

# 복합용도 건물에 적용된 400RT급 수직형 지열시스템의 입주전 성능평가

황광일\*, 신동걸\*\*, 김종현\*\*\*, 신승호\*\*\*, 정명관\*\*\*

\*한국해양대학교 기계정보공학부(hwangki@hhu.ac.kr), \*\*한국해양대학교 대학원(sfcboom@nate.com),  
\*\*\*삼성물산 건설부문(kjh5955@samsung.com, seungho.shin@samsung.com, jungmk@samsung.com)

## A Performance Measurement and Evaluation of a 400RT Vertical type Geothermal System installed in a Complex Building Before Occupancy

Hwang, Kwang-Il\*, Shin, Dong-Keol\*\*,  
Kim, Joong-Hun\*\*\*, Shin, Seung-Ho\*\*\*, Jung, Myoung-Kwan\*\*\*

\*Div. of Mechanical and Information Engineering, Korea Maritime University(hwangki@hhu.ac.kr),  
\*\*Graduate School of Korea Maritime University(sfcboom@nate.com),  
\*\*\*Samsung C&T(kjh5955@samsung.com, seungho.shin@samsung.com, jungmk@samsung.com)

### Abstract

400RT geothermal system which is the biggest capacity among on-operations at present in Korea is measured and evaluated on 23rd~26th Jan. 2008 during those days building is not allowed owners and/or tenants to move in. The geothermal system is consist with vertical-typed 112 geothermal heat exchangers which are installed circle-like 1 row with 4m interval, and has 16 units of 25USRT geothermal-source heat pump(GSHP)s. And each 5 units of circulation pump are running for geothermal heat exchangers and hot water supplies. The followings are the results. The temperatures at G.L. -70m of 2 boreholes are varied quite similarly. The average temperature difference between inlet and outlet of geothermal pipes is 4.1°C, and that of hot water supply is 3.2°C, of Zone 3's each 4 GSHPs when being operated. Despite temperature fluctuations by heating loads, the average temperature difference between main pipes of inlet and outlet of geothermal heat exchangers is measured as 4.1°C. This study propose "Geothermal System COP" which includes not only consumed electric power by compressor but also circulation pumps and auxiliary utilities. By comparing the geothermal system COP with GSHP's performance specification, it is clear that the performances of GHSPs of this site are satisfied with the specification.

Keywords : 지열시스템(Geothermal System), 복합용도 건물(Complex Building),  
성능평가(Performance Evaluation)

접수일자 : 2008년 4월 22일, 심사일자 : 2008년 5월 6일, 게재확정일자 : 2008년 6월 3일  
교신저자 : 황광일(hwangki@hhu.ac.kr)

## 1. 서론

### 1.1 연구배경과 목적

2004년 3월에 발효된 “신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급촉진법”의 시행과 함께 국내 신재생에너지 시장은 급속히 확대되었고 동시에 관련 기업수도 비약적으로 증가하였다. 2008년 3월 3일 현재 에너지관리공단에는 총 1,835개 기업이 신재생에너지 전문기업으로 등록되어 있고 이들은 11개 신재생에너지원에 대해 복수 등록함으로써 누적기업은 2,702개사에 달한다. 신재생에너지원별 등록기업을 분석하면 태양광발전과 태양열 관련 전문기업이 1,642개사, 지열에너지 관련 전문기업이 435개사, 풍력발전 전문기업이 287개사로 이들 3개 에너지원이 총 2,702개사의 87.5%를 넘고 있어 국내 신재생에너지 사업이 태양, 지열, 풍력에 집중돼있음을 보여준다.<sup>1)</sup> 특히 지열에너지의 경우에는 국내 도입 및 상용화 기간이 다른 신재생에너지원에 비해 짧았음에도 불구하고 2007년 11월 30일 365개사였던 전문기업수가 불과 3개월여 만에 70개사가 증가하는 등 급격히 시장이 확대되고 있다. 이는 건물주, 시공자, 설비엔지니어가 지열에너지의 우수한 장점을 충분히 인식하고 있기 때문이라는 긍정적 해석도 가능하지만, 사업수행과 향후 운전 및 유지관리의 관점에서는 전문엔지니어가 절대 부족하고, 또한 국내 운전조건에서의 엔지니어링 데이터가 충분하지 못함에 따른 경험적 설계 know-how와 운전 및 유지관리 기술 등이 시급히 확보되어야만 한다.

이에 본 연구에서는 400RT급 수직형 지열시스템이 적용된 국내 현장의 입주전 운전성능을 측정함으로써 인위적 냉난방부하가 없는 상태에서의 대용량 설비의 운전특성을 분석하여 향후 유사 현장에 대한 설계 데이터로 활용하고, 또한 대형화 추세가 뚜렷한 국내 지열시스템 설비의 설계 및 시공 시의 참고자료로 제공하고자 한다.

### 1.2 연구문헌 고찰

본 연구와 유사한 국내 연구로는 김 등<sup>2)</sup>은 수평형 지열교환기가 적용된 주상복합 건물에 대한 실측을 통해 냉방부하 변동에 따른 지열시스템의 에너지이용 특성을 설명하였다. 황 등<sup>3,4)</sup>은 동일 현장에 대한 지열시스템의 계절별 성능과 5년경과 후의 지열시스템 성능변화를 비교하였다. 이를 통해 간헐운전방식과 연속운전방식에 따른 차이를 평가하였고, 지중열의 흡열량과 방열량 사이의 불균형에 대한 문제를 제기하면서 각 현장 특성에 맞는 운전방법을 제안하고 있다. 또한 우 등<sup>4)</sup>은 CFD 해석을 통해 본 연구의 실측현장에 대한 보어홀 간격의 적정성을 평가하였다.

한편, 수직형 지열교환기 적용현장에 대한 성능평가 관련연구도 다수 보고되고 있으나, 매우 짧은 실측기간, 일회성 평가, 소용량 지열시스템 등에서의 실험적 접근이 대부분이었다. 국내 현장에서 적용되고 있는 지열시스템의 단위용량이 대규모로 추진되고 있는 시점에서 대용량 지열시스템에 대한 주기적이고 지속적인 실측연구는 확인할 수 없었다.

## 2. 현장 및 지열시스템 개요

### 2.1 현장개요

서울시내에 위치한 본 연구의 실측대상 현장은 그림 1, 표 1에 나타난 것처럼 4개 동(棟)으로 구성되어 있으며, 그 중 공동제작과 비즈니스 공간인 D동의 냉난방부하는 지열시스템을 주열원으로 하고 지역냉난방열원을 비상시의 보조열원으로 계획하였다. D동의 냉난방설계부하를 표 2에 정리한다.

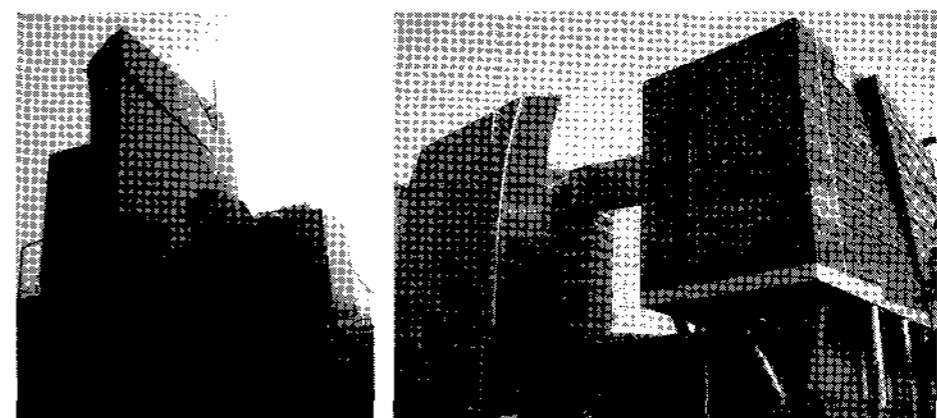


그림 1. 현장모습(좌, 우측)

표 1. 현장개요(전체)

건물 개요	①대지면적 : 19,138m <sup>2</sup> ②건축면적 : 11,478m <sup>2</sup> ③연 면 적 : 152,569m <sup>2</sup> ④층 수 : 지하4층, 지상22층 4棟 ⑤구 조 : 철골, 철근 콘크리트조 ⑥외부마감 : THK24 칼라Low-e 복층유리, THK3 AL Sheet
용도	업무시설, 교육연구시설, 전시시설, 판매시설

표 2. 냉난방 설계부하 (지열시스템 적용 공간)

	[kcal/h]		
	공동제작센터	비즈니스타워	계
냉방부하	811,737	335,460	1,147,197
난방부하	887,682	169,402	1,057,084

2.2 지열시스템 개요

본 측정현장에서는 천공관경 30A, 천공간격 4m, HDPE 재질의 지열교환기(지중매설 열교환용 파이프), 냉난방부하설계값 등을 상용 지열시스템 설계프로그램인 GS2000과 GLD에 대입하여 천공깊이 200m, 천공수 112개라는 설계자료가 도출되었고, 4개 시험천공에서의 열전도테스트를 통해 평가된 열전도율(표 3)로부터 상기 지열교환기 설계수량을 확정하였다.

본 현장에서는 현장의 부지 내 건물 평면 계획으로 인해 지열교환기를 집중 시공할 수 없기 때문에 그림 2에 나타난 것과 같이 112개 천공을 ㄷ자 1열로 배치하였다.

지열시스템의 전반적인 개요를 표 4에 정리하였고, 지열시스템의 전체 구성도와 관리 포인트는 그림 3과 같다. 최대냉방부하를 만족시키기 위해 지열원히트펌프 용량은 400USRT(25USRT×16대)로 하였고, 지열원히트펌프 16대를 존(Zone)당 4대씩으로 그룹지어 전체 4개 존(Zone)을 구성함으로써 존(Zone)제어와 대수제어를 병행하여 냉난방부하에 대응하는 운전 알고리즘을 적용하였다. 한편 지열교환기측, 실내순환수측 유량순환을 위해 각각 5대씩의 순환펌프를 설

치하였다.

표 3. 열전도테스트 결과

시험천공 구분	#1	#2	#3	#4	평균
열전도율 [W/m℃]	2.94	3.35	3.12	2.95	3.09

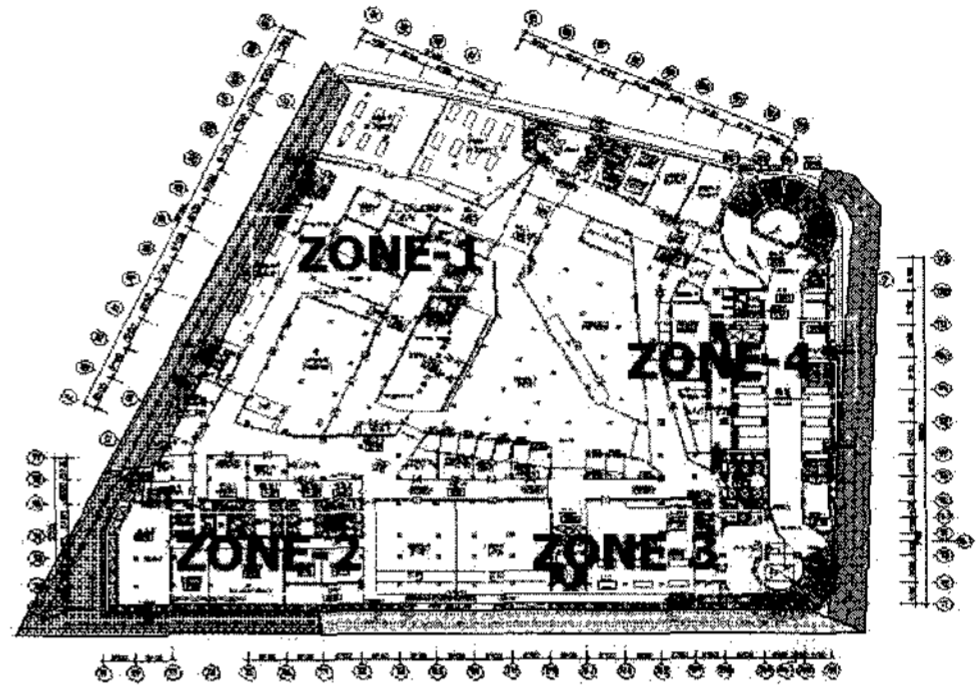


그림 2. 수직형 지열교환기 설치 위치 및 zoning

표 4. 지열교환기 및 지열시스템 개요

천공구경	150A
천공깊이	GL-200m
천공간격	4m × 1열
천공개수	112개 (Single U-tube)
지열교환기 사양	30A, HDPE
히트펌프 용량	400USRT (25USRT× 16대)
지열교환기 순환펌프	1,360LPM×30m×5대(1대 S.B.)
냉,온수 대류펌프	1,360LPM×20m×5대(1대 S.B.)

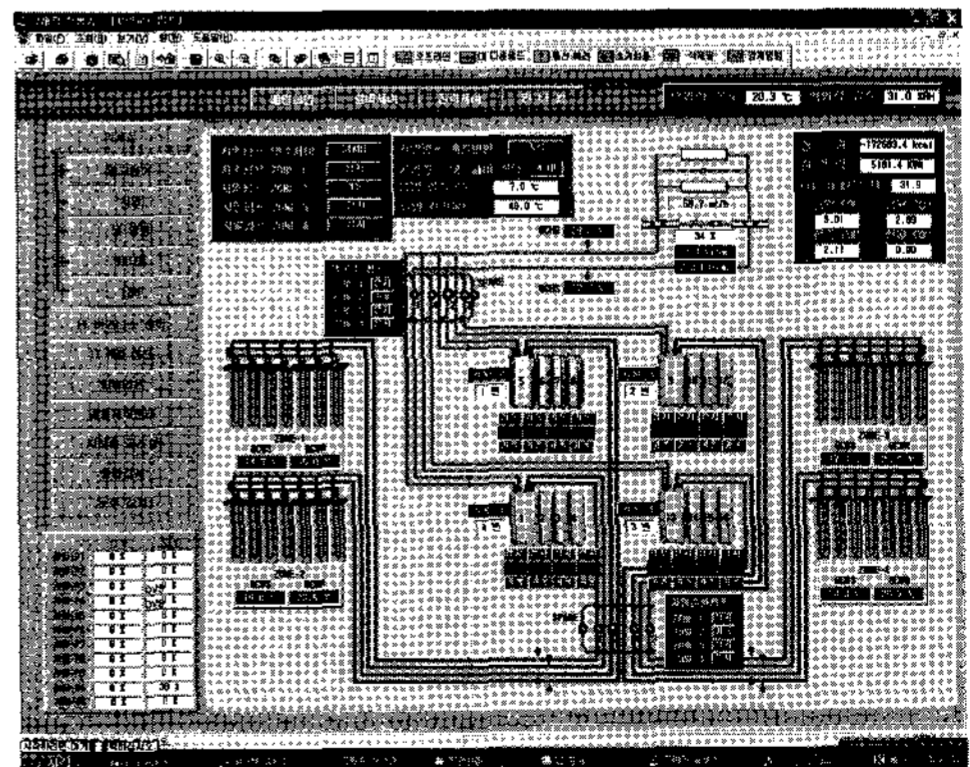


그림 3. 지열시스템 관리시스템(자동제어)

### 3. 성능평가 및 분석

#### 3.1 성능평가 범위와 방법

전술한 바와 같이 본 현장은 지열시스템의 성능에 관해 지속적이고 장기적으로 실측 및 분석을 수행할 계획이다. 그 시작으로 본 연구가 진행된 기간(2008.01.23~01.26)은 건물완공 후 입주 직전의 상태로, 입주 후 발생하는 재실자의 정상적 활동에 의한 인위적 부하가 상대적으로 적게 발생하는 조건, 즉 건물완공 후 실내부하량이 최소인 상황에서 실측이 진행되었다.

성능분석을 위한 데이터 취득은 실측에 의한 방법과 현장 방재실의 관리데이터를 입수하는 방법으로 이원화하였다. 실측된 항목(그림 4, 5)은 지열원히트펌프 4개 존의 각 존별 지열교환기측 입출구온도와 실내순환수측 입출구온도, 3번 존을 구성하는 4대의 지열원히트펌프에 대한 각각의 입출구온도, 실내에 위치한 취출구로부터의 토출온도, 매설된 지열교환기의 지중 70m, 170m 깊이에서의 온도이고, 모든 데이터는 데이터로거(DAQ)에 의해 1분 단위로 자동 측정한다. 한편 방재실에서 입수한 항목(그림 3)은 지열교환기의 순환유량, 실내측 냉온수의 순환유량, 지열원히트펌프의 소비전력과 각종 순환펌프 등 지열원시스템 전체에서의 총소비전력량, 각 순환펌프의 on/off 시간 등이고 측정시간은 15분 단위이다.

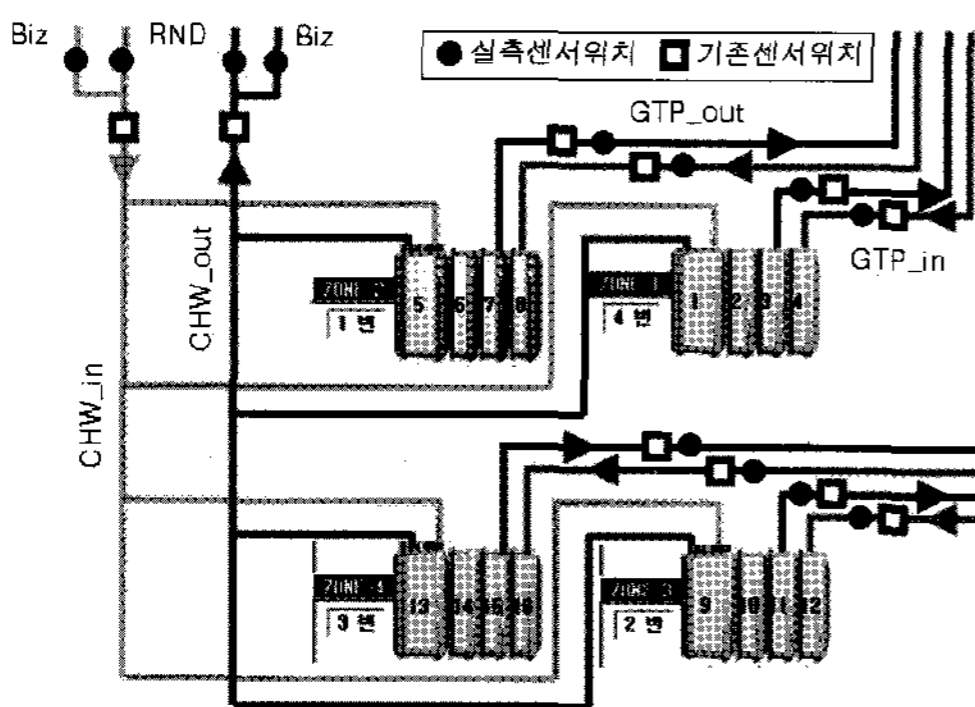


그림 4. 측정점 개요(일부)

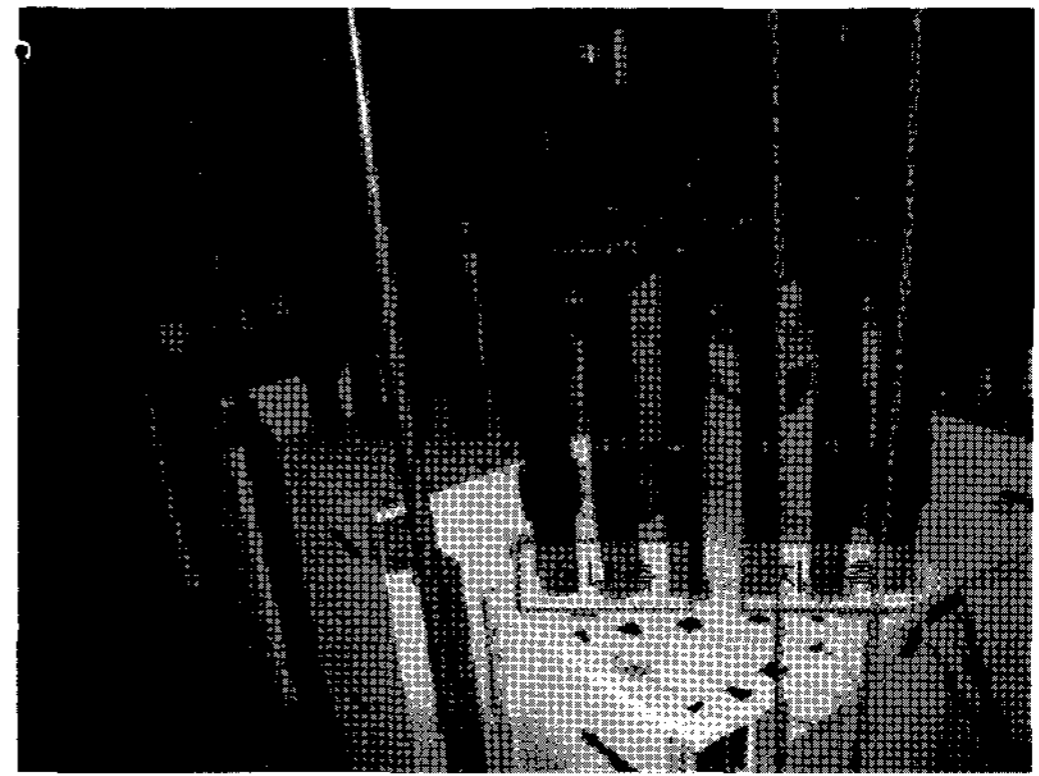


그림 5. 지열원히트펌프 Zone 3(4 units)의 측정위치

#### 3.2 성능평가 결과 및 분석

##### (1) 지중온도와 흡입온도

지중온도를 측정하기 위해 4m 간격을 둔 #4, #5 보어홀에 각각 삽입된 지열교환기의 지중 70m, 170m 깊이에 열전대를 각각 설치하였다. 지중온도를 측정한 결과는 그림 6과 7에 표시된 것과 같이 #4, #5 보어홀의 지중 70m 깊이에서는 측정된 온도가 동일한 온도변화를 보이고 있음을 분명히 확인할 수 있다.

지중 70m 깊이의 온도(지중온도)와 지열원히트펌프로 흡입되는 지열온도(흡열온도)를 그림 8에 나타낸다. 지열원히트펌프가 가동 중(On)일 때는 지중온도와 흡열온도가 동일하지만, 정지 시(Off)에는 지중온도가 흡열온도보다 높게 측정되었다. 이는 측정기간이 겨울철 난방기간을 고려할 때 지열시스템의 지중에너지 흡열과정을 설명하고 있는 것이다.

##### (2) 각종 기기의 작동상태와 실내온도

측정기간 동안의 지열원히트펌프, 실내순환수용 순환펌프, 지열교환기용 순환펌프의 작동상태와 실내순환수용 순환유량과 실내온도 변화를 그림 9에 정리하였다. 실내온도의 변화와 실내순환유량의 변동이 연계되어 있고 지열측 순환펌프와 지열원히트펌프의 On/Off 시간이 동일함을 확인하였다. 또한

본 현장에 적용된 지열시스템에는 축열조가 없기 때문에 지열원히트펌프와 실내순환용 및 지열교환기용 각 순환펌프의 가동상태가 상호 연관성을 갖고 있음을 알 수 있다.

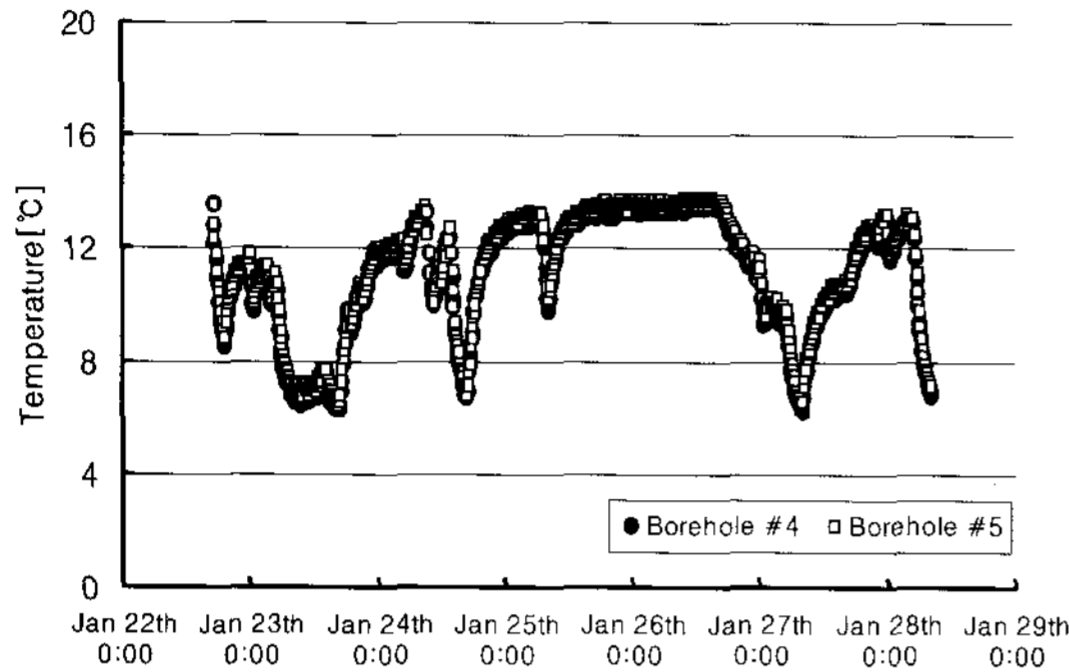


그림 6. 지열교환기의 지중 70m 깊이에서의 온도변화

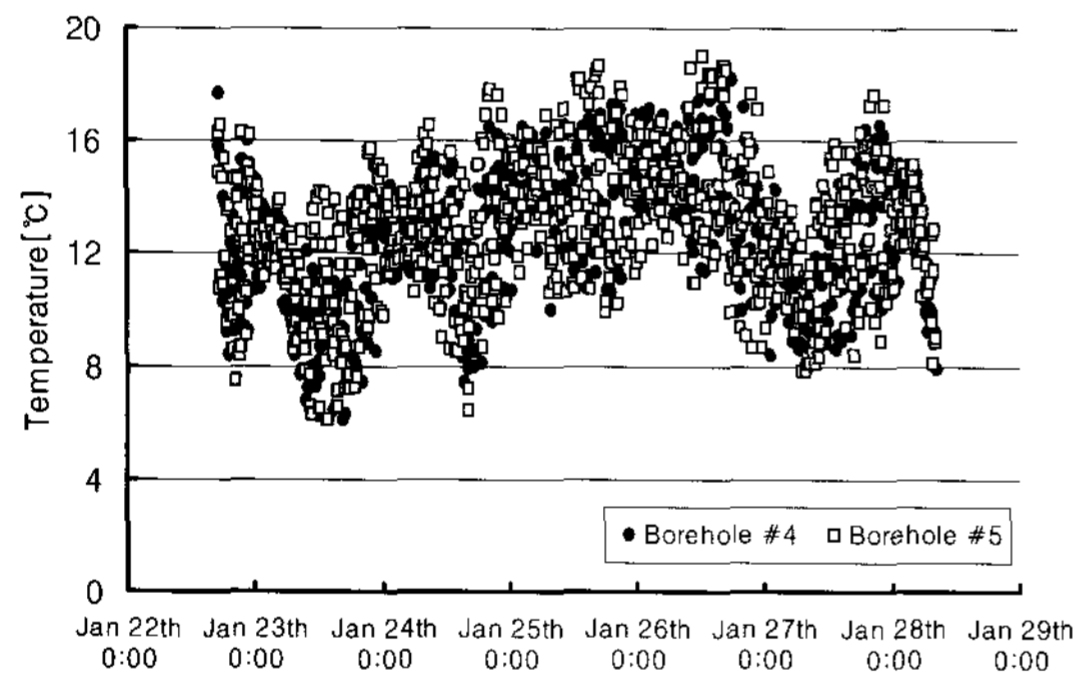


그림 7. 지열교환기의 지중 170m 깊이에서의 온도변화

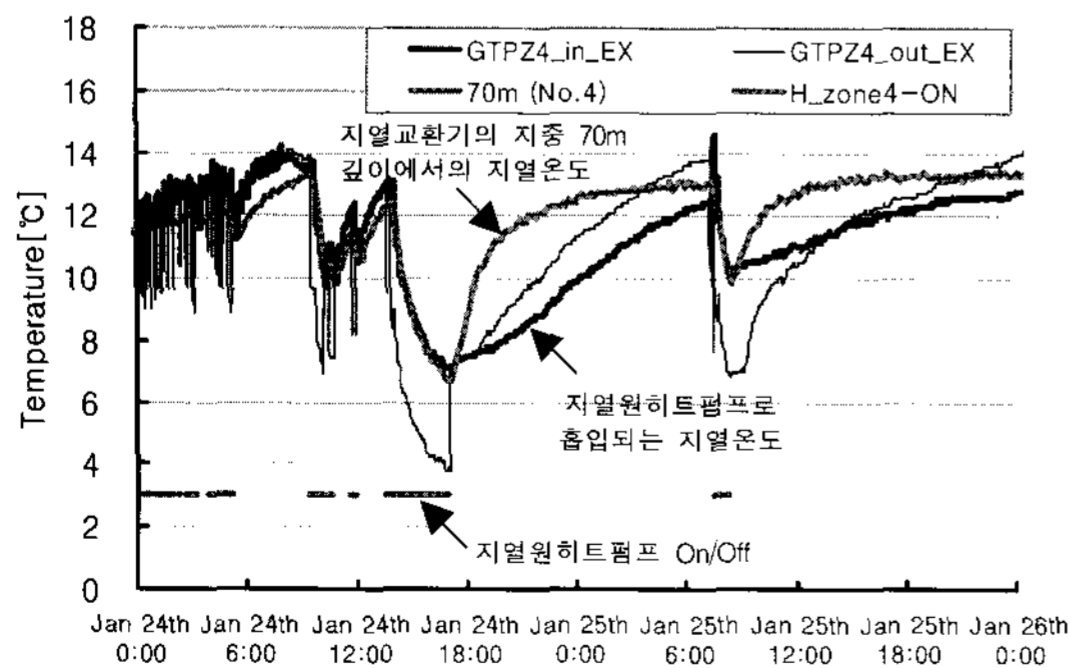


그림 8. 지열교환기 지중 70m 지점과 지열원히트펌프로 흡입되는 지열의 각 온도변화

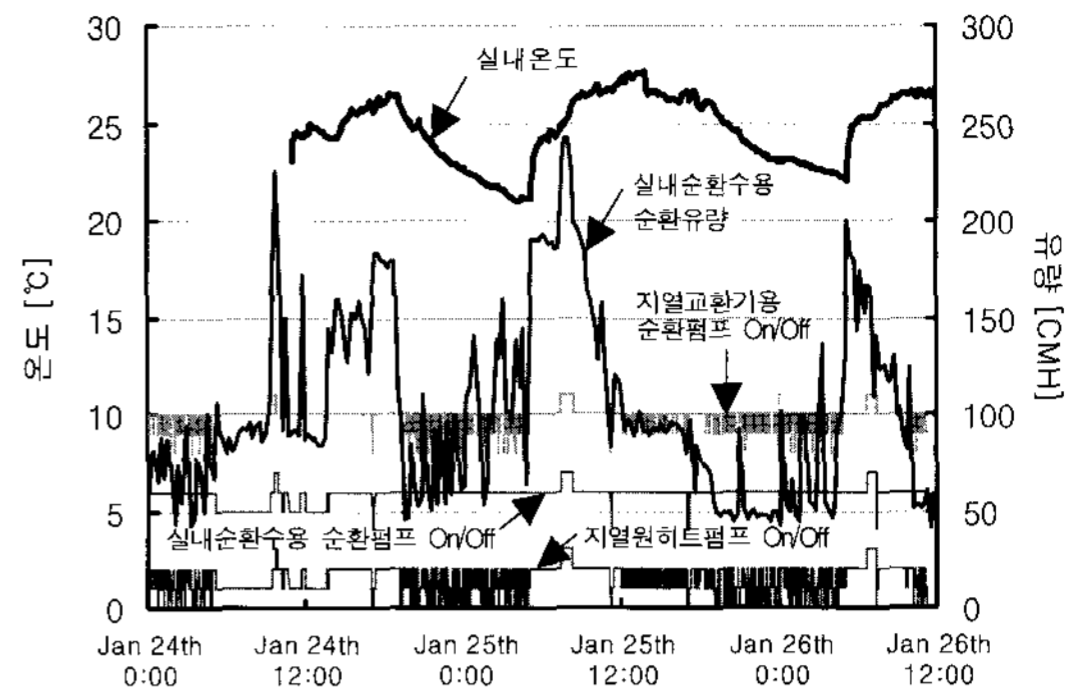


그림 9. 실내온도, 유량과 각종 기기의 작동 상태

### (3) 지열원히트펌프의 입출구온도

전술한 바와 같이 본 현장에 도입된 지열원히트펌프는 총 400USRT의 냉방능력을 갖고 있고, 25USRT 4대씩의 지열원히트펌프를 1개 존(Zone)으로 하여 총 4개 존으로 구성함에 따라 존제어(Zone Control)와 대수제어에 의해 냉난방부하변동에 대응하고 있다.

지열원히트펌프의 존 내 운전특성을 파악하기 위해 3번 존(Zone 3)을 구성하는 지열원히트펌프 4대(unit #1~#4)의 각 지열교환기측, 실내순환수측 입출구 온도를 측정하였다. 측정결과 그림 10~13에서 알 수 있는 것처럼, 4대의 모든 지열원히트펌프에서 지열교환기측의 입출구온도는 운전상태에 따라 변동이 있으나 가동 중에는 약 4°C의 온도차가 발생하고, 실내순환수는 약 3°C의 온도차가 발생하였다.

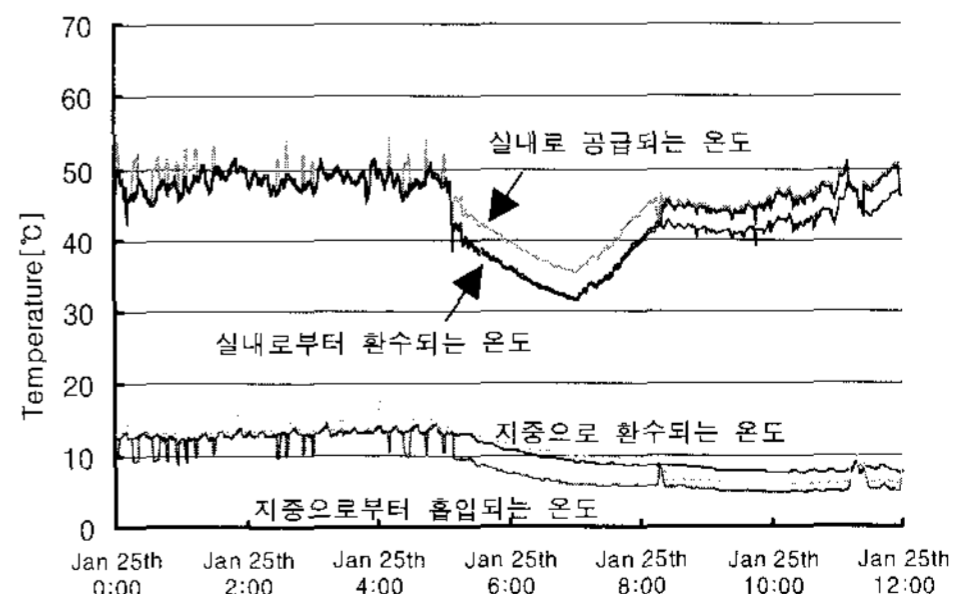


그림 10. 지열원히트펌프 Zone3 unit#1의 지열측, 실내측 온도변화

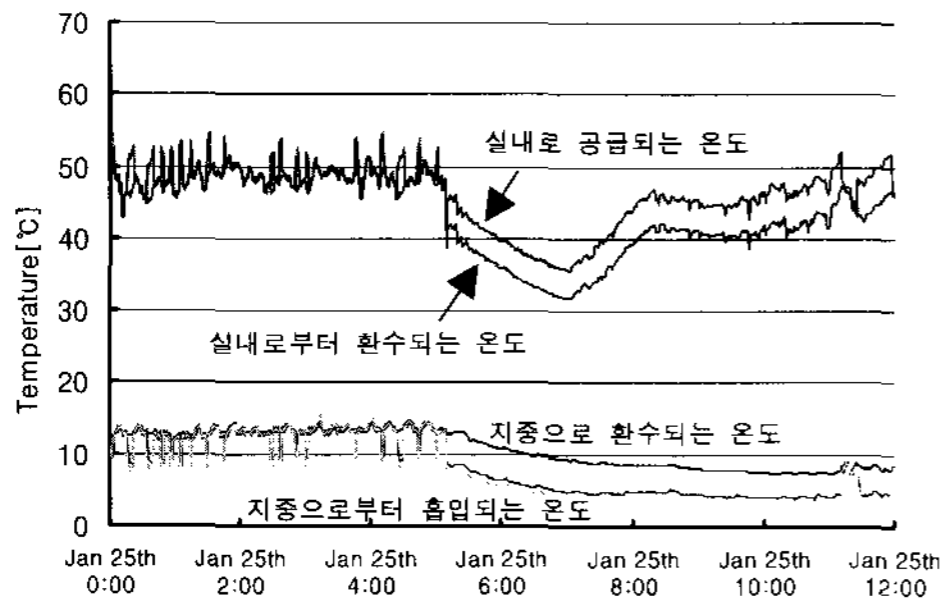


그림 11. 지열원히트펌프 Zone3 unit#2의 지열측, 실내측 온도변화

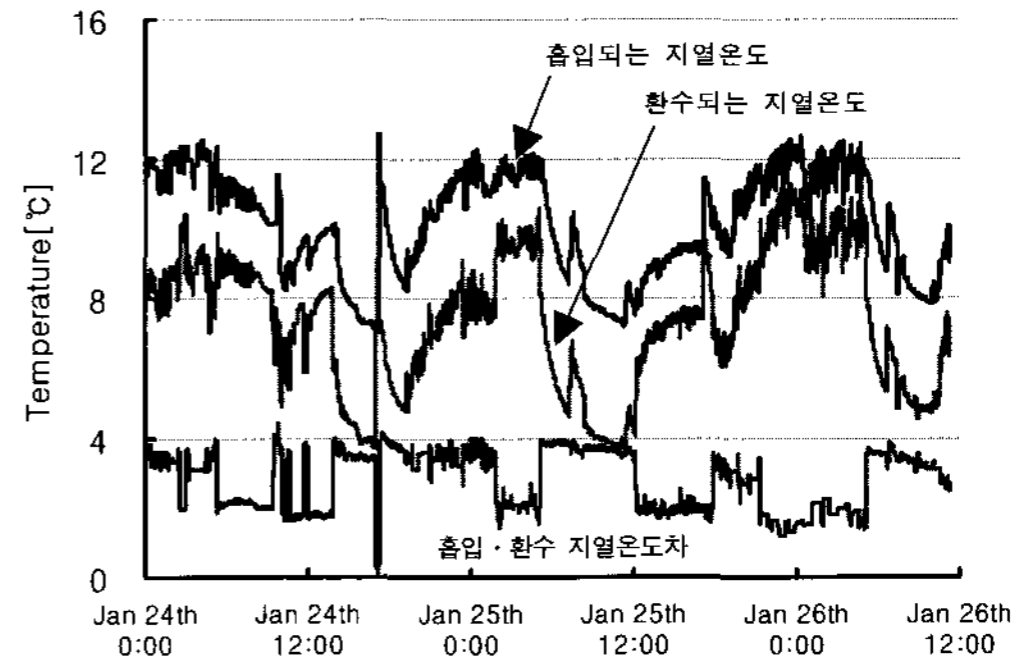


그림 14. 지열원히트펌프에서 활용되는 지열의 온도차

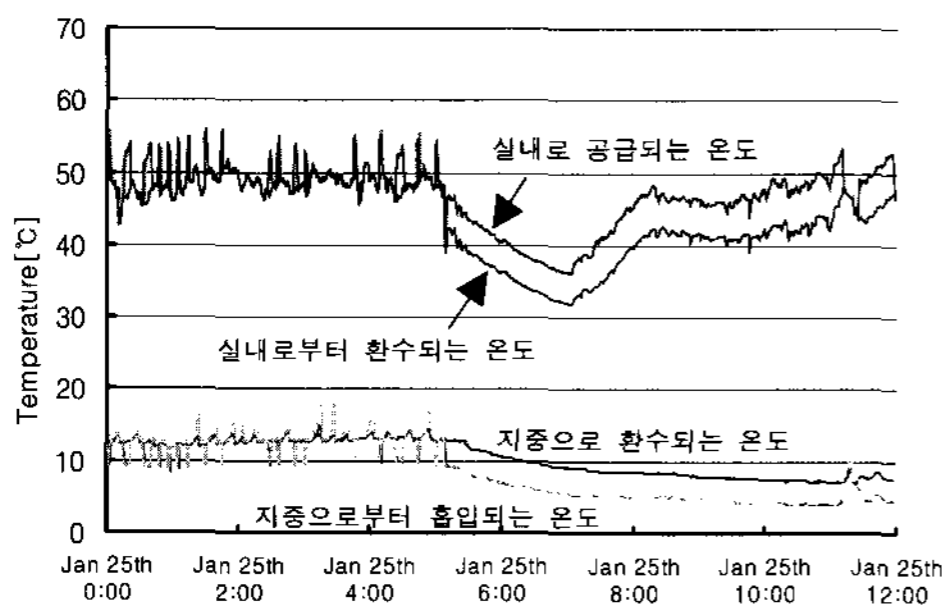


그림 12. 지열원히트펌프 Zone3 unit#3의 지열측, 실내측 온도변화

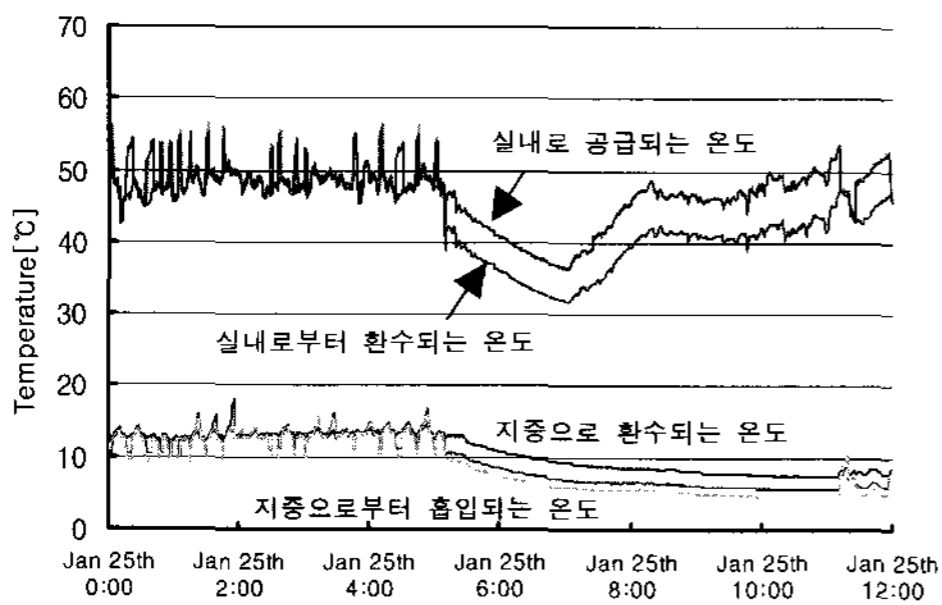


그림 13. 지열원히트펌프 Zone3 unit#4의 지열측, 실내측 온도변화

### 3.3 지열원히트펌프의 성능 적정성 검토

본 연구에서 측정된 지열시스템 성능의 적정성검토를 위해, 측정결과 계산된 COP와 지열원히트펌프 제조사가 제시한 성능사양을 비교하였다.

본 현장은 지열원히트펌프만의 소비전력을 측정할 수 없고 지열교환기용, 실내순환수용 각 순환펌프를 포함하여 지열시스템 전체에서 소비되는 전력량을 1개의 계량기로 15분 단위로 누적 모니터링하기 때문에 지열원히트펌프만의  $COP_{ghp}$ 를 추출하여 산정하는 것은 어려운 상황이다.

이에 대한 현실적 해결안으로 본 연구에서는 아래 식 (1)로 표현되는 기존의 지열원히트펌프의  $COP_{ghp}$ 와는 다른 식 (2)의 지열시스템  $COP_{gts}$ 를 제안한다.

$$COP_{ghp} = \frac{Q_{ghp}}{E_{ghp}} \quad \dots (1)$$

$$COP_{gts} = \frac{Q_{ghp}}{E_{ghp} + E_{pump} + E_{etc}} \quad \dots (2)$$

- $COP_{ghp}$  : 지열원히트펌프 COP
- $COP_{gts}$  : 지열시스템 COP
- $Q_{ghp}$  : 지열원히트펌프의 발생열량
- $E_{ghp}$  : 지열원히트펌프의 소비전력
- $E_{pump}$  : 순환펌프의 소비전력
- $E_{etc}$  : 기타 지열시스템 구성기기의 소비전력

또한 지열교환기의 흡입측과 환수측 각 주관(Main pipe)에서 측정된 지열온도는 그림 14에 표시된 것과 같이 난방부하에 따라 변동이 심하지만 흡입되는 지열온도와 지중으로 환수되는 지열온도 간의 온도차는 정상 가동 시 약 4°C 정도, 운전조건에 따라 약 2°C로 측정되었다.

즉, 지열시스템이 소용량일 때는 실내순환 수용, 지열교환기용 순환펌프의 소비동력이 발생하지 않거나 무시할 수 있지만, 지열시스템이 대용량이 되면 순환펌프와 지열시스템을 구성하는 기타 기기의 소비전력이 커지기 때문에 시스템 전체의 성능, 즉 에너지 절감율은 지열원히트펌프 단독운전일 때에 비해 상대적으로 저하되므로 대용량 지열시스템일수록 지열시스템 COP<sub>gts</sub>를 평가하는 것이 보다 현실적이라고 판단된다.

2008년 1월 24일 14시~15시 동안의 지열원히트펌프 입출상태를 측정된 데이터(표 5)를 지열원히트펌프 제조사로부터 입수한 지열원히트펌프의 성능사양(표 6)에 대입한 결과 도입된 지열원히트펌프의 성능은 4.0~5.3의 범위 내에서 작동되어야만 한다는 것을 파악하였다.

또한 측정된 데이터를 12시간 간격으로 누적하여 산출한 지열시스템 COP<sub>gts</sub>는 4.03~4.65 범위이고 평균 COP<sub>gts</sub>는 4.26임을 표 7에 정리하였다. 식 (1)과 식 (2)의 관계에서 지열원히트펌프 COP<sub>ghp</sub>가 지열시스템 COP<sub>gts</sub>보다 크거나 같아야만 하기 때문에 본 측정기간 동안의 지열원히트펌프의 평균COP<sub>ghp</sub>는 4.26 이상임을 예측할 수 있다.

따라서 본 현장에 도입된 지열원히트펌프는 제품성능사양 범위 내에서 운전되고 있음을 확인 할 수 있었다.

표 5. 지열원히트펌프 운전상태 (2008.01.24 14시~15시)

실내순환수 유량 [CMH]	20.68
지열원히트펌프 지열흡입온도, EST [°C]	10.4
지열원히트펌프 지열환수온도, LST [°C]	6.6
지열원히트펌프 지열측 온도차 [°C]	3.8
지열원히트펌프 실내공급온도, ELT [°C]	32.2
지열원히트펌프 실내환수온도, LLT [°C]	36.3
지열원히트펌프 실내측 온도차 [°C]	4.1

표 6. 지열원히트펌프의 제품성능사양

ELT [°C]	EST [°C]	LCMH [m³/h]	LWPD			SOURCE 90.0 GPM					SWPD	
			kg/cm²	FT HD [m]	LLT [°C]	HC [Meal/h]	KW	KE [Meal/h]	COP	LST [°C]	kg/cm²	FT HD [m]
26.4	4.4	15.5	0.6	6.4	31.5	76.4	19.4	59.7	4.6	1.4	1.1	11.3
		20.5	1.1	10.9	30.2	75.9	18.9	59.7	4.7	1.4	1.1	11.3
	15.5	0.6	6.4	32.3	89.1	20.1	71.8	5.2	6.3	1.1	11.1	
	20.5	1.1	10.9	30.2	88.2	19.5	71.2	5.3	6.3	1.1	11.3	
15.4	15.5	0.6	6.4	32.9	99.2	30.7	81.3	5.6	11.3	1.1	11.0	
	20.5	1.1	10.9	31.3	98.0	20.7	80.7	5.7	11.4	1.1	11.0	
27.6	4.4	15.5	0.6	6.3	42.4	74.7	24.9	53.3	3.5	1.8	1.1	11.3
		20.5	1.1	10.6	41.1	74.5	24.5	53.4	3.5	1.7	1.1	11.3
	15.5	0.6	6.3	43.1	86.8	25.6	64.7	3.9	6.7	1.1	11.1	
	20.5	1.1	10.6	42.2	86.4	25.1	64.8	4.0	6.7	1.1	11.1	
15.4	15.5	0.6	6.3	43.8	96.3	26.4	73.6	4.2	11.7	1.1	11.0	
	20.5	1.1	10.6	42.2	95.9	25.7	99.0	4.3	11.7	1.1	11.0	

표 7. 지열시스템의 COP<sub>gts</sub>

		지열 흡열량	실내 공급량	전력 소비량	COP <sub>GTS</sub>
2008.01.24	0시~12시	4.09	5.31	1.29	4.11
	12시~24시	4.64	6.15	1.53	4.03
2008.01.25	0시~12시	5.68	7.81	1.89	4.14
	12시~24시	3.37	6.93	1.49	4.65
2008.01.26	0시~12시	4.17	7.03	1.61	4.38

#### 4. 결 론

본 연구는 대형화 추세가 뚜렷한 국내 지열시스템 설비의 설계 데이터베이스를 구축하기 위한 목적으로, 현재 국내에서 가동 중인 지열설비 중 최대 용량인 400RT급 수직형 지열시스템이 적용된 현장에 대해 입주전 운전성능을 측정된 것이다. 연구성과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 4m 거리에 위치한 2개 보어홀의 지중 70m 깊이에서 측정된 온도변화는 동일하였다. 또한 지열원히트펌프 가동 시 지중 70m 깊이의 온도변화와 지열원히트펌프로 흡입되는 지열온도의 변화가 동일하였다.
- (2) 가동 중일 때의 지열원히트펌프 각각의 지열교환기측의 입출구온도차는 평균 4.1°C, 실내순환수측 입출구온도차는 평균 3.2°C로 측정되었다.
- (3) 지열교환기 토출측 주관(Main pipe)과 환

수측 주관의 지열 온도차는 난방부하에 따라 변동이 심하게 나타나고 있으나 지열시스템이 가동 중일 경우에는 평균 4.1°C로 측정되었다.

- (4) 대용량 지열시스템의 성능평가 방법으로 지열시스템을 구성하는 모든 구성기기의 소비전력량을 반영한 “지열시스템 COP<sub>gts</sub>”를 제안한다.
- (5) 본 현장의 지열시스템 COP<sub>gts</sub>는 4.03~ 4.65 범위에서 작동되고 있었고 평균 COP<sub>gts</sub>는 4.26로 산출되었다. 한편 식 (1)과 식 (2)의 관계에서 지열시스템 COP가 지열원히트펌프 COP<sub>ghp</sub>보다 작아야만 함에도 불구하고, 지열시스템 COP<sub>gts</sub>가 지열원히트펌프 제조사가 제시한 지열원히트펌프 COP<sub>ghp</sub> 범위를 만족하기 때문에 본 현장에 도입된 지열원히트펌프는 제품성능 사양 범위 내에서 운전되고 있음을 확인할 수 있었다.

6. Stephen P. Kavanaugh, Kevn Rafferty, Ground-Source Heat Pumps : Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings, ASHRAE, 1997
7. 北海道大学地中熱利用システム工学講座, 地中熱ヒートポンプシステム, Ohmsha, 2007

### 참 고 문 헌

1. 에너지관리공단, <http://racer.kemco.or.kr>
2. 김용식, 김중헌, 황광일, 주상복합 건축물에 적용된 지열이용 히트펌프시스템의 냉방성능 평가, 한국태양에너지학회 논문집, Vol.26, No.4, pp.9~16, 2006
3. 황광일, 이상우, 김중헌, 신승호, 김용식, 주상복합 건축물의 기초슬래브에 설치된 수평형 지열교환기의 계절별 성능평가, 한국태양에너지학회 논문집, Vol.27, No.2, pp.11~18, 2007
4. 황광일, 김중헌, 신승호, 김용식, 건물 기초슬래브에 설치된 수평형 지열교환기 성능의 경년변화, 대한건축학회논문집 계획계, 제23권 제5호, pp.179~186, 2007. 5
5. 이상우, 황광일, 김중헌, 신승호, CFD 해석에 의한 수직형 지열교환기의 성능예측, 한국태양에너지학회 논문집, Vol.27, No.3, pp.117~126, 2007