주거용 건물 지열원 멀티 히트펌프시스템의 지열순환펌프 가변유량제어에 관한 실증연구

An Experimental Study on Variable-Speed Control of an Ground-Water Circulation Pump for a Ground Source Multi-Heat Pump System

송수원(Suwon Song)[†]

한국건설기술연구원 그린빌딩연구실

Green Building Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi-Do, Goyang-Si 411-712, Republic of Korea

(Received April 15, 2013; revision received June 5, 2013)

Abstract The purpose of this study is to propose an enhanced variable-speed control method of ground-water circulation pumps using inlet and outlet ground-water temperature difference and analyze its effect for the ground source multi-heat pump system installed in a single-family house. As a result, it has shown to significantly reduce the electricity use of ground-water circulation pump and improve overall system Coefficient of Performance (COP) due to the proposed variable-speed control under partial load conditions after oversized and inefficient single-speed pump retrofit.

Key words Ground-Source Heat Pump System(지열히트펌프 시스템), Circulation Pump(순환펌프), Inlet and Outlet Water Temperature Difference(입출구 온도차), Variable Speed Control(가변속도제어)

[†] Corresponding author, E-mail: swsong@kict.re.kr

기호설명

T_i	: 입구온도 ($^{\circ}\text{C}$)
T_o	: 출구온도 [$^{\circ}\text{C}$]
dT_i	: 입출구 온도차 [$^{\circ}\text{C}$]
dT_{set}	: 입출구 목표온도차 [$^{\circ}\text{C}$]
PI	: 비례적분(Proportional-integral)
K_p	: 비례항(Proportional gain)
K_i	: 적분항(Integral gain)
COP	: 성적계수(Coefficient of Performance)

1. 서 론

정부의 국가 온실가스, 에너지 감축목표를 이행하기 위하여 신재생에너지의 보급 활성화 정책과 더불어 그린홈 또는 제로에너지 건물 구현을 위한 지열히트펌프 시스템의 활용은 지속적인 관심의 대상이 되고 있다.

지열히트펌프시스템은 일반적으로 하나의 실외기 유닛이 다수의 실내기를 포함하고 있으며 각 실내기의 가동 유무에 따라 대부분 부분부하 상태로 운전된다. 이와 관련하여 최근에는 실내 부하의 변동에 대응하여 실외기가 운전되도록 용량가변형 압축기를 채용한 지

열히트펌프시스템이 증가하고 있다. 하지만 지열순환 펌프의 경우, 대부분 정속펌프를 사용함으로써 부분부하 운전시에 전체적인 지열히트펌프시스템의 효율이 저하되는 원인이 되고 있다.^(1,2)

지금까지 지열히트펌프시스템의 냉, 난방 성능평가에 대한 연구는 주로 지중열교환기의 인입온도(Entering Water Temp., EWT)와 출구온도(Living Water Temp., LWT)의 변화에 따른 히트펌프의 소비전력과 성적계수(Coefficient of Performance, COP)에 대하여 수행되었으며,^(3,4) 지열순환펌프의 유량제어를 통한 지열히트펌프시스템 전체의 성능을 개선하기 위한 선행 연구는 상대적으로 미비한 실정이다. 순환펌프의 유량제어를 위한 인버터제어 방식은 보통 제어신호의 하한 값을 작게 하는 것이 에너지절감 측면에서 효과적이지만 펌프의 수두 등을 충분히 고려하여 결정해야 한다.⁽⁵⁾ 이와 관련하여 기존의 인버터제어 방식은 주로 배관의 차압을 이용한 펌프의 유량을 제어하고 있으나 이론적으로 온도차에 대한 유량제어가 부하의 대응과 에너지절감 측면에서 더욱 효과적이다. 하지만, 지열히트펌프시스템에서 기존의 온도차에 의한 지열순환펌프의 유량제어방법은 대부분 지열측 열교환기의 출구온도

를 일정하게 유지하기 위하여 유량을 제어하는 방법으로 지열히트펌프의 냉, 난방 운전 전환 시에 출구온도를 재설정하여야 하는 문제점을 가지고 있으며, 이를 이용한 지열순환펌프 유량제어 적용사례 또한 미비한 실정이다.

본 연구는 지열히트펌프시스템의 지열측 입/출구 온도차를 이용한 지열순환펌프의 가변유량 제어방법을 제안하고, 이를 실제 H사의 시범주택에 설치된 용량가변형 지열히트펌프시스템에 대한 실증연구 통하여 적용 타당성을 검증하였다.

2. 실증연구 대상건물

2.1 대상건물 개요

본 연구의 대상건물은 대전에 위치한 H사의 지상 2층으로 연면적 214 m²의 그린홈 시범주택이다. 대상건물은 Fig. 1의 좌측에 위치한 단독주택으로 기존주택 대비 총에너지 30% 및 냉, 난방 에너지 50% 이상 절감을 목표로 설계되었으며, 이를 달성하기 위하여 고성능창호 및 외단열시스템 등 건축적인 에너지절감 요소뿐만 아니라 건물의 냉, 난방 및 급탕 설비시스템으로 지열히트펌프시스템을 적용하였다.

2.2 지열히트펌프시스템

대상건물의 지열히트펌프시스템은 기본적으로 하나의 실외기를 이용하여 냉, 난방 및 급탕 모두를 담당할 수 있도록 구성되어 있다. 난방방식은 지열히트펌프시스템의 온수를 이용한 건식바닥복사난방 방식이며, 냉방은 지열히트펌프시스템의 냉매배관이 실내기에 직접 연결되며 실내기 팬을 이용하여 실내공기를 냉방하는 방식을 채택하고 있다. 급탕은 저장조의 설정온도를 기준

Fig. 1 Bird-eye view of the case-study building.

Fig. 2 Schematic diagram of the GSHP system with measurement points.

으로 시스템이 운전되도록 하고 있으며, 삼방밸브를 이용하여 필요시에는 난방온수가 급탕부하의 일부를 담당할 수 있도록 설계되었다. Fig. 2는 지열히트펌프시스템 전체적인 구성 및 모니터링을 위한 측정센서의 위치를 구체적으로 보여주고 있으며, 기본적으로 Resistance Temperature Detector(RTD) 센서를 이용하여 지열측 입/출구 온도는 측정하고, 유량은 전자식 유량계를 설치하여 실시간으로 측정하도록 하고 있다.

한편, 대상건물은 지열히트펌프시스템의 지중열교환기를 설치하기 위하여 깊이 150 m와 100 m의 두 개의 천공을 가지고 있으며, 보어홀 간격은 5 m이고 지중 순환수는 동파를 방지하기 위하여 에탄올을 혼합액으로 사용하였다. 또한, 지열 천공이 위치한 토양 열전도도는 측정결과 3.55 W/mK를 나타냈다. Table 1은 대상건물에 설치한 지열히트펌프시스템의 사양을 나타내고, Table 2는 지중열교환기를 설치한 지열 천공 및 토양의 사양을 나타내고 있다.

Table 1 Specifications of the GSHP system

Items		Specifications	Remarks
Normal capacity	Cooling	14.4 kW	-
	Heating and DHW	16.5 kW	-
Electricity	Cooling	3.0 kW	COP 4.8
	Heating and DHW	4.13 kW	COP 4.0
Compressor Type		Inverter	-
Refrigerant		R410a	-
Max. DHW temp.		65°C	Superheated
Circulation Pumps	Ground Water	0.6 kW	Single-speed with 60% of efficiency
	Heating	0.25 kW	
	DHW	0.25 kW	

Table 2 Thermal properties of soil and vertical wells

Items		Vertical Well 1	Vertical Well 2
Vertical Well Properties	Depth	150 m	100 m
	No. of Well	1	1
	Spacing	5 m	5 m
	Borehole Diameter	150 mm	150 mm
	Circulation Fluid	Water : Ethanol(12.9%)	Water : Ethanol(12.9%)
	Pipe Resistance	0.061 mK/W	0.061 mK/W
Soil Thermal Properties	Ground Temp.	15.88°C	15.55°C
	Thermal Conductive	3.25 W/mK	3.55 W/mK
	Thermal Diffusivity	0.084 m ² /day	0.084 m ² /day

3. 실증장치 및 방법

3.1 실증장치 구성

본 연구는 실증주택의 지열히트펌프시스템의 지열 순환펌프의 유량제어를 위하여 기존의 단상 정속순환 펌프를 삼상 순환펌프로 교체하고, 인버터를 포함한 별도의 순환펌프 유량제어기를 제작하여 설치하였다.⁽⁶⁾

Table 3은 지열순환펌프 교체 전과 후의 사양을 나타내고 있으며, 교체한 펌프의 용량(0.55 kW)은 기존의 정속펌프의 용량(0.6 kW)과 유사하지만 펌프의 효율은 60%에서 83%로 크게 향상되었다. Fig. 3은 본 연구를 위하여 설치한 유량제어기 및 측정 센서의 위치에 대한 구성을 개념적으로 나타내고 있으며, Fig. 4는 지열순환펌프 유량제어기의 제어화면을 보여주고 있다.

Table 3 Specifications of ground-water circulation pump before and after pump retrofit

Items	Specifications	
	Before	After
Control	Single-speed	VFD
Design Capacity	0.6 kW	0.55 kW
Design Head	20 m	12.7 m
Design Flow	95 lpm	118 lpm
Efficiency	60%	83%

Fig. 3 Schematic diagram of the GSHP system with a flow controller at heating mode.

Fig. 4 Photograph of the variable-speed control panel.

3.2 지열순환펌프 가변유량제어 방법

본 연구의 온도차를 이용한 가변유량제어 시스템의 구성은 지열히트펌프의 지열측 입/출구 온도센서, 온도차 연산기능 및 비례적분(PI)제어 기능을 포함한 유량제어기, 변환모듈기, 인버터, 및 펌프를 포함하고 있다. Fig. 5는 본 연구에서 제안한 입/출구 온도차에 의한 지열순환펌프의 유량제어 알고리즘을 나타내고 있으며 이를 구체적으로 살펴보면 먼저, 기존의 지열히트펌프 주제어기에서 가동신호를(On) 보내면 온도측정부에서 지열측 입구온도(T_i)와 출구온도(T_o)를 측정하고 변환모듈기를 통하여 전기신호를 유량제어기에 전달한다. 유량제어기는 측정된 입/출구 온도차의 온도차($T_i - T_o = dT_i$) 연산하고 이를 설정된 목표온도차(dT_{set})와 비교하여 오차 즉, 온도편차($dT_{set} - dT_i = dT_i$)를 비례적분(PI) 제어기에 전달한다. PI제어기는 연산된 오차와 기 설정된 비례항(K_p) 및 적분항(K_i)를 이용하여 비례적분(PI)제어를

Fig. 5 Flow chart of variable-speed control for ground-water circulation pumps.

수행함으로서 측정된 입/출구 온도차(dT_t)가 설정된 목표온도차(dT_{set})에 도달하도록 실시간 유량제어 출력신호(전달함수)를 변환모듈기에 전달한다. 변환모듈기는 PI 제어에 의한 실시간 출력신호를 전기적인 신호로(0~10 V) 변환하여 인버터에 전달하고 모터의 회전수를 제어함으로써 설정된 목표온도차(dT_{set})를 유지하기 위하여 지열순환펌프의 유량을 실시간으로 제어하게 된다. 이때 순환펌프의 유량제어는 설정된 펌프의 최소가동율(%) 이상으로 제어함으로서 지나친 유량의 감소로 인한 지열히트펌프의 성능 저하를 방지하도록 하고 있다.

4. 실증결과 및 고찰

4.1 지열히트펌프시스템 운전특성 및 소비전력 분석

본 연구는 기존의 정속순환펌프를 변속순환펌프로 교체하고 변유량제어를 실시하기 위하여 지열측 입/출구 목표온도차는 3°C 로 고정하고 펌프의 최소가동율은 40%로 설정하였으며, 이를 통하여 유량 감소로 인한 히트펌프시스템의 성능저하에 대한 안전성을 고려하

였다. Table 4는 지열순환펌프의 교체 전과 후에 비교적 유사한 운전조건을 나타내는 3월 25일과 12월 14일의 측정결과를 비교하여 나타내고 있다. 지열순환펌프 개수 전과 후에 지열히트펌프시스템의 난방 온수 공급(50°C) 및 환수(45°C) 온도의 차는 대략 5°C 로 유지되고 있으며, 난방온수의 유량은 5 lpm에서 25 lpm 사이에서 변화의 폭이 비교적 크게 나타나고 있다(Fig. 6 참조). 반면에, 개수 전에 지중 순환수의 지열히트펌프 입구온도(12°C)와 출구온도(10°C)는 평균 1.38°C 의 차이를 나타내었으나, 개수 후에는 유량이 감소함으로써 평균 1.91°C 온도차를 유지하는 것으로 나타났다(Fig. 7 참조).

지열순환펌프 유량제어를 실시한 후에 유량이 평균 73.1 lpm에서 39.1 lpm으로 감소하였으며, 펌프의 소비동력은 평균 825.2 W에서 44.8 W로 크게 감소하였다(Fig. 8 참조). 이는 Table 5와 같이 1차적으로 펌프의 교체 전과 후의 설계용량이 0.6 kW에서 0.55 kW로 감소하고 펌프의 효율이 60%에서 83%로 향상된 결과이며, 2차적으로 순환펌프의 유량이 기존 73.1 lpm에서 39.1 lpm으로 거의 50% 감소한 결과이다. 결과적으로 변속순환펌프의 최대 설계유량(118 lpm)에 비하여 실측 유량(39.1 lpm)이 거의 66% 감소함으로써 펌프의 소비동력이 평균 94.6% 절감되는 효과가 나타났다. 한편, Fig. 9와 같이 지열 순환펌프 개수 전과 후에 실제 측정된 지열히트펌프시스템의 난방 및 급탕 용량의 변화를 살펴보면, 초기 설치 용량(16.5 kW)에 비하여 대부분 부분부하 상태로 운전되는 것으로 나타났다. 또한, 지열순환펌프 개수 후에 지열히트펌프시스템의 매시간 생산열량 및 소비전력이 전체적으로 감소하였으나 전체 시스템의 가동시간은 늘어난 것으로 나타났다. 이는 지열순환펌프 개수 전과 후에 낮과 밤의 외기온도 차에 따른 실증주택의 난방 부하의 변동, 이에 대응하는 지열히트펌프시스템의 압축기 용량변화, 그리고 지열순환펌프의 운전방식 변화 등의 복합적인 요인에 기인한 것으로 판단된다.

Table 4 Comparison of measured data before and after circulation pump retrofit

Date	Mar. 25th	Dec. 14th	Remarks
Pump Control	Single speed	Variable-speed	-
Design Capacity	600 W	550 W	
Max. Power	872.3 W	123 W	Measured
Water Flow Rate	73.1 lpm	39.1 lpm	
Inlet and Outlet Temp. Difference	1.38°C	1.91°C	Measured Average
Pump Electricity	825.2 W	44.7 W	
Savings(%)	-	94.6%	Average

Fig. 6 Time series plot of hot-water supply and return temp. and hot-water flow rate before(3/25) and after(12/14) ground-water circulation pump retrofit.

Fig. 7 Time series plots of ground-water supply(inlet) and return(outlet) temp. with residual before(3/25) and after(12/14) ground-water circulation pump retrofit.

Fig. 8 Time series plots of ground-water flow rate and pump electricity use before(3/25) and after(12/14) ground-water circulation pump retrofit.

Fig. 9 Time series plots of ambient temp., heating and DHW capacity, and GSHP system power before(3/25) and after (12/14) ground-water circulation pump retrofit.

4.2 지열히트펌프시스템 난방성능 분석

지열히트펌프의 난방성능은 일반적으로 히트펌프의 응축기에서 생산된 열량(Q)을 히트펌프의 압축기 소비전력(W)으로 나누고 이를 성적계수(Coefficient of Performance, COP)로 표시된다. 하지만, 본 연구에서는 실증주택의 난방 및 급탕 부하를 감당하기 위하여 응축기에서 생산된 총열량(kW)을 투입된 총전력(kW) 즉, 압축기와 순환펌프에 투입된 소비전력(kW)으로 나누어 전체 지열히트펌프시스템의 성능을 평가 하였다. 지열순환펌프 개수 전에 지열히트펌프시스템의 총 생산열량은 81 kWh/day으로 나타났고 시스템 전체 소비전력은 35 kWh/day로 나타남으로서 성적계수는 COP 2.35로 산출되었다. 순환펌프 개수 후에 지열히트펌프시스템의 총 생산열량이 124 kWh/day이고 소비전력은 48 kWh/day로 나타났으며 성적계수는 COP 2.61로 산출되었다. 결과적으로 지열순환펌프 개수 후에 펌프의 소비동력 감소로 인하여 전체적으로 지열히트펌프시스템의 성능이 향상되는 효과가 나타났다(Fig. 10 참조).

4.3 지열순환펌프의 가변유량제어 특성

Fig. 11은 지열순환펌프 개수 후에(11월 14일) 1분 간격으로 측정된 지열순환펌프의 유량과 소비전력의 상관관계를 나타내고 있다. 측정된 지열순환펌프의 소비전력이 유량의 제제곱에 거의 비례하여 나타남으로써 본 연구에서 제시한 입/출구 온도차에 의한 지열순환펌프의 유량제어 방법이 펌프의 상사법칙에 유사하게 부합하는 것으로 나타났다. 한편, 측정된 지열순환펌프의 유량이 펌프의 최소가동율(40%) 부근에 밀집되어 나타났다. 따라서 시스템의 안전성을 고려하여 설정한 입/출구 목표온도차(3°C)를 일반적으로 사용되는 입/출구 온도차(5°C) 수준으로 조정하고, 펌프의 최소가동율(40%)도 30% 수준으로 작게 설정하여 유량을

Fig. 10 Comparison of GSHP system COP before(3/15) and after(12/14) circulation pump retrofit.

Fig. 11 Relationship of ground-water flow rate vs. pump electricity use.

감소시키면 펌프 소비동력의 추가적인 절감도 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 지열측 입/출구 온도의 차를 이용한 지열순환펌프의 유량을 제어하는 방법을 제안하고, 실제 H사의 시범주택에 설치한 지열히트펌프시스템에 대한 실증연구를 수행하여 다음과 같은 결과 및 결론을 도출하였다.

- (1) 초기에 과다 설계된 대상건물의 정속 지열순환펌프를 고효율의 변속 순환펌프로 교체하고, 본 연구에서 제안한 지열측 입/출구 온도차에 의한 지열순환펌프 가변유량제어를 실시한 결과, 실측된 유량(39.1 lpm)이 최대 설계유량(118 lpm)에 비하여 거의 66% 감소함으로써 펌프의 소비동력이 평균 94.6% 절감되는 효과가 나타났다.
- (2) 지열히트펌프의 부분부하 시에 측정된 지열순환펌프의 소비전력이 유량의 제제곱에 거의 비례하여 나타남으로써 본 연구에서 제시한 입/출구 온도차에 의한 지열순환펌프의 유량제어방법이 실증연구를 통하여 유효한 것으로 나타났다.
- (3) 지열순환펌프 개수 전과 후에 지열히트펌프시스템의 난방 성적계수는 순환펌프의 소비동력을 포함하여 COP 2.35에서 COP 2.61로 나타남으로써 전체적인 시스템의 성능이 향상되었다.
- (4) 결론적으로 본 연구를 통해 지열히트펌프시스템은 히트펌프 자체의 효율도 중요하지만 순환펌프의 효율 및 제어방법이 시스템 전체의 효율개선에서 중요한 요소로 작용하는 것을 확인할 수 있었다.

향후에는 지열히트펌프시스템의 냉방성능, 초기투자비, 및 에너지절감 효과 등을 종합적으로 고려한 시스템 최적화 및 실용화를 위한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업(13-주요-임무)의 일환으로 수행되었으며, 저자가 한국전력연구원에서 수행한 연구 내용의 일부를 보완하여 작성한 것임.

참고문헌

1. Song, S., 2011, Whole Building Performance Evaluation of An All-electrified house integrated with ground-source heat pump system, Proceedings of International Conference on Air-Conditioning and Refrigeration 2011 (ICACR 2011).
2. Choi, J. M., Lim, H. J., Kang, S. H., Moon, J., and Kim, R. H., 2009, Daily Heating Performance of a Ground Source Multi-heat pump at Heating Mode, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 21, No. 9, pp. 527-534.
3. Ahn, B. C. and Kim, J. W., 2010, An Experimental Study on the Cooling Operation Characteristics for Different Entering Water Temperatures in Geothermal Heat Pump System, Transactions of the Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 6, No. 1, pp. 1-7.
4. Kong, H. J., Kang, S. J., Yun, K. S., and Lim, H. J., 2013, An Experimental Study on the Cooling and Heating Performance of a Residential Ground Source Heat Pump System, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 25, No. 3, pp. 156-163.
5. Song, J. Y. and Ahn, B. C., 2011, Control Characteristics with Flow Rate Control Methods in Central Heating System, Transactions of the Korea Society of Geothermal Energy engineers, Vol. 7, No. 1, pp. 32-37.
6. Song, S., 2012, An Experimental Study on Variable-speed Control of a Ground-water Circulation Pump Using Inlet and outlet Water Temperature Difference, Proceedings of the SAREK 2012 Summer Annual Conference, pp. 179-182.