

인천국제공항 3단계 건설부지에 적합한 지중열교환기 시스템 평가 연구

Evaluation of a Ground Heat Exchanger Appropriate for the Site of the Third Stage Construction of Incheon International Airport

조 남 현¹ Cho, Nam-Hyun

송 정 태² Song, Jung-Tae

윤 석³ Yoon, Seok

이 승 래⁴ Lee, Seung-Rae

Abstract

In the present study, a ground heat exchanger was installed for each heat source in the system at the site to evaluate ground heat conductivity, constructability, and economic feasibility; the factors considered in the study included ground heat, groundwater, fillers (such as bentonite and pea pebbles) and the shape of the heat exchange pipe (e.g., U and D-U). The aim was to determine the ground heat exchanger appropriate for the geothermal system in the 3rd-phase construction of Incheon International Airport. A comparative cost analysis of the initial costs based on the above information showed that although the initial costs of the regular vertical closed loop-II and modified vertical closed loop were lower than those of the regular vertical closed loop-I, they could not be expected to deliver high economic efficiency from the viewpoint of constructability (filler injection, heat exchange pipe insertion). The initial costs proved to be higher in the case of Geohil.

요 지

본 연구에서는 인천국제공항 3단계 건설 사업에 포함된 지중열시스템에 대한 적정 지중열교환기 선정을 위해 현장 부지내 시스템의 열원(지중열원, 지하수), 채움재(벤토나이트, 콩자갈), 열교환 파이프 형태(U, D-U)별로 지중열교환기를 설치하여 지중열전도도, 시공성, 경제성을 평가하였다. 이를 위해 벤토나이트 그라우트에 single U형의 열교환파이프가 삽입된 일반수직밀폐형-I, 열교환 파이프의 접촉면적을 늘려 열교환율을 높이기 위해 single U형 열교환파이프를 두 개 삽입한 Double U형 일반수직밀폐형-II, 일반수직밀폐형-I의 채움재를 벤토나이트 대신 콩자갈로 적용한 개량수직밀폐형 및 SCW(standing column well)에 채움재를 넣은 함몰방지개방형(geohil)을 시험시공하였다. 초기비용에 대한 비용 비교분석결과 일반수직밀폐형-I 대비 개량수직밀폐형, 일반수직밀폐형-II의 경우 초기비용이 절감되었지만 시공성(채움재 주입, 열교환 파이프 삽입) 및 시공일수를 고려할 때 높은 경제성을 기대하기 어려우리라 판단된다. 또한 Geohil의 경우 초기 비용이 더 늘어났다.

Keywords : GHE, Ground thermal conductivity, Grouting material, Vertical Closed Loop, Geohil

1 정희원, 인천국제공항공사 공항연구소 전문연구원 (Member, Research Fellow, Airport Research Institute, Incheon Airport, Tel: +82-32-741-2093, Fax: +82-32-741-2098, t99ending@airport.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 비희원, 인천국제공항공사 공항연구소 소장 (Director, Research Fellow, Airport Research Institute, Incheon Airport)

3 정희원, 한국과학기술원 건설환경공학과 박사후연구원 (Member, Post-doc, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST)

4 정희원, 한국과학기술원 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 11월 30일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2015 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

지열 냉·난방 시스템은 각광받고 있는 재생에너지 시스템 중 하나로 연중 온도가 일정한 지하수 및 지중 열원을 냉난방에 이용한다. 시스템의 성능은 적용 현장의 지반 조건 및 운전 조건 등에 영향을 받게 된다. 특히 시스템 성능을 좌우하는 지반과 지중열교환기(GHE; ground heat exchanger)의 열교환율은 토양, 암반특성 및 지하수량 등에 의해 영향을 받게 된다(Kim et al., 2008). 또한, 열원 및 열교환 형식에 따라 다른 성능을 나타내기 때문에 적용 시 이를 고려하여 형태적, 지질적 특성에 적합한 지중열교환기가 선정되어야 한다.

최근 인천국제공항공사는 증가하는 항공수요에 적기 대응하고 주변공항과의 허브 경쟁력 강화를 위하여 2009년부터 2017년까지 총 5조원을 투입해 제2여객터미널 및 여객/화물계류장, 접근/연결교통시설 등 공항 인프라를 단계적으로 건설하는 3단계 건설 사업이 진행 중이다. 이중 시설물 일부에 지열 냉·난방 시스템 적용을 계획하고 있다. 하지만 위치적 특성상 해양매립지반을 형성하고 있어 지반 특성 및 설치환경 등을 고려한 적정 지중열교환기 선정이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지열시스템의 열원(지중열원, 지하수), 채움재(벤토나이트, 콩자갈), 열교환 파이프 형태(U, D-U)에 따른 지중열전도도, 시공성, 경제성을 평가하여 인천국제공항 3단계건설 매립부지에 적합한 지중열교환기 시스템을 검토하고자 하였다.

이를 위해 인천국제공항 3단계 건설부지에 벤토나이트 그라우트에 single U형의 열교환파이프가 삽입된 일반수직밀폐형-I, 열교환 파이프의 접촉면적을 늘려 열교환율을 높이기 위해 single U형 열교환파이프를 두 개 삽입한 Double U 형 일반수직밀폐형-II, 일반수직밀폐형-I의 채움재를 벤토나이트 대신 콩자갈로 적용한 개량수직밀폐형 및 SCW(standing column well)에 채움재를 넣은 함몰방지개방형(geohil)을 시험시공하고 지중열전도도를 측정하였다. 또한 시공성을 평가하기 위해 시공 시 소요시간과 비용을 산정하였고, 설계 해석의 입

력변수로 활용하기 위해 채움재별 열전도도를 측정하였다. 측정된 지중열전도도와 채움재의 열전도도를 입력변수로 설계해석을 통해 설치 수량을 산정하였고, 산정된 설치 수량과 실제 시공비용을 이용한 경제성 검토를 실시하였다.

2. 이론적 배경

2.1 지열 냉·난방 시스템

지열 냉·난방 시스템은 난방 시에는 건물 내의 열을 지중으로 방출하고 난방 시에는 지중의 열을 실내에 공급하기 위해 크게 지중열교환기, 히트펌프(H/P), 실내 난방 부하 설비 등으로 구성된다(Park et al., 2010). 이중 지중열교환기는 시스템의 성능을 결정짓는 주요 구성요소로, Table 1에 기술된 열교환 방식, 지중열전도도, 채움재의 열전도도 등에 주로 영향을 받게 된다. 따라서 지반 및 위치적 특성에 따른 영향 요소를 고려한 적절한 지중열교환기 선정은 열교환기 주변 토양 열전달을 원활히 이루어지게 하여 최적 성능을 발휘할 수 있게 한다(Sohn et al., 2013). 이에 본 연구는 인천국제공항 3단계 건설부지 해양매립지반에 적합한 지중열교환기 선정을 위해 열교환방식과 채움재 별 시험시공을 실시하여 지중열전도도, 설계수량, 경제성을 평가하였다.

2.2 열교환 방식

지중열교환기는 지열원에 따라 지중열원, 지하수열원, 지표수열원 시스템 등으로 분류할 수 있으며, 열교환 유체의 순환방식에 따라 밀폐형과 개방형으로 구분할 수 있다(Jo et al., 2009). 국내에서 주로 이용되는 수직밀폐형은 지중 깊이 150~250m에 설치된 열교환기를 통해 열교환 유체를 순환시켜 열을 교환하게 된다(Lee, 2009). 수직밀폐형에는 시공의 편리성 등으로 인해 single U형이 가장 많이 적용되고 있으며, 최근 보어홀에 single U형을 2개 삽입하는 D-U자형 열교환기가 열교환율이

Table 1. Factors affecting the performance of GHE

Classification	Factors	Remark
Method of thermal exchange	Heat source (ground, ground-water, etc.), Shape of pipe	Type of GHE
Ground thermal conductivity	Soil characteristic, Ground-water characteristics (level, amount, etc.)	
Thermal conductivity of grouting material	Material (bentonite, aggregate, cement, etc.)	

약 10~15% 우수하다는 연구결과가 나왔다(Yoon et al., 2013). 개방형의 경우 지하수나 지표수 자체가 열교환 유체의 역할을 하는 시스템으로 주로 사용되는 SCW형은 단일 관정에서 양수하고 동일관정에 지하수를 재주입하는 방식이다(Rafferty, 2001). 이는 수직밀폐형 대비 설치 소요 면적이 적으며 상대적으로 열 성능이 우수한 공법으로 알려져 있다. 하지만 SCW의 경우 보어홀의 붕괴 및 지하수 오염 등이 문제가 되어 최근에는 함몰 방지 및 열교환 효율을 높이기 위해 나공 상태로 있는 내부를 공자갈로 채우는 geohil의 적용이 늘어나고 있다(Seo, 2011).

따라서 본 연구에서는 인천국제공항의 해양매립지 특성과 공항이라는 특수성을 고려해 열교환 파이프를 변화시켜 효율을 높일 수 있는 수직밀폐형과 SCW의 함몰 잠재성을 보완한 geohil의 적용성을 검토하였다.

2.3 지중 열전도도

지중열교환기의 열교환율은 토양, 암반 특성 및 지하수 접촉여부 등에 의해 영향을 받기 때문에 시스템 설계 시 지중열전도도 측정이 선행되어야 한다(Lee et al., 2010). 이를 측정하고 분석하는 것은 시스템의 설계 및 지중열교환기 설치 용량을 결정짓는 중요한 변수로 작용된다. 이러한 중요성에 의해 지열시스템 시공 초기 지중열전도도의 측정은 의무화 되어 있으며 국내에서는 주로 열유체 방식을 이용해 지중열전도도 측정이 이루어지고 있다.

따라서 본 연구에서는 열 유체 방식의 현장 열응답 시험을 통해 각각의 지중열전도도를 측정하였다. 이 방

법은 Fig. 1에서와 같이 지중열교환기 내에 일정한 에너지를 가진 유체를 유입시켜 지반과 유체 사이의 열교환 후 열교환기 입·출 유체 온도차를 이용하여 측정하는 방법으로 지중 열전도도 k 값은 식 (1)에 의해서 구하게 된다.

$$k = \frac{Q}{4 \times \pi \times L \times a} \quad (1)$$

여기서, Q 는 평균투입 열량(W), L 은 보어홀의 길이(m), a 는 로그시간에 대한 온도의 평균기울기(토양의 열확산율), k 는 유효 열전도도(W/m·k)를 나타낸다.

2.4 채움재 열전도도

채움재는 지중열교환기와 주변 지중과의 열교환을 원활하게 할 뿐만 아니라 지상 오염물질이 내부로 유입되거나 보어홀 주변 지하수가 지표로 유출되는 것을 방지하는 역할을 한다(Allan and Philippacopoulos, 1999; Cho, 2006). 이를 위해 채움재는 높은 열전도도와 낮은 투수성, 시공성이 확보되어야 한다. 국내에서는 수직밀폐형에 주로 벤토나이트에 열전도도를 높이기 위한 실리카샌드를 첨가하여 사용하고 있다(Choi et al., 2008). 하지만 쇄석(15mm 이하)을 채움재로 사용하는 개방수직밀폐형의 경우 일반 수직밀폐형에 비해 열전도도가 약 20%가 높아졌다는 연구결과가 최근 발표되었다(Chang, 2013). SCW의 경우 별도의 그라우트를 사용하지 않는 것이 일반적이지만, Geohil은 함몰 방지 및 열교환 효율을 높이기 위해 나공 상태로 있는 내부를 공자갈로 채우기 때문에 채움재의 열전도도가 중요 변수가 될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 지중열교환기 시스템에 벤토나이트 혼합물 및 공자갈을 적용하여 지중열전도도를 측정하고, 채움재별 열전도도를 측정하여 설계 프로그램의 입력변수로 사용하였다.

2.5 지열시스템 설계 프로그램

지열에너지의 이용이 활성화되면서 미국, 유럽 등지에서 지중 열교환기 설계를 위한 다양한 상용 설계 프로그램들이 개발되었다. 이러한 프로그램들은 주어진 냉난방 부하와 지중의 열전달 특성을 해석하여 필요로 하

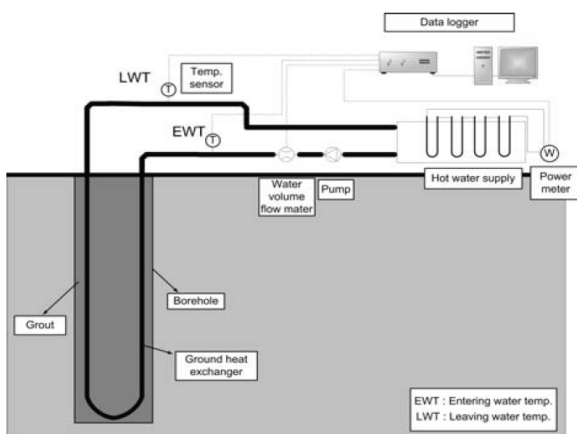


Fig. 1. Conventional thermal hydraulic TRT (Kim et al., 2008)

는 지중 열교환기의 깊이, 배치 등의 설계 방안을 제시한다. 이중 일반적으로 사용되는 몇몇 프로그램들의 제원 및 특징을 요약하면 Table 2와 같다. 국내에서는 GLD, EED, GLHEPRO, GchpCalc가 에너지 관리공단으로부터 정식으로 인증을 받았으며, 수직밀폐형에는 GLD가 개방형에는 GLHEPRO가 주로 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 주로 이용되는 GLD와 GLHEPRO를 각각 수직밀폐형과 Geohil 열교환기 설계에 활용하였다.

3. 시험시공 및 열 물성 평가

본 연구를 위한 지중열교환기는 인천국제공항 3단계 건설 매립지반 조건을 반영하기 위해 Fig. 2와 같이 건설 예정 부지 내에 설치하였다.

3.1 현장 조건

적절한 시험시공을 위해 지반조사 및 염분함유량조사를 수행하였다. 지하수위는 지표면에서 3.5m 깊이에 위치해 있었으며, 깊이 30m 지점부터 풍화암 및 연암이

출연하는 것으로 나타났다. 지반의 염분 함유량은 깊이 10, 20, 50m에서 약 8,500, 13,000, 4,500ppm의 염분이 검출되었고, 그 외 구간에서는 약 250ppm이하의 염분이 검출되었다. 따라서 깊이 50m까지의 염분 영향성 배제하기 위해 기존 연구결과에 따라 밀폐형의 경우 채움재(벤토나이트)를 일정시간 팽윤한 상태에서 주입하였고(Cho et al., 2013), geohil 공법은 지하수 환수관을 50m보다 깊게 설치하였다.

함몰 방지 개방형의 경우 지하수를 직접 활용하기 때문에 지하수량 및 영향성에 대한 평가가 필수적이다. 따라서 지하수 양수량 및 영향성 평가를 실시하였고, 그 결과 적정 취수량은 70m³/day로, 이용에는 문제가 없을 것으로 예상되었다. 또한 지중열을 이용한 냉난방시설은 폐쇄시스템으로 양수한 지하수를 다시 지하로 환원시켜 줌으로 지하수량에 영향이 없을 것으로 판단되었다.

3.2 열교환기 시공

열교환 방식별(U, D-U 수직밀폐형, geohil) 및 채움재

Table 2. Features of various design programs for GHE

Program	Developed	Analysis Solution	Type of GHE/Borehole
GLD	Gaia Geothermal, USA	Kavanaugh's design method, Cylindrical source model	Vertical Closed-Loop (U, W type)
EED	Lund University, Sweden	G-function	Vertical Closed-Loop (U, W, 3U type)
GchpCalc	Energy Information Service, USA	Kavanaugh's design method, Cylindrical source model	Vertical Closed-Loop (U, W type)
GLHEPRO	IGSHPA, USA	G-function	Vertical Closed-Loop (U, W type, Concentric tube)
PILESIM2	SUPSI, Switzerland	Trnsys, Numerical analysis	Energy File (U~5U type, Concentric tube)

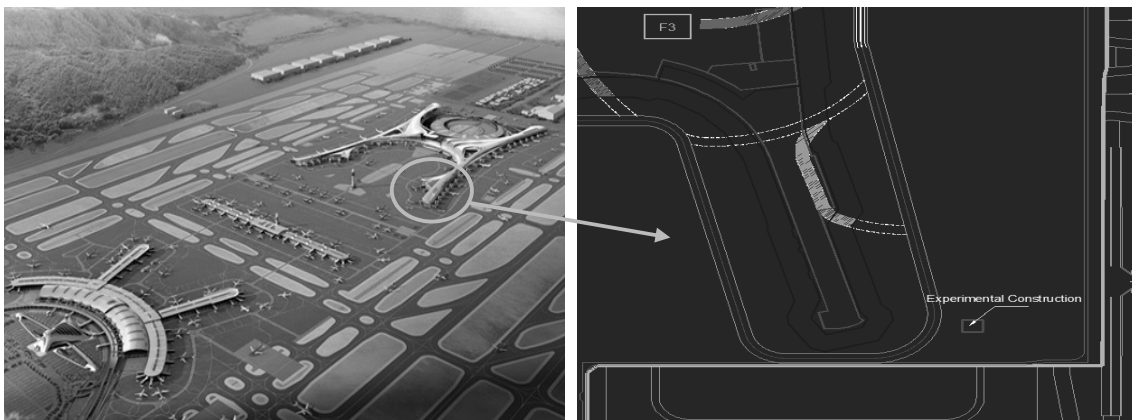


Fig. 2. Location of Experimental Construction

종류(벤토나이트, 콩자갈)에 따른 지중 열전도도 측정을 위해 Fig. 3과 같이 4 가지 시험시공을 실시하였다. Fig. 3의 (a)는 일반수직밀폐형-I으로 깊이 200m, 직경 150mm의 보어홀에 PE(polyethylene) U형 파이프(내경 40mm, 200m 삽입)를 설치하여 벤토나이트를 채움재로 사용하였다. (b)는 개량수직밀폐형으로 (a)와 동일한 조건에서 채움재만 콩자갈로 변경하였다. (c)는 일반수직밀폐형-II로 (a)의 PE(polyethylene) 재질 열교환파이프를 D-U

형((내경 27mm, 185m 삽입) 파이프를 설치한 것이다. (d)는 geohil로 깊이 500m, 직경 250mm의 보어홀에 지하수 열원을 직접 이용할 수 있도록 공급관과 환수관을 설치하고, 콩자갈을 채움재로 사용하였다.

시공은 Fig. 4와 같이 천공, 열교환기 설치 및 채움재 주입 순으로 각각 진행되었다. 채움재로 사용된 콩자갈은 Fig. 4의 (d)와 같으며 최대치수 15mm 이하의 자연산 골재를 사용하였다. 공법별 시공 시간은 일반수직밀폐

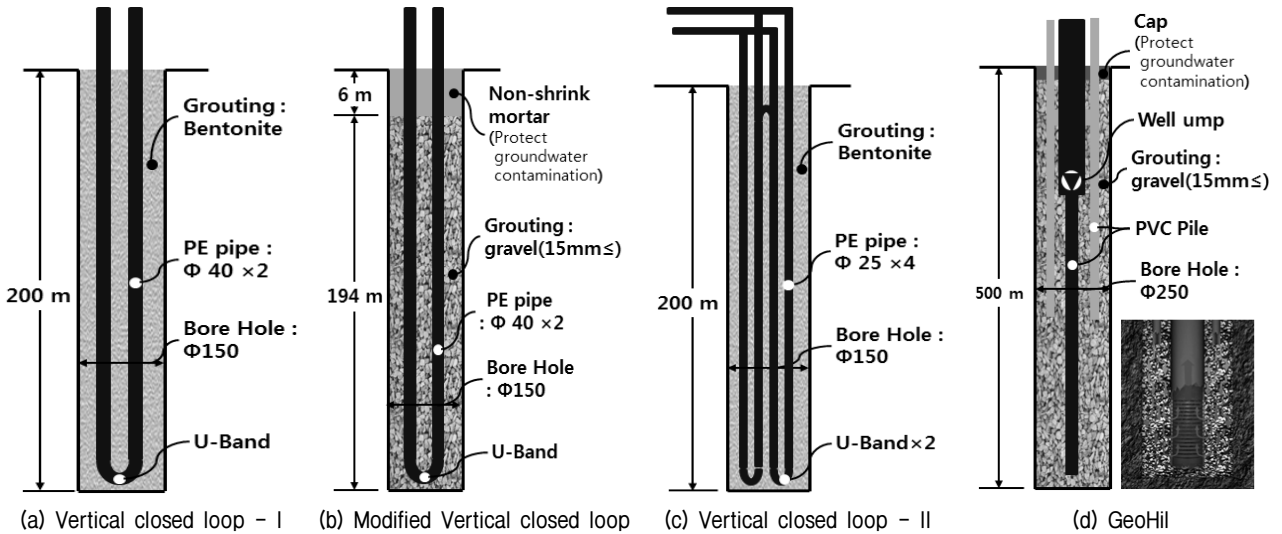


Fig. 3. Cross Section of each GHE



(a) Drilling of borehole



(b) Installation of GHE pipe and grouting (vertical closed loop)



(c) Installation of GHE pipe and grouting (geohil)



(d) Grout material (native gravel)

Fig. 4. Construction of each GHE system

형-I(U, 벤토나이트)의 경우 약 0.7일, 개량수직밀폐형 (U, 콩자갈) 및 일반수직밀폐형-II(D-U, 벤토나이트) 경우는 콩자갈을 자유 낙하시켜 채움으로 인한 추가 시간이 필요해 1.0 일 정도가 소요되었다. Geohil의 경우 천공 깊이가 깊어지고 채움재, 열교환기 설치 작업 난이도로 인해 많은 시간이 필요해 6.5 일이 소요되었다.

3.3 지중 열전도도 평가

개별 지중열교환기는 약 15 일 정도의 안정기 후 열유체 방식의 현장 열응답 시험을 통해 지중 열전도도를 측정하였다. 측정결과 Table 3과 같이 수직밀폐형의 지중열전도도는 열교환기 파이프 유형이나 채움재와 관계없이 2.43~2.48W/m·K 정도의 유사한 값을 보였다. 반면 함몰방지개방형은 지하수와 직접적인 열교환이 이루어짐에 따라 수직밀폐형 대비 약 1W/m·K 정도 높은 3.34W/m·K로 측정되었다. 단, 함몰방지개방형의 열전도도평가 결과는 선형 열원 모델 적용에 문제가 존재하므로 신뢰성이 부족할 것으로 판단된다.

3.4 채움재 열전도도

설계 프로그램의 입력변수로 사용하기 위해 채움재의 열전도도를 Hukseflux사의 TP08 Probe를 이용하여 Fig. 5와 같이 측정하였다. 이용 장비는 탐침의 열원으로부터 시료에 열이 가해지면, 열기전력(thermoelectromotive force)을 발생시켜 이로 인한 온도센서에서의 온도변화 차이를 이용하여 비정상상태에서의 열전도도를 측정하게 된다. 채움재별 열전도도는 Table 4와 같이 콩자갈이 벤토나이트와 실리카 샌드의 혼합물보다 약 0.6W/m·k 높게 측정되었다.

4. 지중열교환기 설치 수량 산정

4.1 설계 조건

본 연구에서 제시한 지중열교환기 별 설치 수량 산정을 위한 대상 시설물에 계획된 지열시스템의 월별 총부하와 피크 부하는 Table 5와 같다.

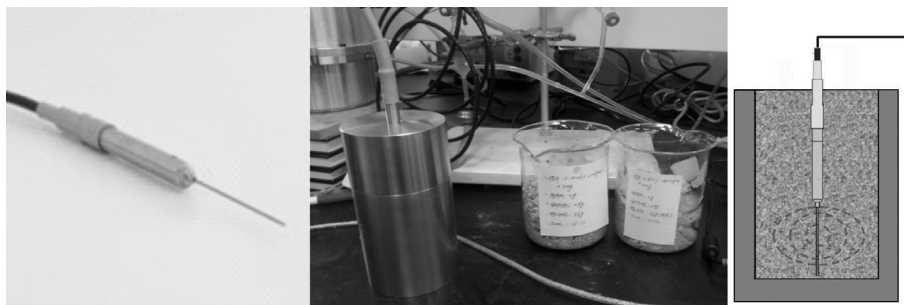


Fig. 5. Measure the thermal conductivity of grout material

Table 3. Ground Thermal Conductivity Measurement of each GHE

Designation	Vertical closed loop - I (U)	Modified vertical closed loop (U)	Vertical closed loop - II (D-U)	Geohil (Concentric tube)
Grout material	Bentonite+Silica Sand	Native Gravel	Bentonite+Silica Sand	Native Gravel
Initial temperature of ground (°C)	16.5	16.5	16.5	20.5
Borehole depth (m)	205	200	200	428
Average input power (W)	13,007	11,148	14,469	109,169
Slope of T_{mean} vs $\ln(t)$	2.05	1.827	2.323	6.078
Effective thermal conductivity (K, W/m·k)	2.46	2.43	2.48	3.34

Table 4. Thermal conductivity measurements of grout material

Classification	Bentonite + Silica sand	Native gravel
Weight ratio	Bentonite : Silica Sand : Water = 30 : 30 : 40	Water-soaking
Thermal conductivity (W/m·k)	0.98	1.53

4.2 설계입력 변수

지열시스템의 설계는 채움재, 열교환 파이프 등의 제 원뿐만 아니라 지반의 온도, 지중 열전도도, 순환수의 속도, 비열, 보어홀 배열 등의 다양한 조건을 입력하여

Table 5. Monthly Geothermal Load of the Target Structure

Month	Cooling		Heating	
	Total (kWh)	Peak (kW)	Total (kWh)	Peak (kW)
1	0	0	1,427,281	4,406
2	0	0	877,904	2,517
3	0	0	901,666	2,212
4	0	0	12,117	135
5	346,611	1,828	12,520	135
6	551,248	2,544	7,270	101
7	769,297	3,227	4,847	67
8	909,248	4,000	5,847	67
9	619,527	3,174	12,117	17
10	340,579	1,485	25,041	135
11	0	0	33,926	202
12	0	0	1,132,411	2,994
Total	3,536,510		4,452,994	

Table 6. The input parameters of design program

Designation		Vertical closed loop - I (U)	Modified vertical closed loop (U)	Vertical closed loop - II (D-U)	Geohil (Concentric tube)		
Design program		GLD	GLD	GLD	GLHEpro V4.0		
Forecasting period (yr)		20	20	20	20		
Temperature limits		max. EWT : 30°C, min. EWT : 5°C					
Pipe	Shape		Single U	Single U	Double U	Concentric tube	
	Diameter (mm)	Outer	In			200.0	
			Out			200.1	
		Inner	In	39.40	39.40	27.30	75.0
			Out	48.31	48.31	33.40	86.0
Thermal resistance		0.060	0.060	0.041			
Grouting	Material		Bentonite + Silica sand	Native gravel	Bentonite + Silica sand	Native gravel	
	Thermal conductivity (W/m·k)		0.98	1.52	0.98	1.52	
Borehole	Depth (m)		200	200	200	500	
	Diameter (mm)		150	150	150	250	
	Spacing (m)		5	5	5	15	
	Thermal resistance (m·K/W)		0.175	0.148	0.159	0.015	
Fluid	Type		SDR11 (Ethanal 20%)	SDR11 (Ethanal 20%)	SDR11 (Ethanal 20%)	Pure water (Ground Water)	
	Freezing point (°C)		-9.44	-9.44	-9.44	0.0	
	Volumetric heat capacity (kJ/K·kg)		4.224	4.224	4.224	4.173	
	Density (kg/m ³)		969.1	969.1	969.1	998.0	
	Flow rate		10.4 ((l/m)/3.5kW)	10.4 (l/m/3.5kW)	10.4 (l/m/3.5kW)	192 (l/s)	
Ground parameter	Thermal conductivity (W/m·k)		2.46	2.43	2.48	3.34	
	Temperature (°C)		16.5	16.5	16.5	20.5	

피크 부하를 감당할 수 있는 요구 깊이를 결정하는 것이다. 따라서 대상 시설물의 지열시스템 담당부하, 현장조건을 고려한 Table 6의 조건을 프로그램의 입력변수로 사용하였다.

4.3 설계결과 고찰

지중열교환기 별 프로그램 해석 결과는 Table 7과 같다. 보어홀 깊이 200m 기준으로 수직밀폐형의 경우 필요 보어홀 수는 일반수직밀폐형-I(Single U, 벤토나이트) 472 공, 개량수직밀폐형(Single U, 콩자갈) 456 공, 일반수직밀폐형-II(D-U, 벤토나이트) 444 공으로 각각 산정되었다. 함몰방지개방형의 경우 깊이 500m 기준 약 46 공으로 산정되었다.

일반수직밀폐형-I(Single U, 벤토나이트) 기준, 채움재를 콩자갈로 변경하였을 경우 약 16공이 줄어들었고, 열교환기 파이프를 D-U로 변경되었을 경우 약 28 공이 줄어들었음을 알 수 있었다. 또한 함몰방지개방형의 경우 수직밀폐형에 비해 적은 보어홀이 요구되었다. 하지만 좀 더 명확한 상대적 비교를 위해서는 공별 시공비,

시공성 등을 고려한 경제성이 고려되어야 한다.

5. 초기비용에 대한 경제성 검토

일반적으로 지중열시스템에 대한 경제성분석은 크게 초기비용(장비 및 시공비), 연간 비용(운영비용) 등을 고려하게 된다. 하지만 본 연구에서는 운영비용을 제외한 시험시공을 기초로 한 초기비용만의 분석을 통해 경제성 비교를 실시하였다. 이는 불확실한 변수가 포함된 운영비용을 제외하여 좀 더 객관적 검토를 위함이다. 초기비용의 경제성 검토는 시험시공(1개 공 시공)시 투입된

비용 및 산정된 공법별 소요 수량에 따른 소요 비용과 최소 3개 이상의 지열전문업체를 통해 받은 설비의 견적 비용을 이용해 실시하였다. 경제성 검토를 위한 비교 대상은 본 연구에서 시험시공한 4가지 형태의 지중열시스템 설치를 위한 초기 비용으로 Table 8과 같다. 이는 열펌프, 순환 펌프, 배관 및 자동제어 필요한 설비비용과 천공 및 지중열교환기 설치비용 등을 포함한다.

5.1 열교환기 개당 시공비용

공법별 열교환기 개당 시공비용은 시험시공 시 투입된

Table 7. Comparison of design program analysis result

Designation	Vertical closed loop - I (U)		Modified vertical closed loop (U)		Vertical closed loop - II (D-U)		Geohil (Concentric tube)
	Heating	Cooling	Heating	Cooling	Heating	Cooling	
Grouted material	Bentonite + Silica sand		Native gravel		Bentonite + Silica sand		Native gravel
Total borehole depth (m)	94,227.5	70,725.5	91,004.5	67,989.2	88,771.8	66,296.9	22,861.92
Each borehole depth (m)	200		200		200		500
Number of borehole	472		456		444		46

Table 8. Item of economical evaluation

Classification		Contents		Remark
Basis for comparison		Geothermal load of the target structure		IIA 3 rd construction
Initial cost	Construction	Unit cost	Cost of GHE construction	Basis of exp. construction
		Installation quantity	Estimate through analysis program	- Geothermal conductivity - Conductivity of grout material
		Construction cost	Unit cost × Installation quantity	
		Other	Submerged pump and environmental impact assessment, etc.	Basis of exp. construction
	Facility	Equipment	Heat pump, circulating pump, etc.	Estimated amounts
		Piping	Machinery room and trench (Piping)	
Automatic control		Control equipment		

Table 9. Price per unit heat exchanger construction

<Unit : KRW>

Designation	Vertical closed loop - I (U)	Modified vertical closed loop (U)	Vertical closed loop - II (D-U)	Geohil (Concentric tube)
Construction equipment	1,200,000	1,200,000	1,200,000	3,000,000
Drilling (Unit cost × Depth)	15,000/m × 200 = 3,000,000	15,000/m × 200 = 3,000,000	15,000/m × 200 = 3,000,000	80,000/m × 500 = 40,000,000
Casing (Unit cost × Depth)	20,000/m × 40 = 800,000	20,000/m × 40 = 800,000	20,000/m × 40 = 800,000	20,000/m × 40 = 800,000
Pipe (GHE)	330,000	330,000	430,000	7,500,000
Submerged pump				1,500,000
Environmental impact assessment				3,000,000
Installation of pipe	300,000	300,000	500,000	1,200,000
Grout material	300,000	450,000	300,000	1,500,000
Grouting	200,000	200,000	200,000	1,000,000
Other	70,000	70,000	70,000	500,000
Total	6,200,000	6,350,000	6,500,000	60,000,000

비용으로 Table 9와 같이 일반수직밀폐형-I 6,200,000원, 개량수직밀폐형 6,350,000원, 일반수직밀폐형-II 6,500,000원, geohil 60,000,000원이 소요된다. 일반수직밀폐형-I, II, 개량수직밀폐형의 경우 모두 동일 규모의 천공 장비를 사용하여 동일한 천공 깊이 및 직경으로 시공되기 때문에 채움재와 열교환 파이프 비용이 증가하게 된다. 반면 geohil은 수직밀폐형 대비 천공 깊이 및 직경이 커지기 때문에 천공장비 비용이 상승하며, 지하수 영향성 평가, 수증펌프 비용이 추가로 소요되어 비용이 약 10배 정도 증가하게 된다.

5.2 공법별 설비비용

지중열시스템의 설비부분에 대한 비용은 3개 이상의 지열전문업체에 요청하여 받은 견적의 평균값을 Table 10과 같이 산정하였다. Table 10의 장비설치는 H/P, C/P 등의 비용과 설치비용을 포함한 것으로 수직밀폐형의 경우 모두 동일한 비용이 산정됨을 알 수 있으나, 지하수를 직접 활용하는 geohil은 수직밀폐형에 비해 약 6,000,000천 원 정도 더 소요됨을 알 수 있다. 트렌치 배관의 경우 천공되는 공수가 많을수록 그 비용이 증가하였다. 특히 수직밀폐형 대비 geohil의 경우 약 7,000,000천 원 이상이 절감됨을 알 수 있다. 하지만 geohil의 경우 해양매립지의 특성을 고려하여 기계실배관인 열(판형열)교환기는 내해수성 재질인 티타늄 설계가 필요하게 되어 그 비용이 상대적으로 증가하게 된다. 설비 총 비용면에서 일반수직밀폐형-I 대비 절감비용을 살펴보면 개량수직밀폐형은 약 50,000천 원, 일반수직밀폐형-II는 약 160,000

천 원 정도가 절감되었다. 또한 함몰 방지형 역시 약 67,000천 원 정도 절감됨을 알 수 있었다.

5.3 공법별 열교환기 초기비용

앞서 산정된 공법별 시공비용과 설비비용을 고려한 총비용은 Table 11과 같다. 여기서 확인할 수 있듯이 일반수직밀폐형-I 대비 개량수직밀폐형은 약 140,000,000원, 일반수직밀폐형-II은 약 260,000,000원 정도 초기비용이 절감됨을 알 수 있었다. 하지만 채움재나 열교환 파이프 주입에 따른 시공성 및 시공일수를 고려할 때, 높은 경제성을 기대하긴 어렵다.

높은 경제성을 예상했던 함몰방지개방형의 경우 초기 비용이 일반수직밀폐형-I(U, 벤토나이트) 대비 오히려 상승하였다. Seo(2011)의 연구 결과에 따른 일반지역의 지중열전도도 범위와 비교하였을 때, 본 연구의 geohil 경우 3.34W/m·K의 지중열전도도로 약 60% 수준 정도로 낮기 때문인 것으로 판단된다. 이는 열전도도에 영향을 주는 주요 요소인 지하수 취수용량(70m³/day)이 일반적인 개방형 지중열시스템의 지하수 취수용량인 100~150m³/day에 50~70% 수준이기 때문인 것으로 판단된다. 또한 개방형의 경우 지하수를 직접이용하기 때문에 주기적인 관리 및 청소가 필요로 하여 유지관리비용 역시 수직밀폐형 대비 높을 것으로 예상된다.

6. 결론

본 연구는 인천국제공항 3단계 건설부지인 해양매립

Table 10. Geothermal systems equipment costs (Except of GHE)

<Unit : KRW>

Designation	Vertical closed loop - I (U)	Modified vertical closed loop (U)	Vertical closed loop - II (D-U)	Geohil (Concentric tube)
Installation of equipment	1,400,000,000	1,400,000,000	1,400,000,000	2,000,000,000
Piping of machinery room	800,000,000	780,000,000	750,000,000	1,013,000,000
Trench (Piping)	1,600,000,000	1,570,000,000	1,490,000,000	720,000,000
Automatic control	100,000,000	100,000,000	100,000,000	100,000,000
Total	3,800,000,000	3,750,000,000	3,640,000,000	3,733,000,000

Table 11. Total Cost (Initial cost) of each GHE

<Unit : KRW>

Designation	Vertical closed loop - I (U)	Modified vertical closed loop (U)	Vertical closed loop - II (D-U)	Geohil (Concentric tube)
Construction cost	2,926,400,000	2,895,600,000	2,886,000,000	2,760,000,000
Equipment & equipment installation	3,900,000,000	3,850,000,000	3,740,000,000	3,833,000,000
Total	6,886,400,000	6,745,600,000	6,626,000,000	6,893,000,000

지반에 적합한 지중열교환기를 제시하기 위해 지열시스템의 열원(지중열원, 지하수), 채움재(벤토나이트, 콩자갈), 열교환 파이프 형태(U, D-U)에 따른 시험시공 및 지중열전도도 측정을 실시하였다. 측정된 지중열전도도와 채움재의 열전도도를 입력변수로 지중열 설계프로그램 해석을 실시하여 공법별 설치 수량을 산정하였다. 또한 실제 시공에 따른 비용 산정을 통해 각 공법별 경제성을 비교하였다. 이를 통해 본 연구 범위 내에서 다음과 같은 연구내용과 결론을 도출하였다.

- (1) 공법별 시험시공 후 열 유체 방식의 현장 열응답 시험 통한 지중 열전도도를 측정결과, 일반수직밀폐형-I(U, 벤토나이트)은 2.46W/m·K, 일반수직밀폐형-II(D-U, 벤토나이트)은 2.48W/m·K, 개량수직밀폐형(U, 콩자갈)은 2.43W/m·K, 함몰방지개방형(Geohil)은 3.34 W/m·K로 측정되었다.
- (2) 탐침법에 의한 채움재의 열전도도 측정결과 벤토나이트 혼합물(벤토나이트 : 실리카 샌트 : 물 = 30 : 40)의 경우 0.98W/m·K, 콩자갈의 경우 1.53W/m·K로 측정되었다.
- (3) 지중열교환기 별 설계프로그램 해석 결과 일반수직밀폐형-I(Single U, 벤토나이트) 472 공(200m 기준), 개량수직밀폐형(Single U, 콩자갈) 456 공(200m 기준), 일반수직밀폐형-II(D-U, 벤토나이트) 444 공(200m 기준), 함몰방지개방형 46 공(500m 기준)이 요구되었다.
- (4) 초기 비용 산정 결과, 일반수직밀폐형-I(U, 벤토나이트) 대비 개량수직밀폐형(U, 콩자갈)의 경우 약 140,000천 원, 일반수직밀폐형-II(D-U, 벤토나이트)의 경우 약 260,000천 원 정도 절감됨을 확인하였으나, 채움재나 열교환 파이프 주입에 따른 시공성 및 시공일수를 고려할 때 경제성을 기대하긴 어렵다.
- (5) Geohil의 경우 3.34W/m·K로 지중열전도도가 낮아 초기 비용이 일반수직밀폐형-I(U, 벤토나이트) 대비 오히려 상승하였다. 이는 열전도도에 영향을 주요 요소인 지하수 취수량이 70m³/day로 일반적인 지반의 취수량(100~150m³/day) 대비 50~70% 정도로 지하수량 부족이 원인인 것으로 판단된다.
- (6) 본 연구 범위내에서 진행한 지중열교환기별 지중열전도도, 설치수량, 초기비용 비교 결과 인천국제공항 3단계건설 매립지반 기준 지열시스템은 수직밀

폐형이 적합할 것으로 사료된다. 아울러 일반수직밀폐형-II(D-U, 벤토나이트)의 시공성 개선 및 시공일수를 단축하기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원의 연구개발사업인 “지중열에너지 전환·활용·저장시스템 설계 및 성능평가기술 개발”과 한국연구재단의 핵심개인연구 지원사업(2013R1A2A2A01067898)으로 수행되었으며, 이에 관계자분들께 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Allan, M.L. and Philippacopoulos, A.J. (1999), “Ground Water Protection Issues with Geothermal Heat Pumps”, *Geothermal Resources Council Meeting*, Reno, NV, p.9.
2. Chang, C. S. (2013), “Geothermal System Construction Practices of New Building for Korea Gas Corporation Headquarters - Using the Modified Vertical Closed Loop Method (Special Manuscript)”, *Journal of the KARSE (Korean Association of Air Conditioning, Refrigeration, and Sanitary Engineers)*, Vol.30, No.05, pp.54-58
3. Cho, N. H., Seo, B. S., Song, J. K., and Lee, S. R. (2013), “Evaluation of Swelling Behavior of Bentonite for Vertical Ground Heat Exchanger”, *KGS Spring National Conference*, Daegu (Korea), pp.1391-1397
4. Cho, J. S. (2006), Study on Grouting Materials for Improving Ground Heat Exchanger Performance. Ministry of Trade, Industry & Energy (Korea), Final Report 2004-N-GE08-P-01.
5. Choi, H. S., Lee, C. H., Choi, H. Y., and Woo, S. B. (2008), “A Study on the Physical Characteristics of Grout Material for Backfilling Ground Heat Exchanger”, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.1, pp.37-49.
6. Lee, J.Y. (2009), “Current Status of Ground Source Heat Pumps in Korea”, *Renewable & Sustainable Energy Review*. Vol.13, Issues 6-7, pp.1560-1568
7. 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.
8. 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”, *Journal of Soil & Groundwater Env.*, Vol.14(3), pp.22-31.
9. Kim, J. Y., Lee, E. J., Chang, K. C., and Kang, E. C. (2008), “A Study on the Measurement of Thermal conductivity of Vertical Borehole heat Exchanger”, *Proceedings of the SAREK 2008 Winter Annual Conference*, Korea, pp.39-34.
10. Park, M. S., Wi, J. H., Lee, C. H., Choi, H. S., and Kang, S. H. (2010), “Study on Cement-based Grout for Closed-loop Vertical Grout Heat Exchanger”, *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol.26,

No.7, pp.107-115.

11. Rafferty, K.D. (2001), "Design Aspects of Commercial Open-loop Heat Pump Systems", *GHC Bulletin*, Vol.22, pp.16-24.
12. Seo, U. J. (2011), "Thermal Response Experimental Results of SCW and Geogil and High Efficiency Deep Borehole Ground Heat Exchangers", *Korea Society of Geothermal Energy Engineers*, Vol. 7(1), pp.24-29
13. 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 the*

Korean Geotechnical Society, Vol.29, No.2, pp.5-14.

14. Yoon, S., Go, G. H., Lee, S. R., and Cho, N. H. (2013), "Evaluation of Heat Exchange Rate of Different Types of Ground Heat Exchangers", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.33, No.6, pp.2393-2400.

Received : August 11th, 2014

Revised : December 24th, 2014

Accepted : May 21st, 2015