

# 현장타설형 건물 기초를 이용한 지중열 공조시스템의 성능평가에 관한 연구

황 석 호, 남 유 진\*\*

연세대학교 친환경 건축연구센터, \*청주대학교 건축공학과

## A Study on Development of a Ground-Source Heat Pump System Utilizing Cast-in-place Concrete Pile Foundation of a Building

SuckHo Hwang, Yujin Nam\*\*

Center for Sustainable Buildings, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

\*Department of Architecture, Cheongju University, Cheongju 360-764, Korea

(Received February 2, 2010; revision received June 21, 2010)

**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 because of their expensive installation 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 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.

**Key words:** Ground-source heat pump(지열히트펌프 시스템), Cast-in-place concrete pile foundation(현장타설형 기초말뚝), Ground heat exchanger(지중열교환기)

### 1. 서 론

최근 친환경 건축에 대한 사회적인 요구가 높아지면서 신재생에너지 시스템인 지열히트펌프 시스템에 대한 관심이 증가하고 있다. 지열히트펌프 시스템은 연중 일정한 온도를 유지하고 있는 지표 표층부의 열을 이용하여, 여름철에는 지중을 히트싱트

(heat sink)로, 겨울철에는 히트소스(heat source)로 활용하는 시스템이다. 이는 계절의 변화가 뚜렷한 국내의 경우 계절간 축열효과를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있으며, 장기적인 이용을 가능하게 하는 요소가 된다. 또한 안정적인 열원의 활용으로 기존의 공기식 히트펌프 시스템에 비해 에너지 효율이 뛰어나며, 대기중으로 공조배열을 배출하지 않기 때문에 도심에서의 열섬효과를 완화시키는 효과가 있다.

지열히트펌프 시스템들은 주로 북유럽과 북미지역의 난방시스템용으로 널리 보급되어져 있으며,

† Corresponding author

Tel.: +82-43-229-8479; fax: +82-43-229-8475

E-mail address: namyujin@cju.ac.kr

시스템의 성능향상 및 최적설계를 위한 활발한 연구가 진행되고 있다. Lee<sup>(1)</sup>에 의하면 국내의 경우 2000년 이후로 지열히트펌프 시스템의 적용이 증가하고 있는 추세이며, 2008년 현재 500여 건물에서 이용되고 있다. 그러나 대부분의 지열열교환기는 수직형과 스탠드컬럼웰 방식을 주로 사용하고 있다. 또한, 지열히트펌프 시스템의 설치를 위하여 평균 1냉동톤(usRT = 3.517 kW)당 평균 420만 원의 초기비용이 필요하다. 이는 지열히트펌프 시스템의 초기투자비 증가로 인해 단순 투자회수기간 측면에서 기존의 공조 시스템에 비해 불리하여 널리 보급되지 못한 원인이 된다.

이에 최근에는 지중열교환기 설치를 위한 지반 굴삭비용의 절감을 위하여 건물의 기초를 지중열교환기로 활용하는 방식이 제안되어 실용화 되고 있다.<sup>(2,3)</sup> 건물의 기초를 이용한 지중열교환기 시스템은 기초의 형식에 따라 기성 철근 말뚝, 기성 콘크리트 말뚝, 그리고 현장타설형 말뚝으로 분류된다. 또한 동일한 기초형식이라도 기초구조물내에서 열교환기의 설치 위치와 방법에 따라 다양한 적용방식이 사용되고 있다. 국내의 경우 기성 콘크리트 말뚝을 이용한 지중열교환 시스템에 대한 연구가 진행되고 있다.<sup>(4,5)</sup> 그러나, 기성 말뚝은 대도시의 경우 현장 반입의 문제점이 있으며, 대형 건물의 경우 구조적인 측면에서 현장타설형 말뚝기초를 주로 이용하고 있다.

본 연구에서는 현장타설형 기초말뚝을 지중열교환기와 병용한 지열히트펌프 시스템을 개발하고, 실험을 통하여 시스템의 성능을 검증하였다.

## 2. 지중열교환기의 개요

Fig. 1은 본 연구에서 제안한 현장타설형 기초말뚝을 이용한 지중열교환기의 개념을 나타내고 있다. 건물의 규모에 따라 직경이 1500~4000 mm인 현장

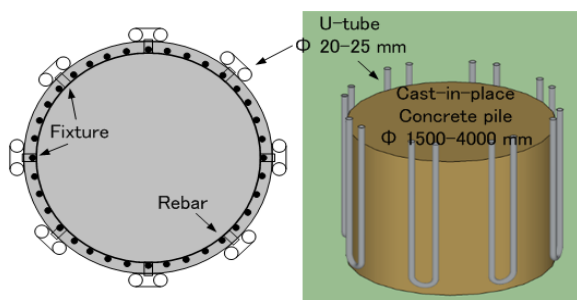


Fig. 1 Outline of the heat exchanger system using cast-in-place concrete piles.

타설형 기초말뚝의 외주부에 U자형 열교환 튜브(U 튜브)를 설치하는 방식이다. 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 구조설계상의 단면결손이 없으며, 기초말뚝의 직경에도 차이가 없게 된다. 또한, 콘크리트부재 및 강도등도 기존의 기초말뚝과 동일한 것을 이용하면서 지중열교환기를 설치하는데 소요되는 비용을 절감할 수 있게 된다. 또한, 현장타설형 기초말뚝은 기성 철근 말뚝 또는 기성 콘크리트 말뚝에 비해 일반적으로 단면이 크기 때문에 하나의 말뚝에 여러 개의 지중열교환기를 설치할 수 있기 때문에 많은 열을 지중으로부터 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 지중열교환기를 현장에서 구조용 철근과 연결해 가면서 기초를 시공하기 때문에 단순히 기초공사만을 하였을 때보다 시공시간이 늘어나며, 이에 따른 비용의 증가가 발생할 수 있다는 단점이 있다.

## 3. 실험개요

### 3.1 실험시설

현장타설형 기초말뚝을 이용한 지중열교환기의 열적성능과 지중열원히트펌프의 운전성능을 파악하는 것을 목적으로 실험 장치를 구성하여 냉난방실험을 수행하였다(Fig. 2 참고).

지중열교환기는 20 m 깊이로 설치하였으며, 하나의 기초말뚝에 U튜브(외경 34.0 mm, 내경 28.8 mm)를 8개 설치하였다. 기초말뚝의 간격은 일반적인 건물의 표준 스펠인 6 m를 가정하여 설치하였다. Fig. 3은 현장타설형 기초말뚝에 U튜브를 설치하는 과정을 보여주고 있다.

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 복사 냉난방패널을 설치하였다.

### 3.2 실험운전방법

성능실험에서의 시스템 운전스케줄은 일반적인 사무소건물을 가정하여 월요일부터 금요일까지 9 :

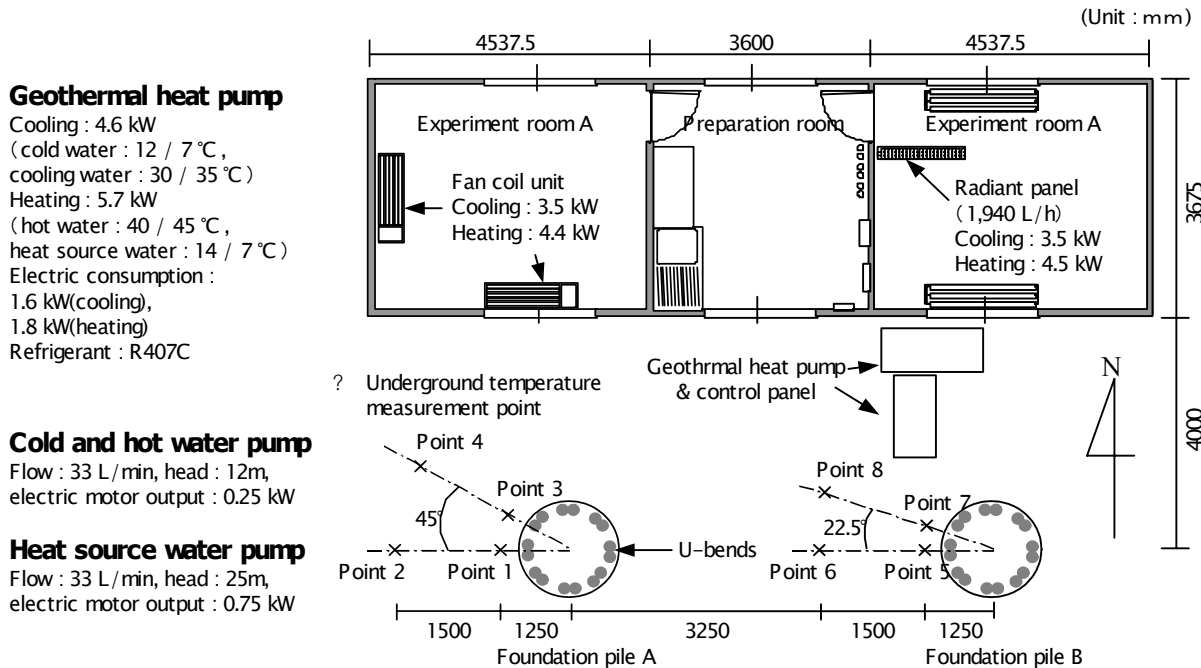


Fig. 2 Plan of the experimental institution and system configuration.



Fig. 3 U-tube installation.

00부터 18 : 00까지 운전하였으며, 토요일과 일요일에는 운전을 하지 않는다. 또한, 시스템을 최대능력으로 운전되게 하기 위하여 냉방 실험의 경우 내부 발열을 고려하여 실내에 인공부하(룸에어컨 : 냉각 2.5 kW, 가열 2.8 kW)를 설치하였다.

## 4. 실험결과

### 4.1 냉방실험결과

#### 4.1.1 열원수(heat source water) 온도

Fig. 4는 냉방실험중의 열원수온도와 외기온도의

관계를 보여주고 있다.

실험을 시작한 6월 16일 9 : 00의 열원수 온도는 약 19°C였다. 실험개시 후, 열원수 온도는 점점 상승하여 8월 21일 16 : 00에는 29.2°C가 되어, 실험개시후부터 약 10°C가 상승하였다. 8월 21일에 열원수 온도가 수냉식 히트펌프의 냉각수 온도설정(30°C)를 넘을 가능성이 있었기 때문에 기기보존과 COP 저하방지를 위해 인공부하의 운전을 중지하여 실험을 진행하였다.

#### 4.1.2 지중열교환기의 성능

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

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

인공부하를 중지한 8월 21일부터 9월 30일까지는 공조부하가 감소하여 수냉식 히트펌프가 부분부하 상태에서 운전을 하였기 때문에 119 W/m(기초말뚝 A), 136 W/m(기초말뚝B)로 감소하였다. 그러나 냉방기간 전체평균은 173 W/m(기초말뚝 A), 189 W/m(기초말뚝 B)의 방열량을 나타냈다.

#### 4.1.3 히트펌프의 효율

Fig. 5는 냉방기간의 수냉식 히트펌프만의 성적

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

Period	Operation method	Pile	Cooling(period average value)				
			HP → Soil [°C]	Soil → HP [°C]	Δt [°C]	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

Table 2 Period average coefficient of performance(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

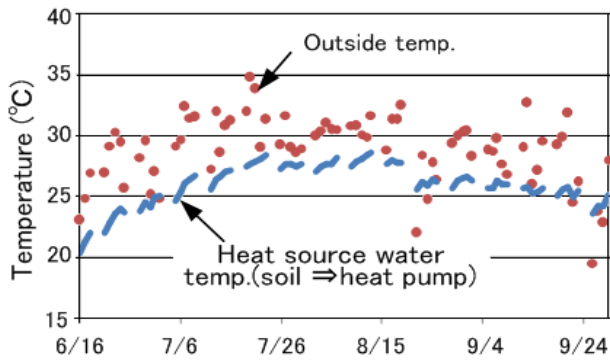


Fig. 4 Outside and heat sink water temperature.

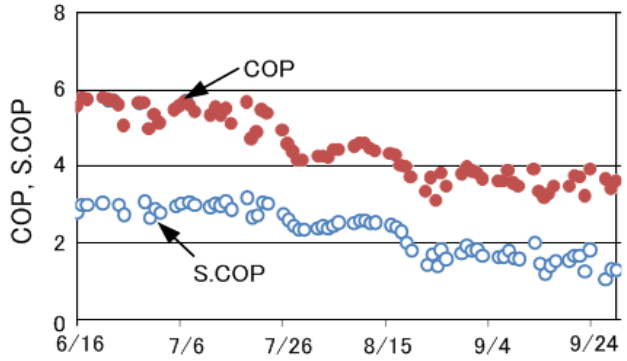
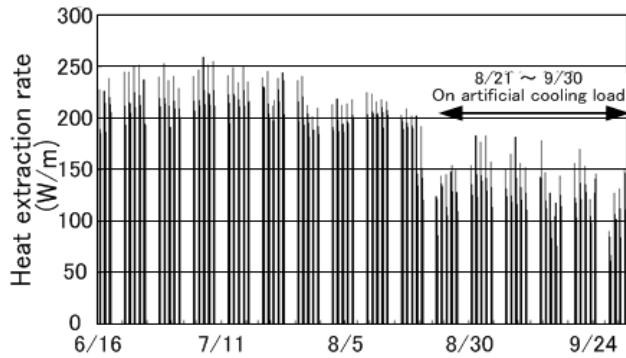
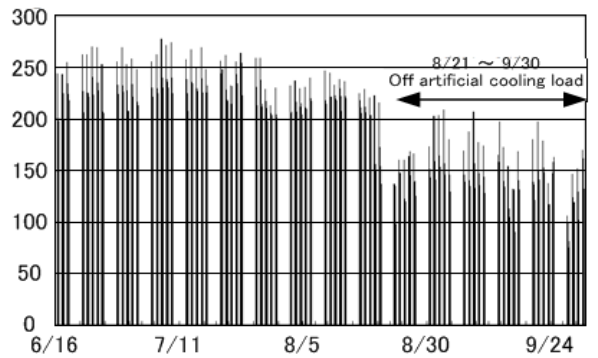


Fig. 5 Coefficient of performance(cooling).



(a) Foundation pile A



(b) Foundation pile B

Fig. 6 Heat rejection rate into soil(cooling).

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

Period	Operation method	Pile	Heating(period average value)				
			HP → Soil [°C]	Soil → HP [°C]	Δt [°C]	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 modified	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	
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

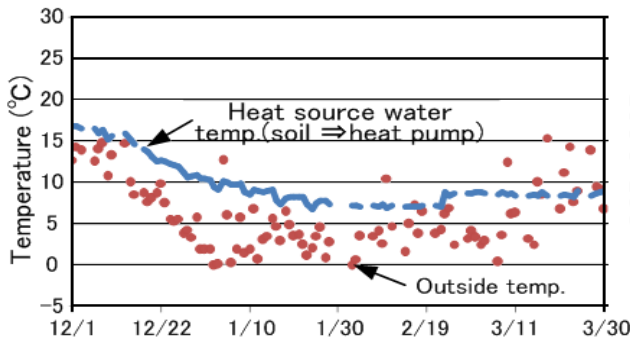


Fig. 7 Outside and heat sink water temperature.

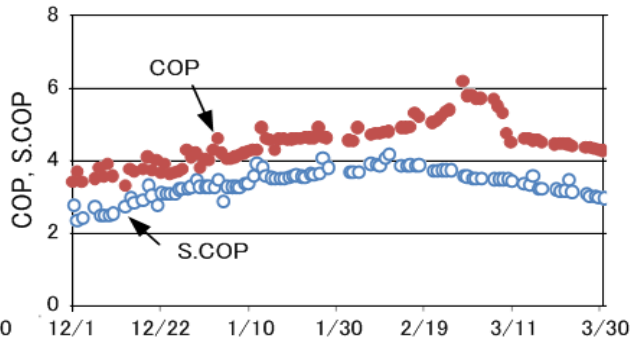
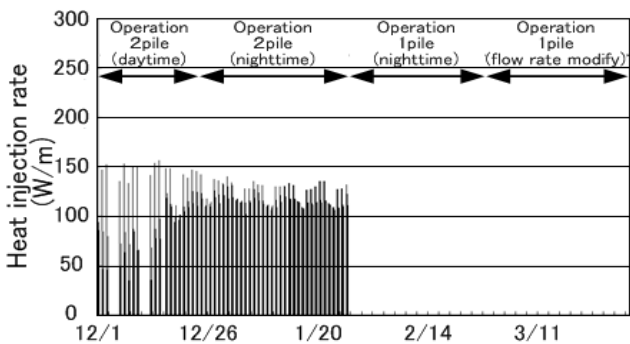
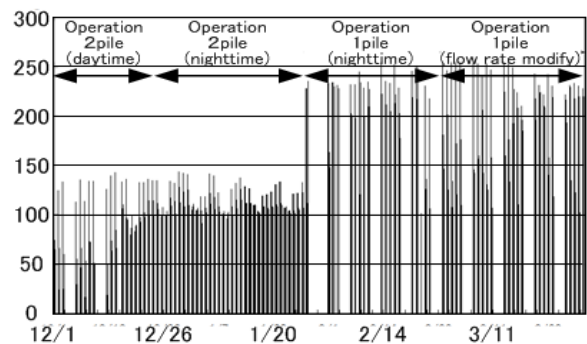


Fig. 8 Coefficient of performance(heating).



(a) Foundation pile A



(b) Foundation pile B

Fig. 9 Heat rejection rate into soil(heating).

계수(COP) 및 열원수 펌프의 동력을 포함한 시스템의 성적계수(S.COP)을 보여주며, Table 2는 난방기간의 월별 평균 COP를 보여주고 있다.

난방실험 개시직후의 열원수 온도가 상대적으로 낮은 6월에는 COP가 5.6으로 높았으나, 열원수 온도가 높아짐에 따라 COP가 점점 낮아져서 9월에는 3.6이 되었다. 인공부하 조건에서의 평균 COP는 5.0이며, 전체 난방기간 동안에는 4.6이다. 본 연구의 내용이 공기식 히트펌프 시스템과의 비교 검증이 아니었기 때문에 운전조건 및 외기온도조건에 따른 성능의 차이가 발생할 것으로 판단되나 일반적인 공기식히트펌프 시스템(COP 3.0)과 비교하여 본 실험의 경우 열원수의 온도를 외기온도 이하로 유지하도록 시스템을 운전하였기 때문에 에너지 성능이 좋았음을 간접적으로 확인할 수 있었다.

## 4.2 난방실험결과

### 4.2.1 열원수(heat source water) 온도

Fig. 7은 난방실험중의 열원수온도와 외기온도의 관계를 보여주고 있다.

난방을 개시한 12월 1일 9:00의 열원수 온도는 약 17°C이며, 실험개시후 점점 낮아지기 시작한다. 기초말뚝 1개의 운전을 정지한 1월 27일에는 약 6°C가 되어, 처음보다 약 11°C낮아졌다.

### 4.2.2 히트펌프 효율

Fig. 8은 난방기간의 수냉식 히트펌프만의 성적계수(COP) 및 열원수 펌프의 동력을 포함한 시스템의 성적계수(S.COP)을 보여주며, Table 4는 난방기간 중 운전방식에 따른 효율을 보여준다. 난방실험개시후의 12월 1일부터 15일까지는 열원수온도가 높았으나, 난방부하가 작았기 때문에 COP가 3.9로 낮았다. 야간운전을 함으로써 부하조건이 안정적이던 12월 16일 이후에는 열원수 온도가 점점 낮아졌으나, 수냉식 히트펌프의 운전효율이 좋아져서 COP가 4.3으로 높게 나왔다. 또한, 기초말뚝 1개만을 운전하였던 1월 27일 이후는 5.1을 보이고 있다. 난방실험은 다양한 패턴으로 운전하였기 때문에 기간의 평균값은 단순한 참고용으로써 4.5임을 알 수 있었다.

### 4.2.3 지중열교환기의 성능

Fig. 9는 각각의 기초말뚝에서 지중으로의 채열

량을 보여주며, Table 3에 운전기간의 평균값을 보여준다.

12월 1일부터 난방운전을 시작하였으나, 난방부하가 작았기 때문에, 수냉식 히트펌프가 부분부하운전을 하여, 기초말뚝의 채열량이 적게 나타났다. 12월 16일부터는 운전효율을 높이기 위해 운전시간을 주간에서 야간으로 변경하였으며, 1월 27일부터는 기초말뚝의 최대 채열량을 확인하기 위해 기초말뚝 A의 채열을 중지하고, 기초말뚝 B만을 가지고 운전을 하였다. 또한, 2월 23일부터는 줄어든 난방부하에 대응하여 지중열교환기의 채열량을 향상시키기 위하여 열교환기의 유량을 조정하여 실험하였다. 그 결과 실험기간중의 최대 채열량은 261 W/m(기초말뚝 B)이었고, U튜브 1개당은 32.6 W/m였다.

난방 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.

## 5. 결 론

(1) 지중열 이용 공조 시스템의 보급 및 실용화를 목표로 초기투자 비용의 절감을 목적으로 현장타설형 기초말뚝을 지중열교환기와 병용한 시스템을 제안하였으며, 열적특성을 파악하기 위해 실제모형 실험 장치를 설치하여 1년 간 냉난방실험을 수행했다.

(2) 냉난방실험의 결과, 본 시스템의 지중열교환기 기초말뚝(직경 1500 mm, U튜브 8개)의 실험지역에서의 최대 채·방열량은 260~280 W/m(U튜브 1개 32~35 W/m)였으며, 기간 평균은 약 180~200 W/m의 능력을 나타냈다. 이는 기존의 U-tube 형의 지중열교환기 보다 높은 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

(3) 실험기간중의 수냉식 히트펌프의 성적계수는 최대 5.6(냉방), 5.1(난방)이었으며, 기간평균은 4.6(냉방), 4.5(난방)로 동일한 조건으로 비교하지는 않았지만 일반적인 공기식히트펌프 시스템과 비교하여 높은 효율을 보였다.

## 참고문헌

1. Lee, J. Y., 2009, Current status of ground heat pump in Korea, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, pp. 1560-1568.
2. Baek, S. K. et al., 2007, Development of Ground

- Heat Exchangers installed in Building Foundation, Proceedings of the SAREK 2007 Summer Annual Conference, pp. 277-282.
3. Yu, H. K., 2008, Development and Performance Evaluation of Ground Heat Exchanger Utilizing PHC Pile Foundation of Building, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 28, No. 5, pp. 56-64.
  4. Nagano, K. and Ochifuji, K., A study 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.
  5. Morino, K. and Oka, T., 1989, Experimental and numerical study of exchanged heat in soil by circulating water in a steel pile, Journal of Environmental Engineering(Transactions of AIJ), pp. 49-57.
  6. Kavanaugh, S. P., 1992, Field Test of a Vertical Ground-Coupled Heat Pump in Alabama, ASHRAE Transactions, Vol. 98, No. 2, pp. 607-615.