configurations", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 33-34, pp. 24-32.
- [10] Gaia Geothermal. Ground Loop Design Software, GLD2012.
- [11] Lee, S. R., Yoon, S., Cho, N. H., Kim, M. J., Go, G. H., 2014, "Performance and initial cost analysis on various type of ground heat exchangers", *Journal of Korean Geothermal Energy Engineers*, Vol, 10, No. 1, pp. 14-19.
- [12] Remund, C.P., 1999, "Borehole thermal resistance: laboratory and field studies", *ASHARE CH-99-2-1*.
- [13] 2014 건설공사 표준품셈-토목부분, 한국건설기술연구원.
- [14] 이일현(2014), EasyFlow 회귀분석, 한나래.

**이우 석**



2005년 한동대학교 공간시스템공학과 공학사  
2009년 (주)포스코 설비투자실 Project Manager  
2011년 KAIST 건설및환경공학과 공학석사

현재 KAIST 건설및환경공학과 박사과정 재학중  
(E-mail : busybeeyoon@kaist.ac.kr)

**이승래**



1982년 연세대학교 토목공학과 공학사  
1984년 연세대학교 토목공학과 공학석사  
1989년 Stanford 대학교 토목공학과 공학박사

현재 KAIST 건설및환경공학과 교수  
(E-mail : srlee@kaist.ac.kr)