건물일체형 지열시스템의 동계 성능 모니터링 연구

유형규*†, 배상환**
*대림산업 기술연구소, **대림산업 기술연구소/연세대학교

Performance Monitoring Study of Building Integrated Geothermal System in Winter

Yu,Hyung-Kyu*†, Bae,Sang-Hwan**
*Daelim Technology Research Institute, Daelim Industrial Co., Ltd.
**Daelim Technology Research Institute, Daelim Industrial Co., Ltd. / Yonsei University

Abstract

The objective of this study is to develope ground heat exchanger using PHC pile used to building foundation, and it's element technology. So we made PHC piles into ground heat exchanger and evaluate it's performance. First, we studied PHC pile type, heat exchanger pipe, grouting materials, and present apartment house's foundation condition for PHC ground heat exchanger. As a result we designed BIGS(Building Integrated Geothermal System) prototype. Second, we applied BIGS to apartment houses' utility building in Osan built by Daelim. Third, we monitored heating performance of winter season. The result of heating performance was so good to apply to heat & cooling system in building.

Key words : PHC Pile, BIPV, BIGS, Ground Heat Exchanger, HeatPump

기 호 설 명

k : 열전도도, [W/m℃]
RT : 냉동톤, [kcal/h]

1. 서 론

지열시스템은 타 신재생에너지와 비교하여 열원공급이 안정적일 뿐만 아니라 건물 냉난방에 직접 적용이 가능하고, 시공 초기 투자비 또한 낮은 장점이 있다. 그러나 여전히 기존 냉난방 설비와 비교하면, 두 배 이상의 초기 투자비가 필요하며, 이 비용의 약 40% ~ 50%는 지중 열교환기 시공을 위한 천공 비용이 차지한다.

국내의 지질 및 한정된 대지면적 등의 여건상 지열시스템의 향후 방향은 건물일체형 태양광발전시스템(BIPV ; Building Integrated Photovoltaic)과 같이 건물과 융합화(BI : Building Integrated)를 통한 건물일체형 지열시스템(BIGS ; Building Integrated Geothermal System)으로의 개발이 적용성과 경제성 등을 고려할 때 가장 타당한 것으로 판단된다.

국내외에서 에너지 파일로 많이 알려진 건물일체형 지열시스템은 지중열교환기 설치를 위해 별도 천공을 하지 않고, 건물 지지에 이용되는 기초

† Corresponding author
Tel: +82-2011-8298; fax: +82-2011-8068
E-mail : yhk2006@daelim.co.kr
접수일 : 2010년 4월 6일
심사일 : 2010년 4월 9일
채택일 : 2010년 5월 18일

또는 구조물을 지중열교환기로 사용하여 연중 일정하고 안정적인 지중의 열원을 건물 냉난방 에너지로 활용하는 기술이다. 장점으로는 건물의 기초를 그대로 활용하기 때문에 천공비용이 절감되고 천공공정이 따로 없기 때문에 공기를 절감할 수 있다. 또한 지하수 처리를 위한 침전조 설치 등 공사를 위한 별도 부지가 필요 없고, 파일공사 이후 정리된 부지를 사용하기 때문에 별도 설치 부지를 확보할 필요 없다. 그러나 단점으로는 기초파일 설계에 따라 지열 용량이 한정된다.

Fig. 1은 PHC 파일 중공을 이용한 건물일체형 지열시스템의 개념과 시공시 단면 모형을 함께 나타낸 것이다.

본 논문에서는 대림산업에서 개발한 PHC 파일 (Pretensioned Spun High Strength Concrete Piles) 중공을 이용한 건물일체형 지열시스템이 적용된 경기도 오산 세마 현장의 시공 과정과 동계 난방운전 모니터링 결과를 통하여 건물일체형 지열시스템의 공동주택 세대 냉난방 적용 가능성을 확인하였다.

2. BIGS의 개발

2.1 BIGS의 설계

대림산업에서 개발한 건물일체형 지열시스템은 신축 공동주택 현장에서 기초로 많이 사용하는 PHC 파일 (Pretensioned Spun High Strength Concrete Piles) 중공에 코일형의 지중열교환파이프를 삽입한 형태로 지중열교환기 설계 상세는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2의 코일형 지중열교환파이프는 지표부근에서는 파이프 간격을 넓게 하고, 지중 하부로 내려갈수록 파이프 간격을 좁게 하여 지중에서 최대한 오랜 시간동안 유체가 머물 수 있도록 설계하였다. 또한 코일형 지중열교환파이프와 PHC 파일의 사이를 벤토나이트 대신 2 mm 내외 입경을 가진 모래로 채우고, 그 사이가 항상 습윤이 될 수 있도록 유출 지하수 또는 시수를 채워 넣을 수 있도록 설계 하였다. 습윤된 모래는 열전도율이 크기 때문에 지중에너지를 보다 빠르게 흡수 또는 방출할 수 있다.

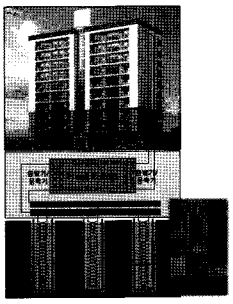


Fig. 1 Concept of BIGS

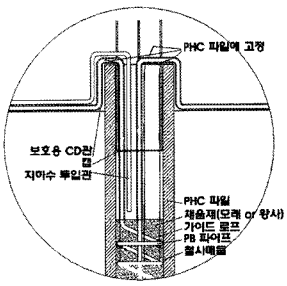


Fig. 2 Details of GHE

2.2 BIGS의 시공

건물일체형 지열시스템의 시공성 및 성능을 평가하기 위하여 대림산업에서 시공 중인 경기도 오산에 위치한 공동주택 주민공동시설에 시험시공을 실시하였다. Fig. 3은 코일형 지중열교환파이프를 시공한 오산세마 공동주택 현장 지열 천공 배치도이며, Fig. 4는 건물일체형 지열시스템의 열원을 공급할 부대시설 건물의 평면도이다. 이 건물 중에서 다목적 회의실의 냉난방에 사용되며, 다목적 회의실은 전체 면적이 115.3 m²으로 천장형 팬코일 6대가 설치되어 있다. Fig. 5는 코일형 지중열교환파이프가 설치된 공동주택 기초 사이트이다. PHC 파일은 10 m 길이로 동일하게 선정하였으며, 코일형 지중열교환파이프는 그라우팅 재료에 따라 PB 22 A 5개, 15 A 5개로 총 10개를 제작하여 시공하였다. Fig. 6은 지중열교환기 시공 장면을 나타낸 것이다. PB 22 A가 15 A보다 시공이 용이하였으며, PHC 파일 10 m 중공에 삽입하는 시간은 약 10분이 소요되었다. 시공된 내부를 관찰한 결과, 하단에서는 파이프 파이프 간격이 좁게, 지표 가까이에서는 넓게 설치된 것을 확인 할 수 있었다. 이후 A, B, C Type에 대해서는 콩자갈, 왕사, 모래 그라우팅 실시 후, 물다짐을 실시하였고, D Type에는 콘크리트를 채웠으며, E Type에는 벤토나이트를 채웠다. 그러나 벤토나이트 그라우팅은 채움과 동시에 파이프가 부력에 의해 위로 떠올라 파이프 내를 물로 채워 넣어야 했으며, 이로 인해 시공성이 매우 떨어졌다. PB 22 A에는 상중하로 열전대(Thermocouple)를 설치하여 각각의 지중열교환기 열전도율 실험 기간 동

한 주변 지중열교환기의 온도 변화를 관찰하였다. Fig. 7은 지중열교환기 배관을 지열기계실로 인입하여 보온을 완료한 모습이다. 지중열교환파이프는 기계실까지 일대일 배관으로 시공하였다. Fig. 8은 인입된 지중열교환파이프를 5RT급 지열히트펌프에 연결한 모습이다. Table 1은 오산세마 현장에 시공한 지중열교환기 제원, 히트펌프 및 순환펌프의 사양을 정리한 것이다.

2.3 BIGS 지중열교환기의 열전도도

열전도도 테스트는 시공성이 우수한 PB 22 A에 한해서 실시하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다. 그라우팅 재료로 입도 5 mm 이상의 콩자갈을 시공한 A Type은 지중열교환파이프의 유량 흐름에 문제가 발생하여 결과를 도출하지 못하였다. 그러나 왕사 또는 모래 그라우팅을 습윤상태로 유지한 B와 C Type의 열응답 특성이 가장 우수한 것으로 나타났으며, 콘크리트를 그라우팅으로 사용한 D Type과 벤토나이트를 그라우팅으로 사용한 E Type은 열응답 특성은 상대적으로 매우 떨어지는 것으로 나타났다. 기존 수직밀폐형 지중열교환기의 지중 열전도도가 일반적으로 2 ~ 3 W/m℃ 또는 그 이하임을 감안할 때 본 연구의 결과는 매우 고무적이다. 열전도도 테스트를 실시하지 않은 PB 15 A의 경우, PB 22 A와의 단면적이 약 1/2배로 작기 때문에 열전도도 성능은 상기 결과보다 현저히 낮을 것으로 예상된다. 또한 PB 15 A 시공과정에서 코일형 배관이 서로 꼬이고, 자중이 비교적 가벼워 PHC 파일 내부로 삽입이 용이하지 못한 단점이 나타났음으로 개발 대상에서 제외하였다.

3. BIGS의 동절기 모니터링 결과

오산세마 현장 부대시설의 다목적 회의실은 지열시스템 시공 완료 후인 2009년 9월 이후 현재까지 난방 가동 중이다. Fig. 5는 2009년 12월 8일 ~ 2010년 1월 9일까지 동계시 한달간의 난방 운전 이력을 나타낸 것이다. 지중열교환기로 흐르는 유량은 지중열교환기 1개당 약 9 ~ 10 LPM으로 전체 96 LPM이 흐르도록 하였다. 이 난방 운전 데이터를 운전모드에 따라 4개 기간으로 나누어 Fig. 6 ~ 9에 나타내었다. Fig. 6은 시스템을 처음 가동하여 실내온도를 30℃까지 상승시키는 기간(A)을 나타낸 것이다. 히트펌프를 가동해서 종료시까지 실내온도가 꾸준히 상승하고 있으며, 1차측 지중열교환기와 2차측 실내부하부에서 각각 평균 1.58 ℃, 1.51 ℃로 지속적으로 열교환을 하고 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 A 기간 이후 순환펌프는 계속 가동시킨 상태에서 On-Off 운전을 반복한 기간(B)이다. 그래프에서 볼 수 있듯이, 히트펌프 Off시 1차측 지중열교환기 유체 온도가 상승하고, 히트펌프 On시 1차측 온도가 하강하는 것을 볼 수 있으며, 이에 따라 2차측 실내난방공급 온도에도 변화가 나타나는 것을 알 수 있다.

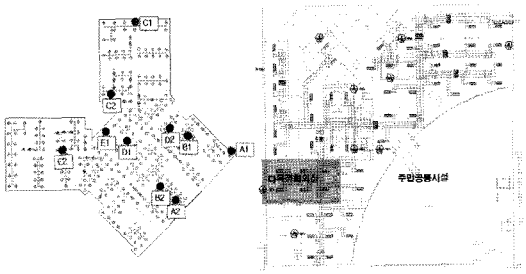
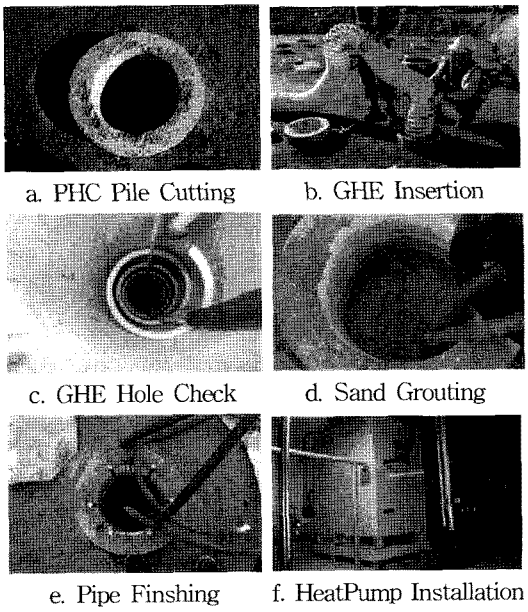


Fig. 3 Plan of Test Area & Building



a. PHC Pile Cutting b. GHE Insertion

c. GHE Hole Check d. Sand Grouting

e. Pipe Finshing f. HeatPump Installation

Fig. 4 Construction Procedure

Table 1. Specification of Whole System

Ground Heat Exchanger	Material	PB (Poly Butylene)
	Pipe Diameter	22 A, 15 A (each 5ea)
	Length	196 m
	Heat Exchanger Diameter	300 mm
	Pitch control	Weight + Rope
	PHC pile Dia	450 mm
	PHC pile Length	10 m
	Grout	A Type : gravel 5 mm above B Type : grit 2 mm ~ 5 mm C Type : sand 2 mm below D Type : concrete E Type : bentonite & Water supply pipe : 25 mm
	Performance	32 ~ 36 W/m·k above
Heat Pump	Capacity Power	Cooling 7.2 RT, Heating 5.6 RT Cooling 6.0 kW, Heating 5.7 kW
Circulation Pump	Flow, Power	Source : 2.2 kW, 96 LPM * 2ea Load : 1.5 kW, 96 LPM * 2ea
Indoor Unit	FCU	Heating : 3,480 kcal/h * 4 ea 1,820 kcal/h * 2 ea

Table 2. Thermal Conduction by Line Source Method

	Thermal Conductivity(k)	Remark
A Type	-	grit 5 mm above
B Type	32.328 W/m℃	grit 2 mm ~ 5 mm
C Type	36.496 W/m℃	sand 2 mm below
D Type	27.796 W/m℃	concrete
E Type	19.565 W/m℃	bentonite

Table 3. Summary of Test Result

	Ground Unit					Indoor Unit				
	Outdoor	G-S	G-R	Δt		Indoor	HW-S	HW-R	Δt	
				Max	Ave.				Max	Ave.
A	10.41	7.80	9.38	5.65	1.58	28.14	43.43	41.91	4.51	1.51
B	-0.80	10.03	10.87	4.29	0.84	25.90	44.49	43.69	3.77	0.80
C	0.66	13.31	13.53	2.44	0.23	22.50	43.97	43.73	2.68	0.23
D	-2.83	9.36	10.54	5.17	1.18	27.59	44.37	43.43	3.86	0.94

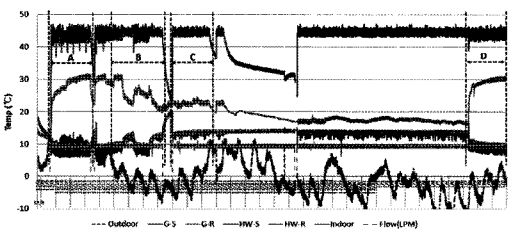


Fig. 5 Data of Winter Season (2009.12 ~ 2010.1)

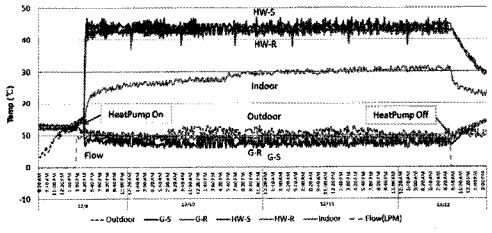


Fig. 6 Data of A Block (12/9~12/12)

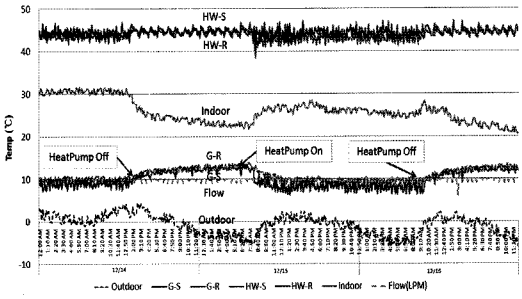


Fig. 7 Data of B Block (12/14~12/16)

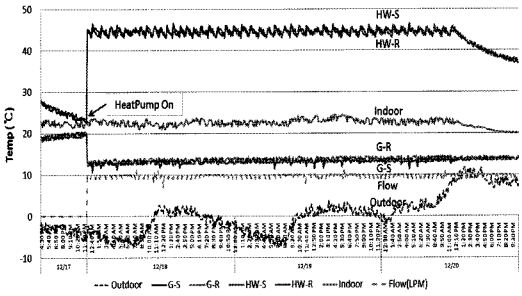


Fig. 8 Data of C Block (12/17~12/20)

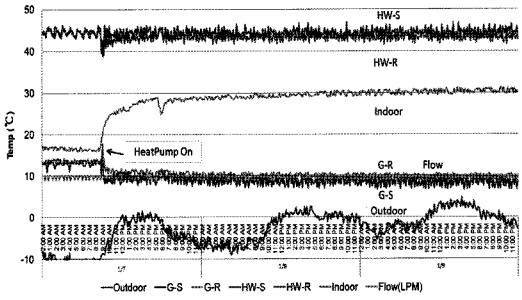


Fig. 9 Data of D Block (1/7~1/9)

히트펌프 작동 전인 12월 초의 지중열교환기의 온도는 평균 14 ℃, B 기간에서 히트펌프 가동 중

의 지중열교환기 온도는 10 ℃까지 내려갔으나, 히트펌프 정지 이후 재가동까지 평균 12.5 ℃로 회복되었다. Fig. 8은 실내온도를 22 ~ 23 ℃로 일정하게 유지시킨 기간(C)으로 히트펌프 가동시 1차측 지중열교환기의 온도가 열교환으로 인해 급격히 하강하는 것을 볼 수 있다. 이후 3일간 난방을지속했음에도 1차측 지중열교환기 온도는 급격한 재하강 없이 꾸준히 열교환하고 있는 것으로 나타났다. Fig. 9는 외기 온도가 영하 이하로 떨어지는 시기에 Fig. 10과 같이 실내온도를 30 ℃로 재상승 시킨 기간(D)을 나타낸 것이다. A 기간보다 외기온도가 현저히 낮고, 실내온도를 30 ℃ 이상 승온했음에도 지중열교환는 일정하게 열교환되고 있음을 확인할 수 있다.

이상 동계시 모니터링 결과 건물일체형 지열시스템의 성능은 매우 우수한 것으로 평가되었다. 영하의 외기온에도 실내온도를 급격히 상승 시켜도 지중열교환기의 온도는 안정적으로 열교환되고 있는 것을 확인할 수 있었으며, 운전이 중지되면 빠른 속도로 지중열교환기의 온도가 회복되었다. 현재 지중열교환기 파이프를 ISO 25호로 증가하여 열교환파이프를 성형하였으며, 이를 사용할 경우, 지중열교환기의 성능은 오산세마 현장에 비해 더욱 크게 향상 될 것으로 기대된다. 상기 4개 그래프에서 1차측인 지중열교환기와 2차측인 실내부하측의 평균 온도 및 각 부위의 온도차를 요약하면 Table 3과 같다.

4. 공동주택 세대 지열시스템 표준화

지열시스템을 세대 내에 적용하는데 있어 가장 큰 걸림돌이었던 누진세는 2009년 5월 이후 폐지되었다. 그러나 아직까지 공동주택에서 지열시스템의 적용은 관리사무소, 경로당, 또는 주민공동시설 등 단지 내 공용부에 적용하는데 그치고 있다. 지열시스템을 보다 효율적으로 사용하고 저변 확대를 이루기 위해서는 공동주택 세대 내에 적용하는 방안을 다양하게 검토하고 시도하여야 한다.

이를 위하여 국내의 일반적인 공동주택을 110 m^2 규모, 4호 조합 20층을 1개동으로 가정하고, 이에 필요한 지열시스템 용량, 도면 표준화, 시공지침 및 가이드라인 계획하였다.

우선 RTS법(Radiant Time Series)을 이용하여 Fig. 10과 같이 최대부하를 계산하고, 이를 바탕으로 Table 4의 운영단계에 따른 동시사용률을 추정하여 최대부하 산출하였다. 이 경우 최소 40 RT, 평균 80 RT, 최대 120 RT로 계획안을 도출하였다. 위의 기본 사항을 바탕으로 빈(Bin)법에 의한 연간 에너지 소비량을 분석한 결과, 연간 냉방부하 101.33 Gcal/year가 발생하는 반면 연간 난방부하는 396.17 Gcal/year로 난방부하의 비중이 매우 클 것으로 예상되었다. 이는 향후 지중열교환기의 운전 스케쥴 조절을 통하여 지중열교환기의 열균형을 맞출 필요가 있으며, 따라서 이와 관련한 제어 기술 확보가 필요하다.

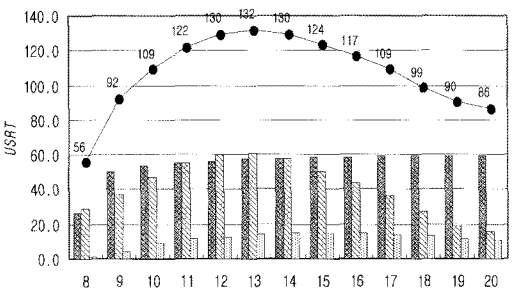


Fig. 10 Plan of Experimental Chamber

Table 4. Schedule of Living Type

	Room1	Room2	Room3	Living/ kitchen	Sum	Ratio	Coolin Capacity
Area(m^2)	25.00	13.20	11.70	44.40	94.30	1.00	RT
elementary	0.20	0.20	0.20	0.75	43.28	0.46	60.63
elementary, for leisure	0.20	0.10	0.10	0.50	29.69	0.31	41.59
elementary, for resident	0.50	0.75	0.75	0.75	64.48	0.68	90.32
mid & high	0.20	0.50	0.50	0.75	50.75	0.54	71.09
mid & high, for leisure	0.20	0.25	0.25	0.50	33.43	0.35	46.82
mid & high, for resident	0.50	0.75	0.75	0.75	64.48	0.68	90.32
Full load	0.90	0.90	0.90	0.90	84.87	0.90	118.89
Weekend _Ave.	0.39	0.49	0.49	0.70	53.00	0.56	74.24

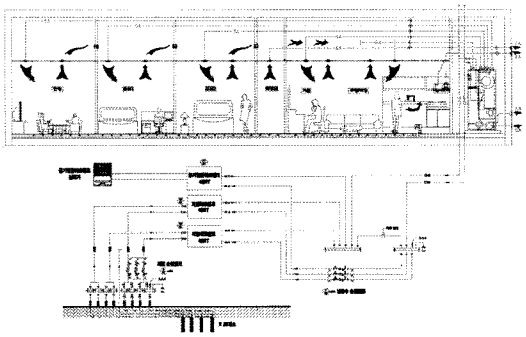


Fig. 11 System Diagram(AHU)

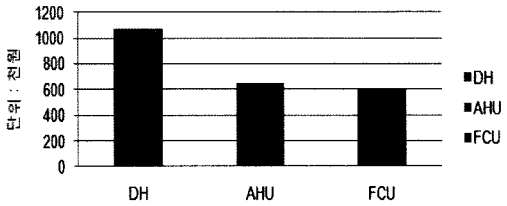


Fig. 12 Energy expenses : District Heating vs Geothermal (AHU & FCU)

세대 내 시스템 구성은 지열히트펌프 + 세대 공조기(Fig. 10)와 지열히트펌프 + 세대 FCU를 표준화하였다. 위 두 가지 대안시스템을 지역난방 + 세대 EHP를 사용하는 경우와 비교하여 에너지 소비량을 시뮬레이션 한 결과, 지열히트펌프 + 세대 공조기사용은 지역난방 대비 약 39.6%의 에너지 비용절감이 가능한 것으로 나타났으며, 지열히트펌프 + 세대 FCU는 공조기 사용과 비교하여 약 7.5% 에너지 비용을 추가로 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 대림산업에서 개발한 건물일체형 지열시스템의 시공 후 동계 난방 성능 모니터링 결과를 평가하고 이를 통해 향후 공동주택 세대에 지열시스템의 적용하기 위한 기본 계획을 수립하였다.

시험 시공된 지중열교환기에도 불구하고 현재 모니터링 결과는 매우 우수한 것으로 나타났다. 향후 공동주택에 건물일체형 지열시스템을 보다 안정적으로 사용하기 위해서는 소규모 현장에 다양하게 적용되어 오랜 기간의 성능 검증을 거칠 필요가 있다. 또한 코일형 지중열교환기에 대한 유체해석 기술에 대한 확보를 통하여 성능 예측을 위한 프로그램의 개발이 필요하다.

현재 건물일체형 지열시스템은 부천 역곡 e편한세상, 신당 e편한세상, 용산신계 e편한세상, 평택 군시설공사, 국책과제 송도 Pilot Project 등에 적용되어 있으며, 향후 지속적인 모니터링을 통하여 시스템 장기 운전에 따른 지중열교환기의 열성능 데이터를 꾸준히 확보할 계획이다.

향후 PHC 파일 외 다양한 기초와 구조물을 이용한 지중열교환기가 개발되어 우리나라와 같이 고밀도로 개발되는 국토에 맞는 다양한 지열시스템의 실적용 연구가 필요하다.

참고문헌

1. 유형규, PHC 파일 기초를 이용한 지중열교환기 개발 및 성능평가, 한국태양에너지학회 논문집, v.28 n.5 (2008-10)
2. 백성권, 안형준, 임성균, 구조물 하부형 지중열교환기 개발 연구, 대한설비공학회 하계학술발표회 논문집 (2007-06)
3. 남유진, 황석호, Ryozo Ooka, Yosuke Shimawaki, Kentaro Sekine, 건물기초를 이용한 지중열 공조시스템의 개발에 관한 연구 (1), (2), 대한설비공학회 동계학술발표회 논문집 (2005-11)