

물-공기 지열 멀티형 열펌프 시스템 실증연구

김철우, 김병국, 이평강[†], 임효재*, 강신형**, 최종민***

삼성전자 DAS사업팀, *호서대학교 기계공학과, **건양대학교 기계공학과, ***국립한밭대학교 기계공학과

Verification Experiment of a Water-to-air Ground Source Multi-heat Pump System

Cheol-Woo Kim, Byoung-Kook Kim, Pyeonggang Lee[†],
Hyo-Jae Lim*, Shin-Hyung Kang**, Jong Min Choi***

Digital Air-solutions Business Team, Samsung Electronics Co. Ltd, Suwon 442-742, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Hoseo University, Asan 336-795, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Konyang University, Chungnam 320-711, Korea

***Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

Abstract

The aim of this study is to verify the performance of water-to-air multi-heat pump system with a vertical U-tube GLHX(U-tube system) and a double tube GLHX(double tube system), which were installed in a school building located in Asan. For analyzing the performance of the GSHP system, we monitored various operating data, including the water temperature of inlet and outlet of the ground heat exchanger, mass flow rate, and power consumption. Daily average COP of the single U-tube system and the double tube system were 4.5 and 4.2 at cooling mode and were 3.5 and 3.8 at heating mode. As a result, We know that performance of water-to-air multi-heat pump unit is reliable at actual condition operated in a part load conditions for all day.

Key words : Water-to-air Ground Source Multi-heat pump(물-공기 지열 멀티형 열펌프), GSHP(지열 원 열펌프), GLHX(지중 열교환기), COP(성능계수)

기 호 설 명

COP_{HP} : 열펌프 유니트 성능계수

\dot{m} : 질량유량, [kg/s]

C_p : 비열, [J/kg · K]

Q_{od} : 실외기 방출 또는 흡입 열량, [kW]

$Q_{id,c}$: 실내기 냉방 용량, [kW]

$Q_{id,h}$: 실내기 난방 용량, [kW]

T_i : 실외기 열교환기 입구온도, [K]

T_o : 실외기 열교환기 출구온도, [K]

W_{HP} : 열펌프 유니트 소비전력, [kW]

[†] Corresponding author

Tel: +82-2-2023-6469; fax: +82-2-2023-4605

E-mail : pg2007.lee@samsung.com

접수일 : 2010년 4월 7일

심사일 : 2010년 4월 12일

채택일 : 2010년 5월 15일

1. 서 론

지열(地熱)은 열펌프의 열원 중에서 가장 안정적이고 친환경적이라고 알려져 있었지만, 지중열

교환기 시공비용으로 인해 초기투자비가 크다는 단점이 있어 타 열원에 비해 보급이 확산되기에는 현실적으로 어려움이 있었다. 그러나 2000년부터 관련 제도가 정비됨에 따라 지열 열펌프 시스템이 보급될 수 있는 기반이 마련되었다. 특히 2004년 3월 29일부로 ‘신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법’ 제12조 제2항에 의해 설치의무화제도가 시행되면서 지열 열펌프 시스템이 급속도로 확대 되었다. 에너지관리공단 ‘신·재생에너지 보급통계’에 따르면 국내에 2008년까지 104,922kW(약 3만 USRT)정도 지열원 열펌프가 설치된 것으로 집계되고 있으며^[1], 이는 연평균성장률(CAGR) 134% 수준이다.

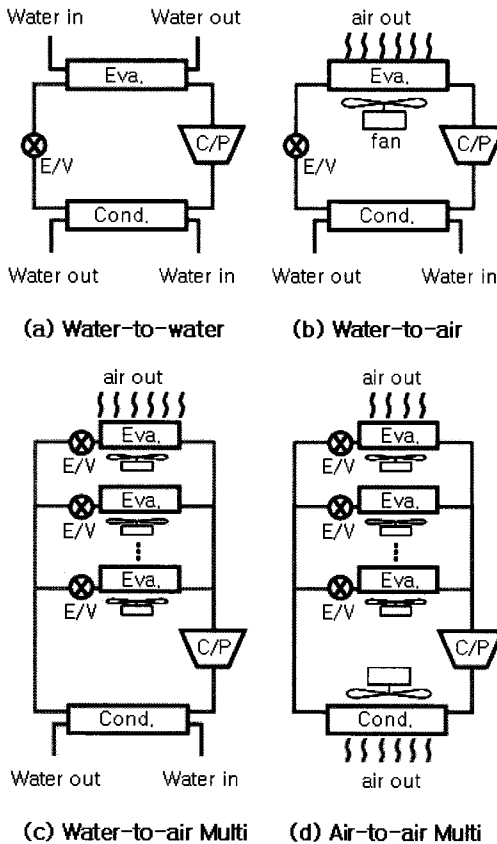


Fig. 1 The types of Heat Pump

Fig. 1은 열원측과 부하측에서 냉매와 열교환하는 열매체의 종류별로 열펌프 유닛 형식을 각각 표현한 것이다. Fig. 1에서 열원의 종류로만 열펌

프 형식을 다시 분류하면 (a) 물-물, (b) 물-공기, 그리고 (c) 물-공기 멀티형은 ‘지열원 열펌프’에 해당하며, (d) 공기-공기 멀티형은 ‘공기열원 열펌프’에 해당한다. 여기서 특히 지열원 열펌프 방식 중 (c) 방식은 2009년 12월 15일자로 지식경제부 고시 2009-310호에 의해 새로 추가된 방식으로서 ‘물-공기 지열 멀티형 열펌프 유닛(이하 물-공기 멀티형)’라 불린다.

Choi et al.^[2]의 2006년 까지 열펌프 형식별 지열 시스템 설치현황을 보면 물-물 방식이 78%, 물-공기 방식이 21% 정도 차지하는 것으로 집계되었으며, 2003년까지는 물-물, 물-공기 2가지 방식이 고르게 적용되다가 2003년 이후 부터는 물-물 방식이 크게 증가한 것으로 나타났다. 물-물 방식이 크게 증가한 이유로는 “지열시스템 도입 초기 단계에서는 두 가지 방식 모두에 대한 기술 검토가 이루어졌지만, 이후에는 적용성 면에서 물-물 방식이 공기조화기나 팬코일유닛, 바닥난방시스템 등에 더 적합하였기 때문”이라고 언급하고 있다.

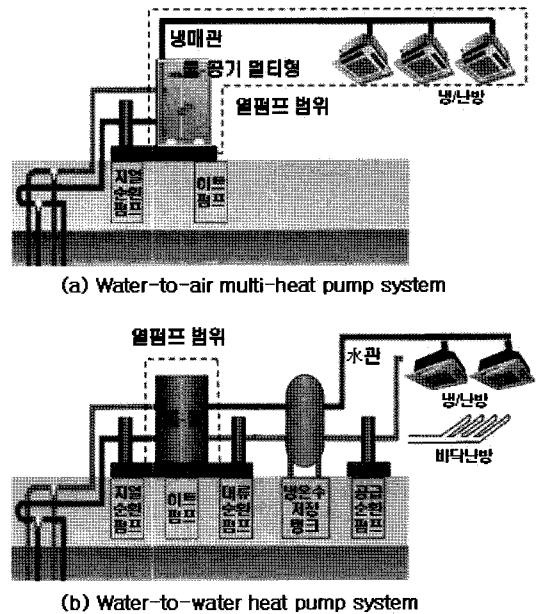


Fig. 2 The types of GSHP system

Fig. 2는 최근에 도입된 ‘물-공기 지열 멀티형 열펌프 시스템(이하 물-공기 멀티형 방식)’과 국

내에서 대부분 적용되고 있는 ‘물-물 지열 열펌프 시스템(이하 물-물 방식)’에 대한 개념도를 나타낸 것이다. 물-물 방식에 대비해 물-공기 멀티형 방식은 시스템 구성상 매우 간단하고 반송동력도 작을 것으로 예상되지만, 근래에 개발되었기 때문에 실사용 조건에서의 시스템 성능은 물론 유니트 자체 성능과 관련한 연구도 매우 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실사용 조건에서 ‘물-공기 지열 멀티형 열펌프 시스템’에 대한 성능평가를 수행함으로써 물-공기 멀티형 방식에 대한 적용 가능성과 신뢰성 검증을 위한 기초자료를 확보하는 것을 목적으로 하였다.

2. 시스템 구성 및 성능평가 방법

2.1 실증연구 현장 개요

실사용조건에서 성능측정을 위해 아산에 소재한 H 대학교 학군단(ROTC) 건물에 물-공기 멀티형 방식을 설치하였다. 대상건물은 연면적 1,092m², 지하 1층, 지상 3층 규모로 1998년 5월에 준공되었다. 방열기를 이용하여 난방만 실시하고 있었던 건물에 지열시스템으로 냉·난방이 가능하도록 시설을 구축하였다. Table 1은 공조대상 면적과 냉·난방부하를 각 층별로 정리한 것이다.

Table 1. Loads and air-conditioned areas of the building

Floor	Area(m ²)	Cooling load(kW)	Heating load(kW)
1st	211.2	44.5	36.3
2nd	129.6	27.1	19.3
3rd	158.4	36.3	31.3
total	499.2	107.9	86.9

2.2 지중열교환기 설계

‘신·재생에너지설비의 지원·설치·관리에 관한 기준^[3]’의 ‘지열원 열펌프 시스템 설치 및 설계 기준’에 따라 상용 지중열교환기 설계프로그램인 GLHEPRO^[4]를 이용하여 지중열교환기를 설계하였다. 지중열교환기 설계의 필수 자료인 지중열전

도도는 ‘지경부 고시 제 2008-3호’에 따른 절차 및 방법에 따라 측정하였다.

실증현장에 적용된 지중열교환기는 지중 열교환 성능에 대한 연구를 병행하기 위하여 U-tube 방식과 이중관 방식 2가지를 적용하였다. Fig. 3에 각각의 지중열교환기의 형식별 개념을 표현하였다. 열전도도 값이 2.09W/mK로 측정된 U-tube 방식 지중 열교환기는 천공깊이 150m, 5개로 결정되었고, 열전도도 값이 2.08W/mK인, 이중관식 열교환기는 천공깊이 100m, 3개로 결정되었다. 해당지역의 열전도도는 국내 평균값인 2.6W/mK 대비 약 80% 정도 수준이었다.

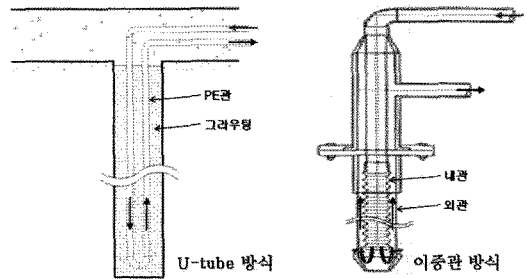


Fig. 3 Schematic diagram of GLHX

2.3 물-공기 지열 멀티형 열펌프 시스템 개요

본 연구에서는 Fig. 4와 같이 2가지 방식의 지열시스템을 각각 독립적으로 구성하였다. 이중관 방식에 연결된 열펌프 유니트(이하 이중관 시스템)는 1층과 2층 일부를, U-tube 방식에 연결된 열펌프 유니트(이하 U-tube 시스템)는 2층 일부와 3층의 냉·난방을 담당하도록 조닝하였다. Table 2에 U-tube 시스템과 이중관 시스템에 적용된 열펌프와 지중열교환기에 대한 설치사양을 나타냈다.

열펌프 유니트는 각각의 해당실에 적합한 용도와 부하정도에 따라 실내기를 선정한 뒤 실외기 제공용량 이내로 조합하였다. 1층 및 2층 일부를 담당하는 조닝에는 58kW(약 16usRT)급 실외기 1대와 실내기 7대(4kW, 7.2kW, 10kW, 11kW급 각 1대, 8.3kW급 3대)를 연결하였고, 2층 일부 및 3층을 담당하는 조닝에는 동일용량의 실외기 1대와 실내기 8대(7.2kW, 10kW급 각 1대, 5.2kW,

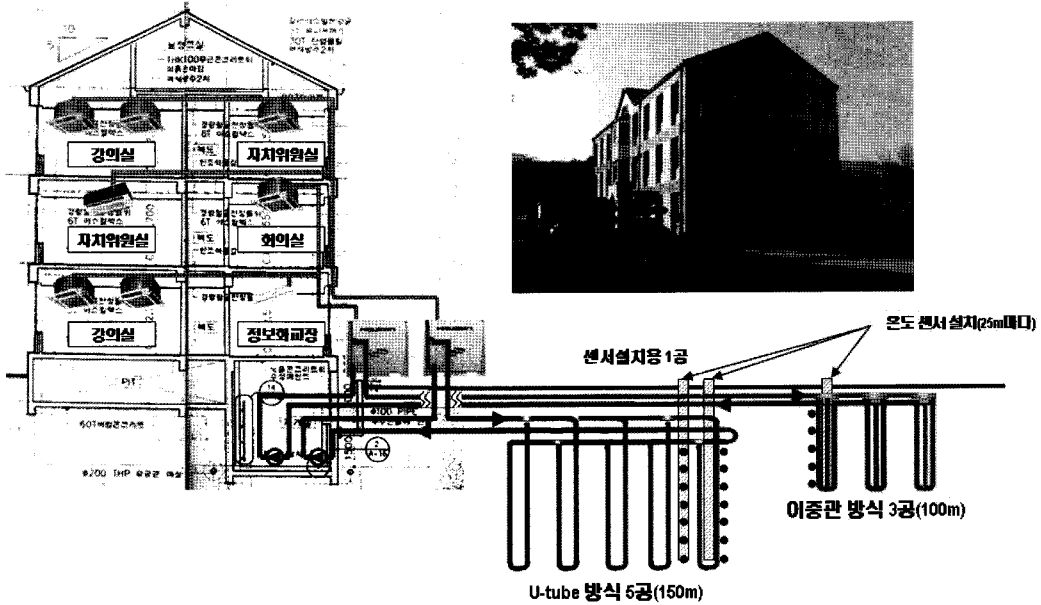


Fig. 4 Schematic diagram of a water-air ground source multi-heat pump system.

6kW, 8.3kW급 각 2대)를 각각 연결하였다.

지중 순환펌프는 2.2kW급 정속형 인라인 펌프를 1대씩 각각 설치하였다.

2.4 실증 데이터 취득 및 성능평가 방법

실증연구 대상 건물은 대학교의 학군단 건물이기 때문에 이용특성상 각 재실 공간의 용도가 다양하여 동시 사용율이 낮았으며, 대부분 부분부하로 운전되었다. 해당 시스템의 데이터 취득기간은 2008년 6월부터 2009년 2월까지 이나 본 연구에서는 일일 성능평가를 목적으로 하였기에, 가장 작거나 큰 부하율로 운전되었던 9월 30일과 1월 12일 측정결과에 대하여만 시스템 가동 시간 동안의 운전성능을 분석하였다.

데이터 확보 및 성능 분석을 위해 온도 센서, 유량계, 전력량계 등을 설치하였다. K형 열전대를 이용하여 지중 순환수의 실외기 열교환기 입·출구 온도와 지중 열교환기의 표면온도를 측정하였다. 열펌프 유니트의 소비전력은 적산전력계(WT 230, Yokogawa Co., 정확도: ±0.5%)로 측정하였다. 지중 순환수의 유량은 체적유량계(LF 600, Toshiba, 정확도: ±2%)를 설치하여 측정하였다.

데이터 로거와 센서로 구성된 데이터 취득 시스템을 가동하고, 시스템 2차 유체 순환부와 지중 열교환부의 주요 데이터를 5초 간격으로 취득하여 컴퓨터에 저장하였다. 그리고 열펌프 유니트의 COP 산정을 위한 소비전력은 2초 간격으로 측정하였고 10분 간격으로 적산하였다.

각실에 설치된 다수의 실내기의 용량을 정확하게 측정하는 것이 현실적으로 매우 어려우므로 열펌프 유니트의 COP는 아래의 식 (1), (2), (3), (4)를 적용하여 산출하였다.

$$Q_{od} = \dot{m} C_p |T_i - T_o| \tag{1}$$

$$Q_{id,c} = Q_{od} - W_{HP} \tag{2}$$

$$Q_{id,h} = Q_{od} + W_{HP} \tag{3}$$

$$COP_{HP} = Q_{id} / W_{HP} \tag{4}$$

실외기 열교환기 입출구 온도와 유량을 측정하여 실외기 열교환기 열량을 산출하고(식 (1)), 열펌프의 소비전력을 이용하여 실내기 용량을 냉방시에는 식 (2)로, 난방시에는 식 (3)으로 각각 산

출하였다. 냉방시에는 실외기 열량에서 열펌프 유니트 소비전력을 빼고 난방시에는 반대로 더하였다. 열펌프 유니트의 COP는 식 (4)를 이용하여 계산하였다^[5].

Table 2. Details of GSHP system

Parameters		U-tube system	Double tube system
GSHP	type	Water-to-air Multi-heat pump	
	Refrigerant	R 410A	
	Manufacturer	Samsung Electronics Co.	
	Indoor(ID)	2way×2ea 4way×6ea	1way×1ea 4way×6ea
	Outdoor(OD)	1 ea	1 ea
	Type	U-tube	Double tube
GLHX	Thermal Conductivity	2.09W/m·K	2.08W/m·K
	Dia. of borehole	150 mm	150 mm
	Depth of borehole	150 m	100m
	Distance between boreholes	6 m	6 m
	No. of boreholes	5 ea	3 ea
	Tube diameter	32 mm	Inner 50.8 mm Outer 85.3 mm

물-공기 멀티형은 실내기 종류 및 개수, 냉매 배관 길이, 고저차 그리고 운전조건 등에 의해 성능이 변하는 특성이 있기 때문에 실 사용조건에서도 성능이 확보되는지를 파악하기 위하여 현장에서 측정된 성능을 공인시험기관에서 측정한 성능과 비교하였다. 정확한 성능비교를 위해서 동일 조합 및 배관연결 상태로 시험을 진행하여야 하나 한국냉동공조인증센터(이하 KRAAC)의 시험실 여건상 현실적으로 어렵다. 따라서 KRAAC에서 실시된 성능시험은 학군단에 설치한 동일모델의 실외기 1대에 10kW급 실내기 6대를 연결(냉매배관길이 120m)하여 진행하였다. Table 3은 KRAAC에서 발생한 시험성적서의 열원 및 부하측 온도별로, 능력과 COP를 각각 정리한 것이다^[6].

3. 결과 및 고찰

3.1 냉방성능

Table 3. KRAAC test result of GSHP

List	EWT (°C)	EAT (DB°C/WB°C)	Capacity (kW)	COP
Cooling mode	15	24/15	49.38	5.32
	25	24/15	47.61	3.91
	30	24/15	45.32	3.24
	15	27/19	57.81	6.43
	25	27/19	57.77	4.70
	30	27/19	54.97	3.48
Heating mode	20	20/15	71.27	5.14
	10	20/15	65.23	5.16
	5	20/15	55.64	4.65
	20	24/15	69.54	4.63
	10	24/15	58.84	3.89

*EWT: Entering Water Temperature (Heat Source Part)

EAT: Entering Air Temperature(Load Part)

냉방성능분석 대상일인 9월 30일의 U-tube 시스템과 이중관 시스템의 평균 부하율은 각각 59.3%, 45.1%이며, 피크부하수준은 정격능력대비 82%, 85% 수준이었다. 두 시스템 모두 14시경 부근에서 냉방용량이 가장 크게 나타났으며, 이는 일사량 증가와 외기 온도 증가에 따른 실내부하량 증가 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 5와 Fig. 6은 냉방 운전 시 시간에 따른 지중 열교환기 파이프 표면의 온도변화를 나타내었다. 냉방 운전시 열펌프 유니트의 실외기 열교환기는 응축기 역할을 한다. 따라서 냉매가 응축하는 과정에서 온도가 높아진 지중 순환수는 지중 열교환기를 순환하면서 지중으로 열을 방출하였다. 이중관 열교환기는 외관쪽에만 온도 센서를 설치하였기에 전체 지중부에 대하여 깊이가 변화되어도 ±0.8°C 이내로 표면온도가 유사하게 나타났다. 이는 지중 순환수가 이중관의 내측관으로 유입된 후 지중 최저 지점에 이른 후 다시 외측관을 흐르는 대향류로 구성되어 지중으로 열전달을 하기 때문인 것으로 분석된다(Fig. 3 참조).

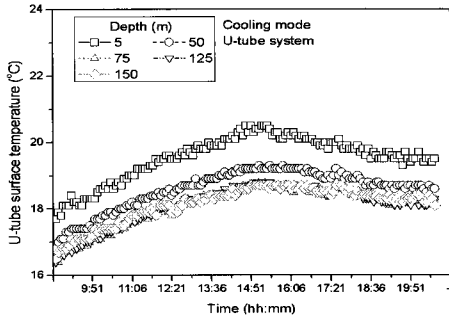


Fig. 5 Surface temperature of U-tube heat exchanger according to time.(Sept.30)

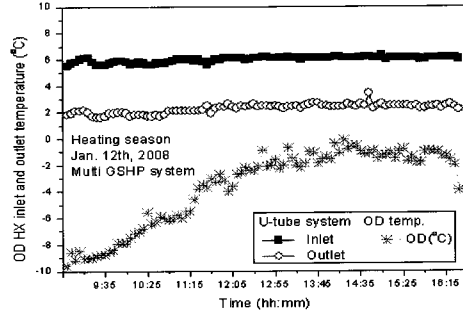


Fig. 9 Inlet/outlet temperature of U-tube OD HX according to time.(Jan.12)

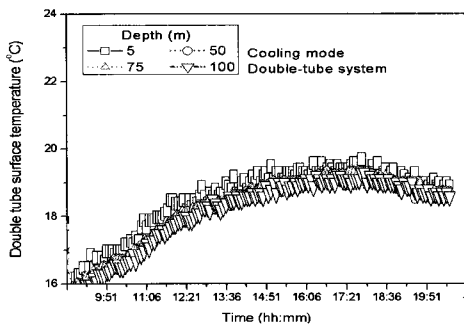


Fig. 6 Surface temperature of double-tube heat exchanger according to time.(Sept.30)

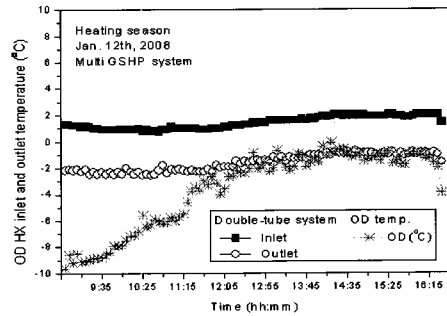


Fig. 10 Inlet/outlet temperature of double-tube OD HX according to time.(Jan.12)

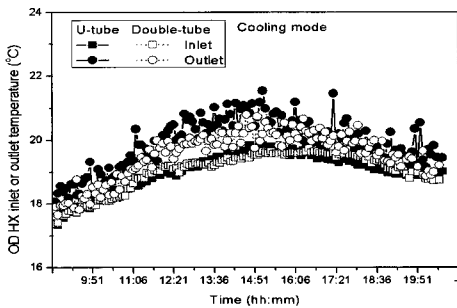


Fig. 7 Inlet and outlet temperature of OD HX according to time.(Sept.30)

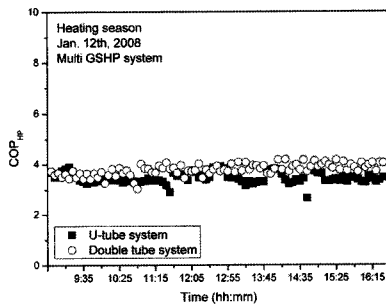


Fig. 11 COP of heat pump unit according to time.(Jan.12)

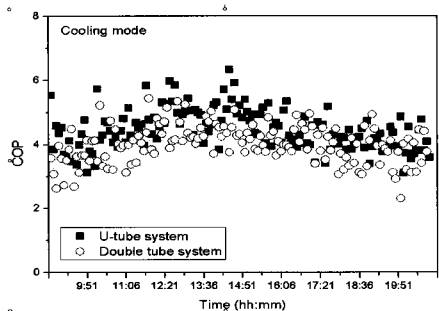


Fig. 8 COP of heat pump unit according to time.(Sept.30)

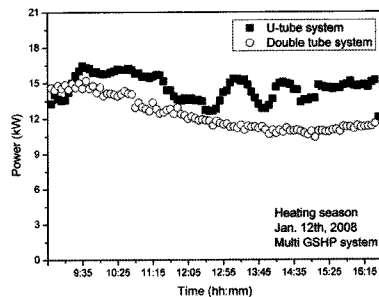


Fig. 12 Power consumption of heat pump unit according to time.(Jan.12)

Fig. 7은 열펌프 유닛의 실외기 열교환기 입·출구의 지중 순환수 온도를 나타내었다. 오전에 열펌프가 운전을 시작한 후 점차적으로 실외기 열교환기 입·출구 온도 모두 증가하다가 4시 이후에는 점차적으로 감소하였다. 실외기 열교환기 입구 온도보다 출구온도의 변화폭이 크게 나타났는데 이는 지중 열원의 안정성으로 인하여 열펌프의 열방출량이 빈번히 변화되어도 지중 순환수가 지중열교환기를 통과하면서 충분히 열회복을 한 뒤에 열펌프 실외기 열교환기로 유입되었기 때문으로 판단된다. 실외기 열교환기 출구 온도는 압축기 등의 용량 가변에 따라 열교환기의 열방출량 변화가 출구온도에 직접적인 영향을 주었기 때문에 변화폭이 크다.

Fig. 8은 U-tube 및 이중관 시스템의 시간의 변화에 따른 열펌프 유닛의 COP 변화를 나타내었다. U-tube 시스템의 열펌프 유닛과 이중관 시스템의 열펌프 유닛의 일일 평균 COP는 각각 4.5와 4.2로 나타났다. 이중관식 시스템의 COP가 전체적으로 U-tube 시스템보다 낮게 나타났는데, 이는 평균부하율이 전체적으로 작았고 실외기 열교환기 입구온도도 높았기 때문인 것으로 분석된다.

부분부하 운전 및 급격한 부하변동에도 불구하고 현장에서 측정된 COP는 KRAAC 시험결과인 4.6(조건: 열원측 20℃, 부하측 DB 24℃로 내삽값임)과 유사한 값이 측정되었다.

3.2 난방성능

난방성능분석 대상일인 1월 12일의 U-tube 시스템과 이중관 시스템의 평균 부하율은 각각 94%, 87%이며, 피크부하수준은 정격능력대비 112%, 105% 수준이었다. 지중열교환기 파이프 표면의 온도변화는 냉방시와 동일한 경향을 보였기에 본문에서 그래프는 생략하였다.

Fig. 9와 Fig. 10은 열펌프 유닛의 실외기 열교환기 입·출구의 지중 순환수 온도를 나타내었다. 냉방운전 결과와는 다르게 입출구 온도차는 크고 변화폭은 작았다. 이는 일 평균 부하율이 높은 상태로 연일 운전되었기 때문인 것으로 판단된다. 실외기 열교환기 입구의 지중순환수 온도는

변화폭이 미소한 반면, 출구온도의 변화폭이 다소 크게 나타나는 경향은 냉방시와 동일하였다. U-tube 및 이중관 시스템의 평균 유입온도는 각각 6℃, 1.4℃로 측정되었다. 이중관 시스템의 경우는 지중에서 열회복후 실외기 열교환기로 유입되는 열원수의 온도가 약 1℃정도로 낮게 형성(설계온도는 5℃임)되었는데 이는 예상 난방부하와는 다르게 난방가동시간이 동절기에 연속으로 누적되면서 지중온도가 점차 하강하였고 낮은 열전도도로 인하여 회복이 지연되었기 때문으로 판단된다. 특히 이중관 시스템의 조닝에는 동계방화중에도 계속 난방이 요구되는 행정실과 독서실이 위치해 있었기 때문으로 판단된다.

Fig. 11은 열펌프 유닛의 COP 변화를 나타내었다. U-tube 시스템의 열펌프 유닛과 이중관 시스템의 열펌프 유닛의 일일 평균 COP는 각각 3.5와 3.8로 나타났다. 실외기 열교환기 입구 수온이 상대적으로 높았던 U-tube 시스템의 COP가 전체적으로 이중관식 시스템보다 낮게 나타났는데, 이는 U-tube 시스템이 평균부하율과 피크 부하율이 전체적으로 높게 운전되어 Fig. 12에서 보여지는 바와 같이 소비전력이 높게 형성되었기 때문인 것으로 분석된다.

낮은 지중온도 및 과부하 운전으로 현장에서 측정된 COP는 KRAAC 시험결과인 4.65(조건: 열원측 5℃, 부하측 DB 20℃)대비 82% 수준으로 다소 낮게 측정되었다. 과부하운전으로 COP가 3.8 정도로 감소했음에도 불구하고, 난방성능 측정 당일의 기온도인 -10℃인 조건에서 공기열원 열펌프 COP 2.65 대비 43% 정도 더 우수한 성능을 나타냈다^[7]

4. 결론

본 연구에서는 ‘물-공기 지열 멀티형 열펌프 시스템’을 실제 사용건물에 설치하여 열펌프 유닛의 일일 냉·난방 성능을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

실제 사용 조건에서도 일일 평균 COP가 KRAAC의 시험결과와 유사한 값이 측정되어 ‘물-공기 지열 멀티형 열펌프 유닛’의 신뢰성을 확보할 수 있었다. 또한 난방시에 과부하운전으로 운영되었음에도 COP가 동일조건에서 예상되는

공기열원 열펌프 COP보다 43% 정도 더 우수한 것으로 나타나 연중 안정적인 성능을 제공하고 있음을 알 수 있었다.

연간 지중열 이용정도에 따라 지중온도가 냉·난방시 큰 폭으로 변하였으며, 지중온도 및 부하 상태에 따라 복합적으로 열펌프 유니트의 COP가 변화였다. 따라서 지열 시스템의 최적운전을 위해 지중열교환기 설계 및 실내부하예측에 대한 좀 더 신중한 접근이 필요할 것으로 판단된다.

물-공기 멀티형 열펌프에 대한 실증연구 및 효율향상을 위한 연구가 향후에도 지속적으로 진행된다면, ‘물-공기 멀티형 방식’에서의 에너지 절감효과는 냉온수계통 순환펌프 소비전력 및 열손실 요인이 추가로 발생하는 ‘물-물 방식’보다 더욱 향상 될 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Korea Energy Management Corporation, 2009.9, New & Renewable Energy Statistics 2008.
2. Choi, M. Y., Ko, M. J., Kim, Y. S., Park, J. C., and Rhee, E. K., 2009, Investigation and analysis on the present state of geothermal source heat pump system applied in Korea, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 21, No. 5, pp. 267-272.
3. Ministry of Knowledge Economy, 2008, Standards of support, installation, and management for new and renewable energy system, Ministry of Knowledge Enconmy Announcement 2008-3.
4. IGSHPA, 2007, GLHEPRO 4.0 for windows user's guide, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Oklahoma State University.
5. Stoecker, W. F. and Jones, J. W., 1982, Refrigeration & Air conditioning, McGraw-Hill.
6. Korea Refrigeration & Air-conditioning Assessment Center, 2009.9.14, Test Report No. KRAAC-B-09-041-1.
7. Korea Testing Laboratory, 2009.2.10, Test Report No. 08-2452-249-2.