대한설비공학회 2005동계학술발표대회 논문집 pp. 148~154

05-W-023

건물 기초를 이용한 지중열 공조시스템의 개발에 관한 연구 (1)

황 석 호†, 오오카 료죠*, 남 유 진, 세키네 켄타로**, 요코이 무츠미**, 시바 요시로***
동경대학교 대학원, 동경대학교 생산기술연구소*, (주)타이세이 건설**, (주)제너널 히트펌프***

A Study on Development of a Ground-Source Heat Pump System Utilizing Pile Foundation of a Building

Suck-Ho Hwang†, Ryozo Ooka*, Yu-jin Nam, Kentaro Sekine**, Mutsumi Yokoi**, Yoshiro Shiba***

ABSTRACT: Ground-source (Geothermal) heat pump (GSHP) systems can achieve a higher coefficient of performance than conventional air-source heat pump (ASHP) systems. However, GSHP systems are not widespread in Japan because of their expensive boring costs. The authors have developed a GSHP system that employs the cast-in-place concrete pile foundations of a building as heat exchangers in order to reduce the initial boring cost. In this system, eight U-tubes are arranged around the surface of a cast-in-place concrete pile foundation.

The heat exchange capability of this system, subterranean temperature changes and heat pump performance were investigated in a full-scale experiment. As a result, the average values for heat rejection were 186~201 W/m (per pile, 25 W/m per pair of tubes) while cooling. The average COP of this system was 4.6 while cooling; rendering this system more effective in energy saving terms than the typical ASHP systems. The initial cost of construction per unit for heat extraction and rejection is ¥72/W for this system, whereas it is ¥300/W for existing standard borehole systems.

Key words: Ground-source heat pump(지열히트펌프시스템), Cast-in-place concrete pile foundation(현장타설형 기초말뚝), Field Experiment and cost analysis(현장실험과 비용분석)

1. 서 론

지열히트펌프시스템은 지중의 풍부한 축열능력을 이용하여, 냉방에는 토양을 히트펌프의 히트싱크로 이용하고 난방에는 히트소스로 이용함으로써 계절간 축열효과를 이용할 수 있으며, 에너지 절감 및 이산화탄소 절감에 공헌할 수 있는 공조시스템이다. 또한, 건물의 공조시스템에서 발생하는 열을 대기중으로 배출하지 않기 때문에, 도시의 열섬효과를 완화시키는데도 기여한다.

이러한 지열히트펌프시스템은 북미나 북유럽에서 널리 도입되고 있으며, 일본의 경우도 이전부터 연구를 진행되고 있으며[1,2], 적용사례도 점점 증가하고 있다. 그러나 지중열교환기의 매설을 위한 지반의 굴삭비용이 북미나 북유럽에 비해 높기 때문에 지열히트펌프 시스템의 초기투자비의 증가로 인해, 단순투자회수기간의 측면에서 기존의 공조시스템에 비해 불리하여 널리 보급되지 못하고 있다.

최근, 지중열교환기의 설치를 위한 지반굴삭비용의 절감을 위해 건물의 기초말뚝을 지중열교환

† Corresponding author
Tel.: +81-3-5452-6434; fax: +81-3-5452-6432
E-mail address: shhwang@iis.u-tokyo.ac.jp

기로 이용하는 시스템이 제안되고 있고[3,4], 몇몇 시험건물들이 운용되고 있다. 하지만, 아직까지는 그 열적성능에 대한 불확실한 부분이 많고, 설계 및 시공방법, 투자효과 등에 대한 연구가 진행중에 있다. 또한 지금까지 도입 및 검토되고 있는 적용사례의 대부분은 중·소규모의 건물을 대상으로 한 기성말뚝(PHC말뚝 또는 강관말뚝)을 이용한 시스템뿐이다.

한편, 도심부의 대규모의 건물들은 기성말뚝의 반입에 따른 운반 및 기초말뚝공사의 비용문제로 인해 현장타설형 기초말뚝을 많이 사용하고 있다. 따라서 지열히트펌프시스템을 도심부의 건물에도 도입하기 위해서는 현장타설형 기초말뚝을 이용한 지중열원히트펌프 시스템의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 현장타설형 기초말뚝을 지중열교환기와 병용한 지열히트펌프시스템을 개발하고, 실험을 통한 성능실험의 결과 및 기존의 보어홀(borehole)방식의 지중열교환시스템과의 경제성분석을 수행하였다.

2. 지중열교환기의 개요

Fig. 1은 현장타설형 기초말뚝을 이용한 지중열교환기의 개념을 나타내고 있다. 직경이 1500 mm인 현장타설형 기초말뚝의 외주부에 U자형 열교환튜브(U튜브)를 8개 설치하였다. U튜브는 현장타설형 기초말뚝의 구조용 철근에 고정하여, 굴착공에 넣으며, 그 후에 콘크리트를 타설하고 통상의 기초말뚝과 같이 기초로서 이용함과 동시에 지중열교환기로도 이용한다. U튜브를 기초말뚝내부가 아니라 외주부에 설치하기 때문에 구조

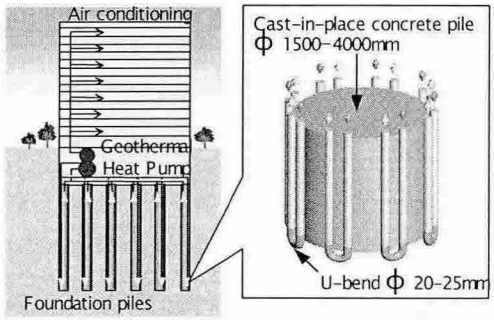


Fig. 1 Outline of the heat exchanger system using cast-in-place concrete piles.

설계상의 단면결손이 없으며, 기초말뚝의 직경에도 차이가 없게 된다. 또한, 콘크리트부재 및 강도등도 기존의 기초말뚝과 동일한 것을 이용하면서 지중열교환기를 설치하는데 소요되는 비용을 절감할 수 있게 된다.

3. 실험개요

3.1 실험목적

현장타설형 기초말뚝을 이용한 지중열교환기의 열적성능과 지중열원히프펌프의 운선성능을 파악하는 것을 목적으로 실험장치를 구성하여 냉난방 실험을 수행하였다 (Fig. 2 참고).

3.1.1 지중열교환기

지중열교환기는 현장타설형 기초말뚝(기초말뚝 직경 1500 mm) 2개 사용하고, U튜브를 기초말뚝 주위에 배열하는 방법으로 하였다. 하나의 기초말뚝에 U튜브(외경34.0 mm, 내경28.8 mm)을 8개 설치하였다. 기초말뚝의 간격은 일반적인 건물의 표준 스팬인 6m을 가정하여 설치하였다. Fig. 3은 현장타설형 기초말뚝에 U튜브를 설치하는 과정을 보여주고 있다.

3.1.2 히트펌프 및 실내공조시스템

히트펌프는 냉각능력 4.6 kW, 가열능력 5.7 kW의 수냉식 히트펌프를 설치하였다. 실험실은 각각 팬코일유닛트(2대: 냉각능력 3.5 kW, 가열능력 4.4 kW)와 복사냉난방패널을 설치하였다.

3.2 측정항목실험결과 처리 방법

지중온도분포 및 지중열교환기의 U튜브 표면온도는 T형 열전대로 측정하였다. 냉각수와 열원수의 온도는 백금측온저항체를 이용하여 측정하였다. 또한, 시스템의 전력사용량과 외기온, 상대습도, 풍속과 풍향, 일사, 대기압, 우량등도 연속적으로 기록하였다.

3.3 운전방법

운전스케쥴은 일반적인 사무소건물을 가정하여 월요일부터 금요일까지 9:00부터 18:00까지 운

Geothermal heat pump
Cooling : 4.6 kW
(cold water : 12 / 7 ℃,
cooling water : 30 / 35 ℃)
Heating : 5.7 kW
(hot water : 40 / 45 ℃,
heat source water : 14 / 7 ℃)
Electric consumption :
1.6 kW(cooling),
1.8 kW(heating)
Refrigerant : R407C

Cold and hot water pump
Flow : 33 L/min, head : 12m,
electric motor output : 0.25 kW

Heat source water pump
Flow : 33 L/min, head : 25m,
electric motor output : 0.75 kW

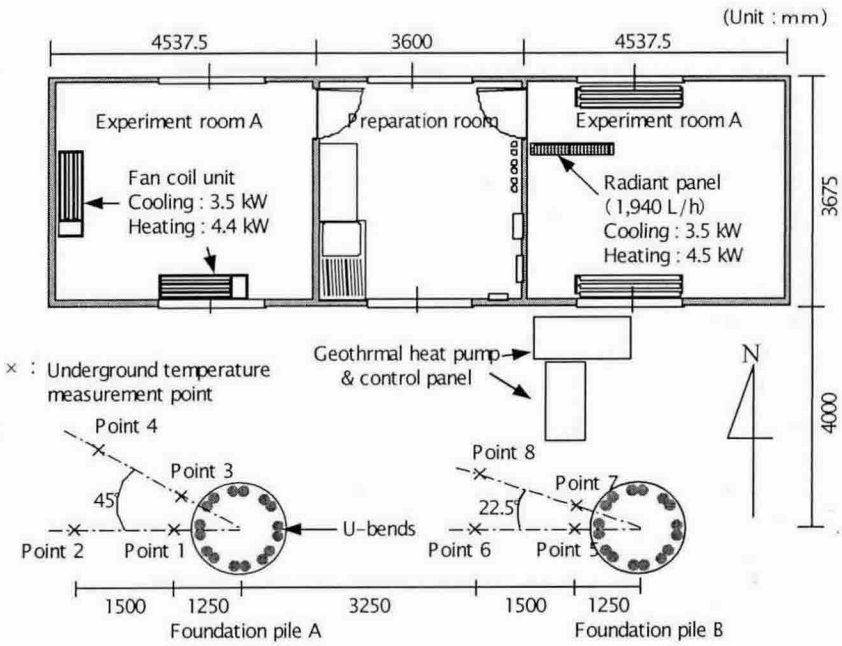


Fig. 2 Plan of the Experimental Institution and System configuration.

전하였으며, 토요일과 일요일에는 운전을 하지 않는다. 또한, 수냉식히트펌프을 최대능력으로 운전되게 하기 위해서 실내에 인공부하(룸에어컨: 냉각 2.5 kW, 가열 2.8 kW)을 설치하였다.

냉방운전은 2004년 6월 16일부터 9월30일까지, 난방운전은 12월1일부터 2005년 4월1일까지 수행하였다.

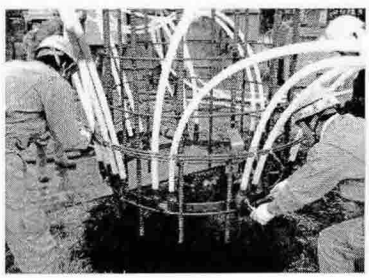


Fig. 3 U-tube installation.

4. 실험결과

4.1 냉방실험결과

4.1.1 지중열교환기

Fig. 4는 냉방실험중의 열원수온도와 외기온도의 관계를 보여준다.

실험을 시작한 6월16일 9:00의 열원수 온도는 약 19℃였다. 실험개시후, 열원수온도는 점점 상승하여 8월21일 16:00에는 29.2℃가 되어, 실험개시후부터 약 10℃가 상승하였다. 8월21일에 열원수 온도가 수냉식히트펌프의 냉각수온도설정(30℃)를 넘을 가능성이 있었기 때문에 기기보존과 COP저하방지를 위해 인공부하의 운전을 중지하여 실험을 진행하였다.

수냉식히트펌프의 운전중의 평균외기온도는 28.8℃, 최고치는 37.2℃이였다. 한편, 열원수 온도의 평균은 26.0℃, 최고치는 29.2℃이였으며, 외기온도와 비교하여 평균적으로 약 2.2℃, 최고치는 8.0℃정도 낮은 결과를 보였다.

4.1.2 지중열교환기의 성능

Fig. 6은 각각의 기초말뚝에서 지중으로의 방열량의 그래프이며, Table 1에서는 운전기간중의 평균방열량을 보여준다.

실험기간중의 방열량의 최대치는 277 W/m(기초말뚝B)이며, U튜브 1개에서는 34.6 W/m의 방열량을 보였다.

인공부하를 중지한 8월21부터 9월30일까지는 공조부하가 감소하여 수냉식히트펌프가 부분부하 상태에서 운전을 하였기 때문에 119 W/m(기초말뚝A), 136 W/m(기초말뚝B)로 감소하였다. 그러나 냉방기간 전체평균은 173 W/m(기초말뚝A),

Table 1 Period average heat rejection rate into the ground(cooling).

	Jun.	Jul.	Aug.	Aug.	Sep.	Total
Artificial cooling load	○	○	○	×	×	
Heat generation rate[kWh]	512	1091	597	159	455	2,813
Heat pump power consumption[kWh]	92	216	139	44	126	617
Pump Power consumption[kWh]	82	175	108	152	162	580
COP	5.6	5.1	4.3	3.6	3.6	4.6
S.COP	2.9	2.8	2.4	1.7	1.6	2.4

Table 2 Period average coefficient of performance(cooling).

Period	Operation method	Pile	Cooling				
			HP→Soil [℃]	Soil→HP [℃]	Δt [℃]	Flow rate [L/min]	Heat extraction rate [W/m]
6/16~8/20	On artificial cooling load	A	28.3	26.1	2.2	27.4	206.0
		B	28.3	26.0	2.3	27.3	221.2
8/21~9/30	Off artificial cooling load	A	26.8	25.6	1.2	27.5	119.5
		B	26.8	25.4	1.4	27.4	136.4
6/16~9/30	-	A	27.7	25.9	1.8	27.4	173.3
		B	27.8	25.8	2.0	27.3	189.1

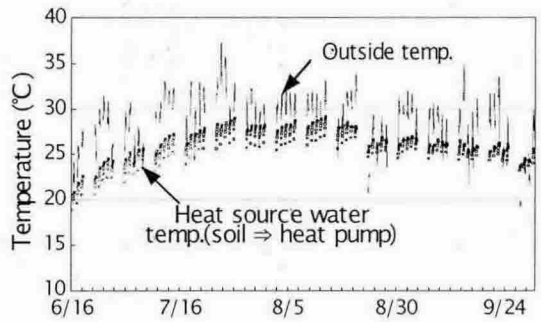


Fig. 4 Outside and heat sink water temperature.

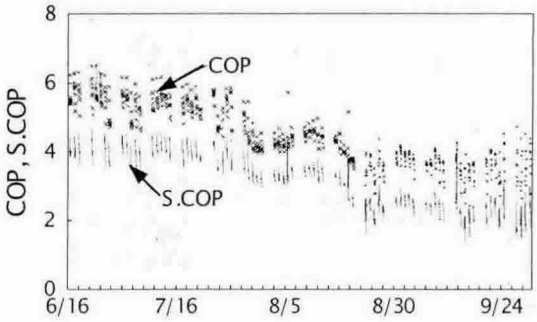
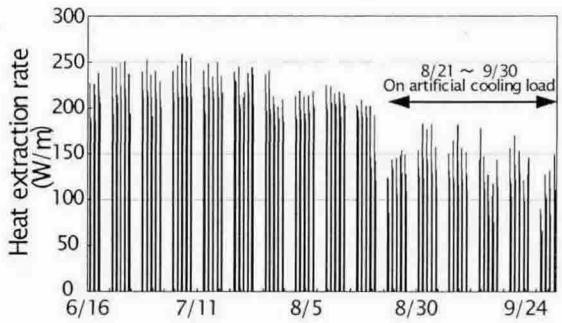
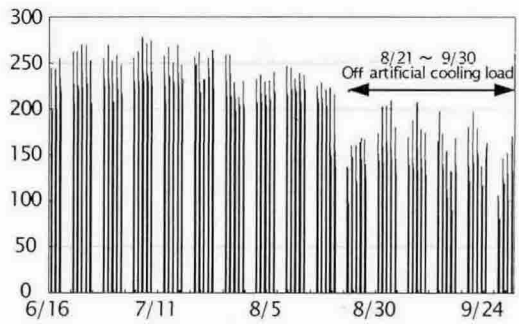


Fig. 5 Coefficient of performance(cooling).



(a) Foundation pile A



(b) Foundation pile B

Fig. 6 Heat rejection rate into soil(cooling)

189 W/m(기초말뚝B) 의 방열량을 나타냈다.

4.1.3 히트펌프의 효율

Fig. 5은 냉방기간의 수냉식히트펌프만의 성적계수(COP) 및 열원수펌프의 동력을 포함한 시스템의 성적계수(S.COP)을 보여주며, Table 2는 냉방기간의 월별평균 COP를 보여주고 있다.

냉방실험개시직후의 열원수온도가 상대적으로 낮은 6월에는 COP가 5.6으로 높았으나, 열원수온도가 높아짐에 따라 COP가 점점 낮아져서 9월에는 3.6이 되었다. 그러나, 냉방기간전체의 평균COP는 4.6으로 일반적인 공기식히트펌프시스템(COP 3.0)에 비해 에너지 성능이 좋음을 확인할 수 있었다.

Table 3 Period average heat rejection rate into the ground(heating).

Period	Operation method	Pile	Cooling				
			HP→Soil [℃]	Soil→HP [℃]	Δt [℃]	Flow rate [L/min]	Heat extraction rate [W/m]
12/1~12/15	2 pile daytime	A	15.2	15.9	0.7	26.5	70.0
		B	15.1	15.7	0.6	26.7	52.5
12/16~1/26	2 pile nighttime	A	8.6	9.8	1.2	26.2	114.8
		B	8.5	9.7	1.2	26.5	106.4
1/27~2/22	1 pile	B	5.8	7.0	1.2	49.9	211.9
2/23~4/1	1 pile flow rate modify	B	6.3	8.5	2.2	24.5	182.4

Table 4 Period average coefficient of performance(heating).

	12/1~12/15	12/16~1/26	1/27~2/22	2/23~4/1	Total
Number of operation piles	2	2	1	1	
Operation time	daytime	nighttime	nighttime	nighttime	
flow rate modify	×	×	×	○	
Heat generation rate[kWh]	386	2,242	597	691	3,916
Heat pump power consumption[kWh]	99	522	117	142	880
Pump Power consumption[kWh]	91	345	94	115	645
COP	3.9	4.3	5.1	4.9	4.5
S.COP	2.0	2.6	2.8	2.7	2.6

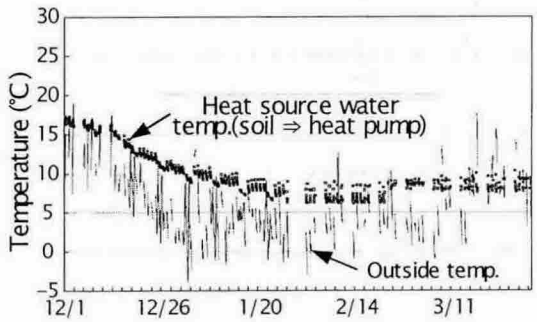


Fig. 7 Outside and heat sink water temperature

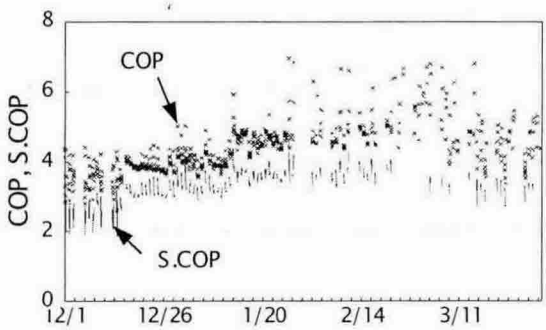
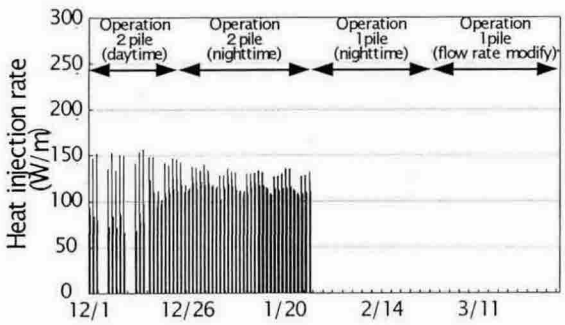
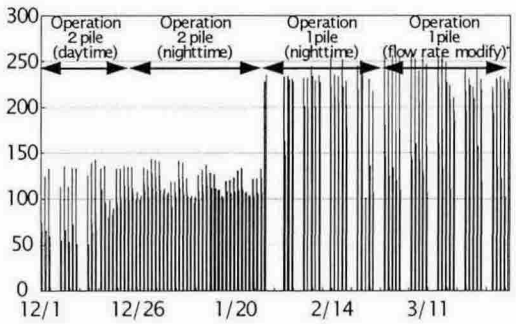


Fig. 8 Coefficient of performance(heating).



(a) Foundation pile A



(b) Foundation pile B

Fig. 9 Heat rejection rate into soil(heating)

4.2 난방실험결과

4.2.1 열원수온도

Fig. 7은 난방실험중의 열원수온도와 외기온도의 관계를 나타내고 있다.

난방을 개시한 12월1일 9:00의 열원수온도는 약 17℃이며, 실험개시후 점점 낮아지기 시작한다. 기초말뚝 1개의 운전을 정지한 1월27일에는 약 6℃가 되어, 처음보다 약 11℃의 온도가 낮아졌다. 외기온도의 평균은 6.0℃, 최저온도는 -3.

9℃이며, 열원수온도는 평균 10.1℃, 최저온도는 6.2℃로 평균적으로 약 4℃, 최저온도는 10℃가 외기온도보다 높았다.

4.2.2 지중열교환기의 성능

Fig. 9는 각각의 기초말뚝에서 지중으로의 채열량을 보여주며, Table 3에 운전기간의 평균값을 보여준다.

2004년 12월1일부터 난방운전을 시작하였으나, 난방부하가 작았기 때문에, 수냉식히트펌프가 부분부하운전을 하여, 기초말뚝의 채열량이 적게 나타났다. 12월16일부터는 운전효율을 높이기 위해 운전시간을 주간에서 야간으로 변경하였으며, 1월27일부터는 기초말뚝의 최대채열량을 확인하기 위해 기초말뚝A의 채열을 중지하고, 기초말뚝B만을 가지고 운전을 하였다. 또한, 2월23일부터는 열교환기의 유량을 조정하여 실험하였다. 그 결과 실험기간중의 최대채열량은 261 W/m(기초말뚝B)이였고, U튜브 1개당은 32.6 W/m였다.

냉방 및 난방실험의 결과 본 시스템의 최대 채·방열량은 260~280 W/m (U튜브 1개 32~35 W/m) 이며, 기간 평균은 약 180~200 W/m의 능력이 있음을 확인하였다.

4.2.3 히트펌프효율

Fig. 8은 난방기간의 수냉식 히트펌프만의 성적계수(COP) 및 열원수펌프의 동력을 포함한 시스템의 성적계수(S.COP)을 보여주며, Table 4는 난방기간중 운전방식에 따른 효율을 보여준다. 난방실험개시후의 12월1일부터 15일까지는 열원수온도가 높았으나, 난방부하가 작았기 때문에 COP가 3.9로 낮았다. 야간운전을 함으로써 부하조건이 안정적이던 12월16일 이후에는 열원수온도가 점점 낮아졌으나, 수냉식히트펌프의 운전효율이 좋아져서 COP가 4.3으로 높게 나왔다. 또한, 기초말뚝 1개만을 운전하였던 1월27일 이후는 5.1을 보이고 있다. 난방실험은 다양한 패턴으로 운전하였기 때문에 기간의 평균값은 단순한 참고용으로써 4.5임을 알 수 있었다.

5. 채·방열량당의 초기비용

지열히트펌프시스템의 보급 및 실용화를 위해서는 지중열교환기의 매설비용의 절감이 중요한 문제이다. 본 장에서는 시스템의 초기투자비용을 파악하기 위해서 실제 적용 사례를 이용해서 시공비용에 대한 분석을 수행하였다.

본 시스템이 적용된 건물은 치바현(동경의 동쪽지역)에 위치한 교육용 건물이며, 1층 출입구부분(약 100 m^2)의 아트리움을 공조(냉각 2.5 kW, 가열 2.8 kW)하기 위한 열원으로써 현장타설형 기초말뚝(직경 1.5 m, 길이 18 m, 1개)에 열교환

Table 5 Construction cost of cast-in-place pile foundation heat exchanger.

	Unit cost	Quantity	Total
Cost of pipe [8 units]	¥600/m	18m	¥86,400
Piping construction cost [¥/m]	¥2,200/(person×hour)	16person×hour	¥35,200
Incidental expenses	10% of piping construction cost		¥3,520
Pile construction cost (increment) [¥/m]	¥91,350 /hour	1.5hour	¥137,025
Total cost of construction of case-in-place pile heat exchanger [¥/m]			¥262,145
Total cost of unit length			¥14,564/m

Unit price for piping construction : ¥2,200/(person×hour)=¥17,600/day*1÷8hour*4
Unit price for pile construction : ¥91,350/hour=¥20,300/m*2×36m*3÷8hour*4
*1 2005 Public construction labor cost table (Tokyo)
*2 Earth drill method φ1500×25m(Tokyo)
*3 Construction 2 pile foundation per day (36m)
*4 Labor time per day : 8hour

Table 6 Comparison of investment cost.

Form of heat exchange	Borehole type	Proposed system (Cast-in-place concrete pile type)
	(Single U-tube)	(8 pairs of U-tubes)
Heat extraction and rejection per unit of heat exchange [W/m]	40	200
Boring costs [¥/m]	10,000	-
Piping costs [¥/m]	2,000	-
Additional costs for foundation & piling work [¥/m]	-	-
Total cost [¥/m]	12,000	14,564
Total cost per extraction and rejection heat unit [¥/W]	300	72

용배관(PE100 U튜브 20A, 8개)을 설치한 지열히트펌프시스템을 시공하였다.

열교환형 기초말뚝은 배관을 기초말뚝 주변에 결속시키며 공사를 하기 때문에 통상의 기초말뚝에 비해 공사시간이 1.5시간 증가하였다. 또한, 열교환용배관의 결속 및 지지를 위한 인력이 필요하여 16인·H 이 증가하였다. Table 5는 이것을 바탕으로 산출된 열교환형 기초말뚝의 공사비를 보여준다. 열교환형 기초말뚝의 공사를 위해서 통상적인 기초말뚝에 비해 약 ¥1,5000/m의 초기비용의 증가됨을 알 수 있었다.

일반적으로 사용되고 있는 보어홀시스템(Single U튜브)과 제안된 현장타설형 기초말뚝을 이용한 시스템의 초기투자비를 비교하였다(Table 9 참고). U튜브 1개당 채열량은 40 W/m 로 가정하였으며, 굴삭비용은 일본에서 일반적으로 사용되고 있는 ¥10,000/m를 이용하였다. 현장타설형 기초말뚝을 병용한 시스템의 채방열량은 2004년의 냉난방실험의 결과를 이용하였다.

현장타설형 기초말뚝을 이용한 지중열시스템이 단위채열당의 초기투자비용에서 보어홀시스템의 1/4 정도로 절감효과가 있음을 확인하였다.

6. 결 론

1) 지중열 이용 공조시스템의 보급 및 실용화을 목표로 초기투자비용의 절감을 목적으로 현장타설형 기초말뚝을 지중열교기와 병용한 시스템을 제안하였으며, 열적특성을 파악하기 위해 실제모형 실험장치를 설치하여 1년간 냉난방실험을 수행했다.

2) 냉난방실험의 결과, 본 시스템의 지중열교환 기초말뚝(직경 1500 mm, U튜브 8개)의 실험지역에서의 최대채·방열량은 260~280 W/m(U튜브 1개 32~35 W/m)였으며, 기간 평균은 약 180~200 W/m의 능력을 나타냈다.

3) 실험기간중의 수냉식히트펌프의 성적계수는 최대 5.6(냉방), 5.1(난방)이였으며, 기간평균은 4.6(냉방), 4.5(난방)로 일반적인 공기식히트펌프시스템과 비교하여 높은 효율을 보였다.

4) 실험시공을 한 물건에서의 비용과 보어홀방식과의 초기비용을 비교한 결과 채열량 당의 초기투자비용은 ¥72/m로 보어홀시스템의 76%의 절감효과를 얻을 수 있다.

참고문헌

1. K. Nagano, K. Ochifuji, A stucy on the ground coupled heat pump system(Part 1~Part 4), 1994~1996, Transaction of Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan.
2. K. Morino, T. Oka, Experimental and numerical study of exchanged heat in soil by circulating water in a steel pile, 1989, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), pp.49-57.
3. M. Takeuchi, T. Kimura, et al., 1992, Development and numerical simulation of snow-melting system using geothermal energy collected by building piles, Transaction of Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan, No. 52, pp. 59-69.
4. Y. Hamada, K. Ochifuji, K. Nagano and M. Nakamura, 1997, Study on the heating and cooling by long-term heat storage with underground vertical U-tubes, MEGASTOCK'97, Proceedings, Vol. 1, pp. 37-42.
5. S.P. Kavanaugh, Ph.D. 1992. Field Test of a Vertical Ground-Coupled Heat Pump in Alabama, ASHRAE Transactions, Vol. 98 (2), pp. 607-615.