사무용건물에서 지열히트펌프냉난방시스템의 운전성능 평가

안형준†, 백성권, 조정식*, 손병후*
코오롱건설(주) 기술연구소, *한국건설기술연구원 화재설비부

Performance for Geothermal Heating & Cooling System by Heatpump in Office Building

Hyung-Jun An†, Sung-Kwon Baek, Chung-Sik Cho*, Byung-Hu Sohn*
†*R&D Center, Kolon Eng. & Constr. Co., Ltd., Yongin, 449-815, Korea*
**Fire & Engineering Services Research Department, KICT, Goyang, 411-712, Korea*

Abstract

For the perfomance test of geothermal system, a large pilot of capacity of 50RT is built and operated in office building. This system is planed hybrid system with cooling tower as asisstance heat sink. From October, 2004 to September, 2005, this system is operated and monitored. As the result, COP of heating periods is about 3.46 and COP of cooling periods is about 4.1. Therefore, geothermal system is useful and suitable in Korea.

Key words : Geothermal energy(지열에너지), Ground heat exchanger(지중열교환기), Heat pump(열펌프), Operational Perfomance(운전성능)

1. 서 론

지열냉난방시스템은 지열원 히트펌프설비를 이용하여 냉난방을 공급하는 설비조합을 통칭하는 말로 지열냉난방시스템이 2000년도부터 본격적으로 국내에 도입되고 정부의 대체에너지의무화제도실시에 따라 많은 적용사례가 발생하고 있다. 그러나 기술도입초기임에 따라 설계/시공기술의 부실문제가 발생하고 있으며 이에 따른 성능인증 및 운전성능의 평가가 중요한 과제로 대두되고 있다. 본 연구는 지열냉난방시스템의 도입초기인 2002년도에 산업자원부 산하 신재생에너지센터가 지원하는 국책과제인 '지열냉난방실증연구'를 통해 수행된 사무용건물의 운전성능평가에 대한 것으로 지열냉난방시스템의 성능평가를 위한 시험 및 계측항목을 제시하고 이를 통해 얻어진 지열냉난방시스템의 장단기 운전성능평가 결과를 분석하고자 한다.

이에 따라 2,053m^{2}의 면적을 가진 사무용건물에 50RT규모의 지열냉난방설비를 설치하고 2004년 10월부터 2005년 9월까지 1년여의 운전성능평가를 실시하였다.

지열냉난방시스템의 운전성능평가는 1990년대부터 미국을 중심으로 다양한 대상과 목적을 가지고 수행되었으며 특히 Hughes & Shonder[1]에 의해 4,000 가구의 대규모 지열냉난방시스템에 대한 성능평가가 이루어졌다. 국내에서는 손병후 외 3인[2]에 의해 소규모 지열냉난방시스템에 대한 성능평가가 수행되었다.

국내에서도 설치사례가 증가함에 따라 실제의 사무용건물에 지열냉난방시스템을 설치하고 운전

† Corresponding author
Tel.: +82-31-329-0634
E-mail address: hgan@kolon.com

성능을 평가하는 것은 향후 지열냉난방시스템의 보급활성화를 위해 중요한 의의가 있다.

2. 평가대상 및 평가방법

2.1 평가대상 건물 소개

지열냉난방시스템의 실증적용 건물은 대체에너지 의무구매제도의 적용대상인 3,000 m^2의 공공건물에 적합하도록 선정하고자 하였으며 이에 따라 코오롱건설(주)의 기술연구소를 신축하고 이 건물에 지열냉난방시스템을 설치하였다. 기술연구소의 제원은 Table 1과 같고 조감도는 Fig. 1과 같다.

Table 1. Building for perfomance analysis

Item	Content
Use	Office building
Structure	3floor, base 1floor
Area	2,053 m^2
Locaction	Yongin, Korea

Table 2. Spec. of geothermal heatpump system

Item	Content
Use	Office building
HVAC type	All air conditioning system
Heatpump	Water-Water 1ea(1.5RT) Water-Air 11ea(50RT) (GEH48 5ea, GEH60 6ea, Trane)
GHEX	Vertical closed loop type borehole depth 212 m × 6 hole
Fluid	Water&Methanol mixed by9:1
Ass. heat sink	Cooling tower(Cap. 10 RT)
Control	Zone on/off & temp. control Central DDC & monitoring

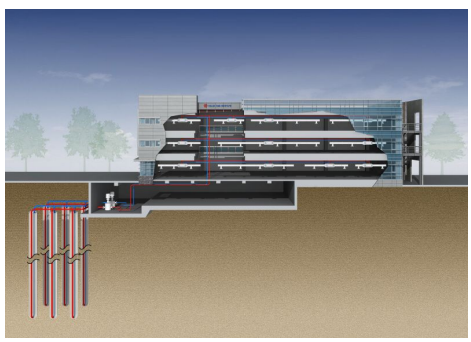

Fig. 1. Geothermal heatpump system

본 건물은 친환경 저에너지건물을 목표로 설계되었으며 주요 적용기술은 다음과 같다.

- 주요 적용기술
  - ○ 에너지절약 : 옥상녹화, 내부형 이중외피
  - ○ 신재생에너지 : 지열냉난방시스템, BIPV

2.2 지열냉난방시스템 설계

본 연구는 사무용 건물에 적합한 지열냉난방시스템을 설계, 시공 및 평가하는 것으로 다음과 같은 항목에 유의하여 지열냉난방시스템을 선정하였다.

① 지중열교환기 최소화 및 보조열원 활용
② 에너지 절약형 히트펌프 적용
③ 중앙자동제어 및 개별제어 혼용

지열냉난방시스템의 설계과정은 ASHRAE[3]의 설계절차에 따라냉난방부하와 설비용량을 결정하는 단계와 지중열교환기를 설계하는 단계로 구분할 수 있다.

먼저 첫 번째 단계에서는 냉난방부하를 결정하기 위해 냉난방부하설계 프로그램인 Trace 700을 이용하여 분석하였다. 그 결과, 본 건물의 냉방부하는 40 RT, 난방부하는 32 RT로 나타났다. 이는 일반적인 사무용건물에 비해 40~50% 낮은 부하값이며 에너지절약기술의 적용에 따른 효과로 판단된다. 지열냉난방시스템의 초기투자비가 높다는 점을 고려하면 에너지절약기술의 적용을 통해 냉난방부하와 설비용량을 줄이는 기법이 향후 설계에 필수적인 항목이 될 것으로 판단된다.

다음으로 지중열교환기의 설계는 미국 오클라호마주립대학에서 J. Bose et al[4]에 근거하여 개발된 GLHE pro 3.0 프로그램을 이용하여 실시되었다. 지중열교환기의 용량은 지반의 열물성, 그라우트 재료와 열교환 파이프의 열물성, 냉난방부하특성 등에 따라 결정된다. 특히 Kavanaugh & Ralterty[5]의 상업용 건물설계방법에 근거하면 냉난방부하가 상이할 경우 부하가 적은 쪽을 선정하고 보조열원을 설치하는 것이 지중열교환기 설계에서 중요하다.

본 건물의 경우에도 난방부하 32RT에 맞추어 지중열교환기를 설계하고 부족한 냉방부하 8RT는 냉각탑을 보조열원으로 설계하였다.

이러한 설계결과를 바탕으로 결정된 지열냉난

방시스템의 사양은 Table 2와 같다.

2.3 지열냉난방시스템 시공

지열냉난방시스템의 전체 시공은 다음과 같은 순서로 이루어졌다.

(1) 수직형 지중 열교환기 보어홀 천공
- 보어홀은 200m로 설계하였으나 천공예비율을 고려하여 21m로 시공되었다. 전체 천공수는 6공으로 6m 간격으로 2×3열의 형태로 설치되었다.

(2) 지중 열교환기 파이프(HDPE U자 관) 삽입
- 열교환 파이프는 내경 40mm의 제품을 사용하였는데 이는 열교환파이프의 직경이 클수록 열교환성능이 우수하기 때문이다.

(3) 지중 열교환기 보어홀 그라우팅
- 열교환파이프와 보어홀사이의 빈공간은 열전도를 막고 외부의 오염원이 지하로 유입되는 통로가 되므로 완전 밀폐한다. 그라우트재료는 벤토나이트에 열전도율이 높은 실리카샌드를 혼합하여 시공하였다.

(4) 지중열교환기 파이프 플러싱 및 압력시험
- 지중열교환기는 설치되고 나면 보수가 매우 어렵다. 이에 따라 설치당시 열교환파이프의 연결상태 및 누수상태를 단계별로 반복하여 시험 및 검사해야 한다.

(5) 지중열교환기 분배 헤더 설치 및 연결
- 지중열교환기의 배관망은 순환유체의 압력배분이 균등하도록 리버스리턴방식을 채택하였다.

(6) 기계실 내 순환펌프류 설치 및 배관 연결

(7) 플러싱 및 지중열교환기 순환유체 주입
- 순환유체배관은 공기 및 이물질이 완전히 제거되어야 히트펌프의 고장발생을 막고 열교환성능을 높일 수 있다. 이에 따라 반복적인 플러싱작업이 필요하다.

(8) 천장 설치형 히트펌프 유닛 설치
- 천장 매립형 히트펌프의 설치는 컴팩트공조기의 설치와 동일한 방식으로 이루어진다.

(9) 시스템 시험 운전 및 보완
- 시스템의 설치 후 유체순환량, 덕트의 풍량, 순환유체의 입출온도, 히트펌프별 입출온도 등을 T.A.B.를 실시하여 계측하여 설계에 적합하게 조절하여 최적의 운전상태를 확보하였다.

Fig. 2. Installation of GHEX

Fig. 3. Installation of Heatpump

3. 지열냉난방시스템의 성능 분석기법

3.1 냉난방 성능 분석을 위한 실험장치

지열냉난방시스템의 운전성능평가를 위해 계측자료 및 계측장치는 Table 3에 정리하였다. 계측자료는 값이 변하지 않는 초기 1회 측정자료와 값이 변하는 상시 측정자료로 나눌 수 있으며 유체순환량이나 순환펌프 운전전력 등과 같이 일정하게 유지되는 항목은 설치 후 T.A.B를 실시하여 측정하였다. 상시 측정자료는 장기간의 성능평가 측정을 위해 자동제어장치에 온도센서, 전력계를 연결하여 측정 및 저장하도록 시스템을 구성하였으며 신뢰성 향상을 위해 전력분석기를 통해 비교분석하였다.

3.2 냉난방 성능 분석 방법

일반적으로 냉난방시스템의 성능은 외부기온변화에 따른 실내온도유지능력이 가장 중요하다. 또한 냉동기나 히트펌프 등의 냉방 및 난방능력은 일반적으로 성능계수(COP)로 표현되며, 이는 지열냉난방시스템에서도 동일하다. 지열냉난방시스템의 히트펌프에 대한 냉방 및 난방 성능계수는 다음의 식(1)과 식(2)로 계산되며, 전체 시스템의 성능계수는 식(3)과 식(4)로 계산된다.

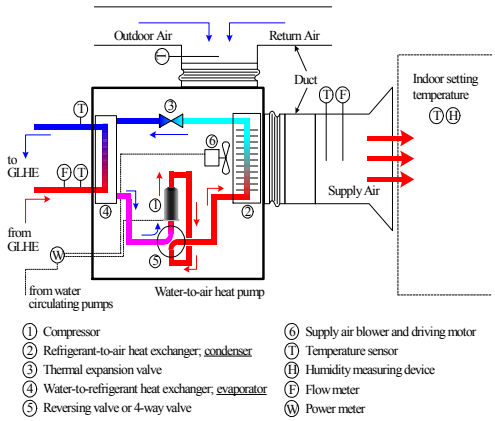

Fig. 4. Perfomance data measuring methods for water to air heatpump unit

$$COP_{c,hp} = \frac{\sum \dot{Q}_c}{\sum \dot{W}_{hp}} \quad (1)$$

$$COP_{h,hp} = \frac{\sum \dot{Q}_h}{\sum \dot{W}_{hp}} \quad (2)$$

$$COP_{\frac{c,}{all}} = \frac{\sum \dot{Q}_c}{\sum \dot{W}_{hp} + \sum \dot{W}_p} \quad (3)$$

$$COP_{\frac{h,}{all}} = \frac{\sum \dot{Q}_h}{\sum \dot{W}_{hp} + \sum \dot{W}_p} \quad (4)$$

위 식들에서 냉방성능 및 난방성능의 계산은 다음과 같다.

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{air} c_{p,air} (T_{in,air} - T_{out,air}) \quad (5)$$

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_{air} c_{p,air} (T_{out,air} - T_{in,air}) \quad (6)$$

여기서 T는 공기온도로 하첨자 in과 out은 순환공기가 히트펌프 유닛의 열교환기를 통과하기 전, 후를 각각 의미하며, 이 때 공기의 질량유량(또는 풍량)이 $\dot{m}_{air}$이다. 또한 $c_{p,air}$는 공기의 비열로서 일반적인 공기 물성치 표로부터 결정된다. 이 때 냉매 대 공기 열교환기 유입 전 · 후의 온도를 평균한 값을 이용한다.

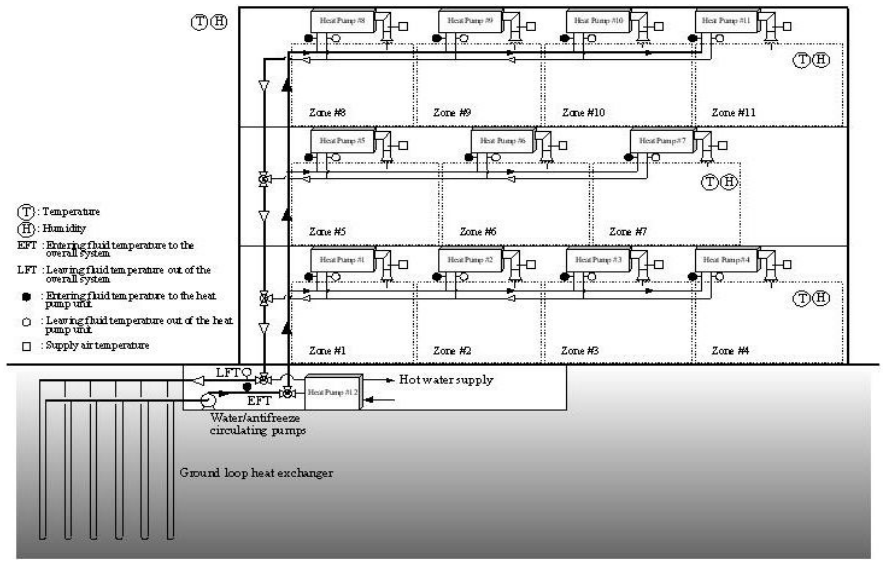

Fig. 5. Data measuing points for perfomance analysis in the office building

Table 3. Measuring instruments

Item	Instruments	int. of Monitoring
Heatpump time	Summit Control (Trane, USA)	5 min.
Electric power	CW-240 (Yokogawa, Japan)	〃
Air temp.	RTD temp. sensor (Trane, USA)	〃
Fluid temp.	Summit Control	〃
Fluid temp.	RTD temp. sensor	〃
Flow rate	PT-878 (Panametric, USA)	Initail
Circ. pump power	CW-240	Initial

3.3 성능분석 계측기 설치

앞서 살펴본 바와 같이 지열냉난방시스템의 성능평가를 위해서는 크게 투입되는 에너지와 생산되는 에너지에 대한 측정이 필요하다. 지열냉난방시스템에서 투입되는 에너지는 히트펌프 및 순환펌프에 투입되는 전력에너지로 히트펌프는 5분 간격으로 측정하고 순환펌프는 초기치를 측정하여 활용하였다. 다음으로 히트펌프에서 생산되는 에너지는 냉온풍이나 냉온수 형태의 열에너지로 공기나 순환유체온도를 5분 간격으로 측정하고 공기나 유체순환량은 초기치를 활용하였다.

본 연구에 사용된 계측기는 Tabel 3과 같이 자동제어시스템에서 모니터링이 가능하도록 시스템을 구성하였으며 필요에 따라 추가로 계측기를 활용하였다. 이러한 시스템 구성은 중장기적인 측정과 평가에 유리하다. 평가 시스템에 대한 측정항목과 측정지점은 Fig. 5와 같다. 본 연구에서는 전체시스템은 순환유체의 온도 및 순환량을 이용하고 개별히트펌프에 대해서는 공기온도 및 순환량을 이용하여 분석하였다.

4. 운전성능 분석결과

4.1 난방 성능 분석

전체 난방기간 중(2004년 12월 2일~2005년 2월 27일) 대표적인 2월 1일의 난방성능을 분석하였으며, 그 결과를 Fig. 6~8에 나타내었다.

Fig. 6에서 외기온도분포를 살펴보면 최저 외부기온은 2월 1일의 -12.3℃인 것으로 나타나 2005년 2월 1일의 데이터를 분석하여 성능평가를 실시하였다. Fig.7에서 지열냉난방시스템의 가동에 따른 지중열교환기의 열교환 및 입출온도를 분석하였다. 이에 따르면 사무실의 비가동시간인 20시~08시에도 운전이 이루어지는 것을 확인할 수 있는데 이는 자동제어를 통해 실내온도가 13℃이하가 되면 자동운전이 실시되기 때문이다. 다음으로 사무실에서 근무시간인 08시~20시까지 운전상태를 살펴보면 기동초기인 8시에 최대 부하를 나타내고 오전 12시까지는 높은 부하를 유지하다

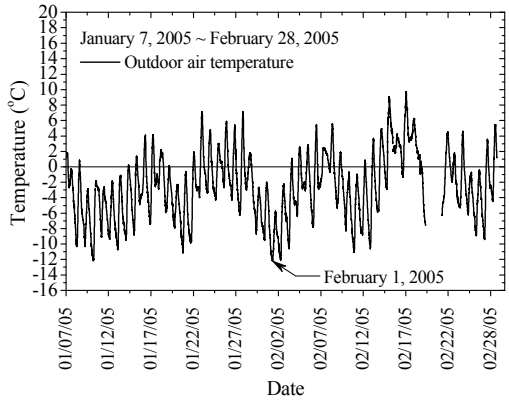

Fig. 6. Outdoor air temperature of the building : 2005/1/7 ~ 2005/2/28

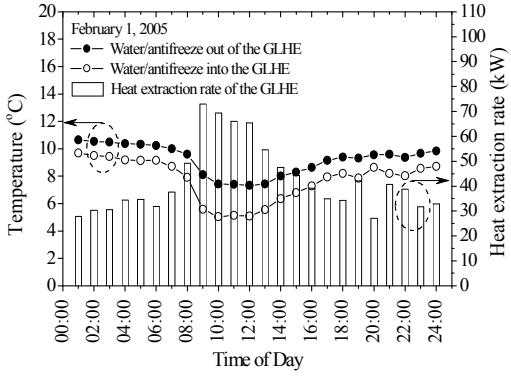

Fig. 7. In/out temperature of geotheraml heat exchanger & heat extrac- tion rate at 2005/2/1

가 태양열이 축적되는 오후에 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 이때 순환유체의 입출구 온

도차는 난방부하에 비례하여 증감하는 것을 볼 수 있다. 최대부하가 발생하는 시간대의 입출구 온도차는 약 2.7℃를 나타내는데 최대부하발생시 입출구 온도차를 4.5~5.0℃가 되도록 설계한 것을 감안하면 구역별 히트펌프 개별운전으로 11대의 히트펌프 중 일부만 운전됨을 알 수 있다.

다음으로 성적계수(COP)를 살펴보면 Fig.8과 같다. 히트펌프 운전부하와 순환유체 입출온도차는 대체로 비례관계를 나타내고 성적계수(COP)와는 반비례관계를 나타내는데 이는 운전부하 및 운전시간이 증가함에 따라 지중에 냉열이 축적되어 순환유체가 온도가 낮아지고 이에 따라 히트펌프의 성능이 저하되는 것으로 판단된다. 본 시스템의 2005년 2월 1일에 대한 일일 평균 난방 성능계수는 3.42로 계산되었으며, 전체 시스템은 순간 평균 17.98 kW의 전력을 소비하는 것으로 측정되었다. 난방성능 측정기간 중 본 시스템의 일별 난방 성능계수는 3.17에서 3.75의 범위에 있었으며, 평균 3.46의 값을 나타내었다.

4.2 하절기 냉방 성능 분석

본 시스템의 일일 냉방성능을 분석하기 위해 2005년 6월 30일에 측정된 데이터를 이용하였다. Fig. 9에서 지중 열교환기 입구와 출구에서 부동액의 평균 온도 차이는 2.4℃를 보이고 있으며, 이로부터 본 시스템의 지중 열교환기는 일일 평균 54Kw의 에너지를 지중으로 방출하는 것으로 계산되었다. 이는 동절기의 최대 열교환량 41Kw와 비교하면 약 32% 가량 증가한 값으로 난방부하에 비해 약 8RT가량 높은 점을 감안하면 냉방을 위해서는 보다 높은 열교환이 필요함을 알 수 있다. 이 시스템은 냉방부하가 최대부하에 근접할 경우 냉각탑이 보조적으로 작동하도록 설치되었으며 순환유체의 온도가 35℃이상이면 자동적으로 냉각탑이 작동되도록 제어되고 있으나 실제로는 최대부하 발생시에도 냉각탑 가동이 발생하지 않았다. 이는 지중열교환기의 설계 계산프로그램이 약 30%정도의 안전율을 고려하도록 제작되었으며 이로 인해 냉방부하가 지중열교환기 용량보다 높음에도 불구하고 냉방부하를 감당할 수 있기 때문이다. 하지만 장기적인 운전과정에서 연간 냉방부하량이 난방부하량보다 많아 지중에 열이 축적되면 성능의 저하가 발생하고 이로 인해 냉각탑의 운전가능성이 높아질 것으로 판단된다.

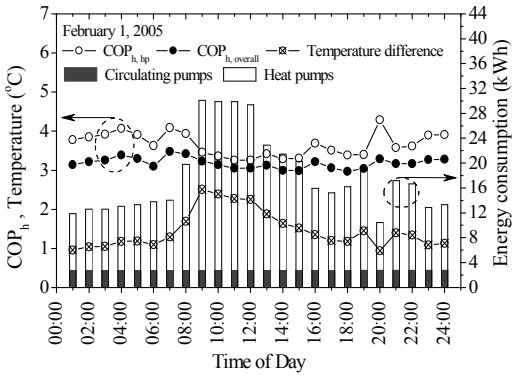

Fig. 8. Variation of COP & heat consumption at 2005/2/1

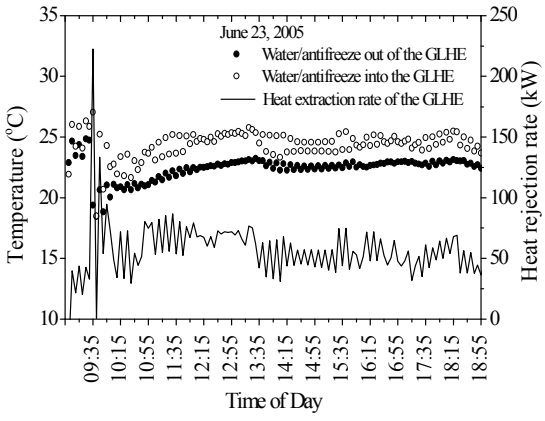

Fig. 9. In/out temperature of geotheraml heat exchanger & heat extrac- tion rate at 2005/6/23

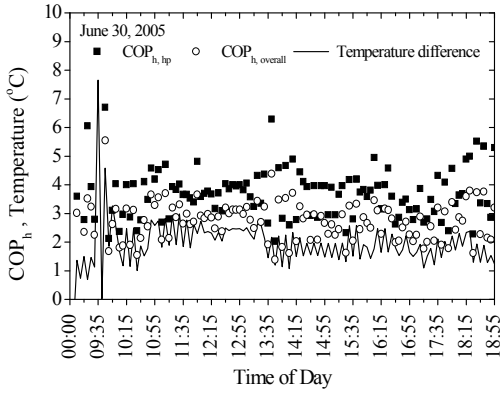

Fig.10. Variation of COP at 2005/6/30

Fig.10에서 히트펌프의 일일 평균 냉방성능계수는 4.1인 것으로 계산되었으며, 전체 시스템의 일일 평균 냉방성능계수 3.2로 계산되었다. 이러한 냉방성능계수는 설계상의 계산치인 3.6에 비해 낮게 나타났는데 이는 천정매립형 히트펌프의 경우 내부에 공조용 팬이 포함되어 있으며 이 팬의 가동전력이 포함되어 전력소모량이 측정됨에 따라 성적계수가 낮아진 것으로 판단된다.

냉방운전의 경우 비가동시에는 운전이 정지되는데 난방운전과 비교할 때 상당한 에너지절감이 가능한 장점이 있다. 설계당시의 예측에 의하면 냉방운전부하가 난방운전부하보다 상당히 큰 것으로 나타났으나 난방시의 야간운전으로 인해 상당한 오차가 발생하였다. 따라서 연간 냉난방부하총량의 계산에서 이에 대한 고려가 필요하다.

이상과 같이 사무용건물의 지열냉난방시스템에 대한 운전성능평가를 실시하였다. 이 연구를 통해 지열냉난방시스템이 안정적으로 운전될 뿐만 아니라 에너지효율이 매우 높음을 알 수 있다. 하지만 지열원의 특성상 장기운전에 따른 성능저하의 가능성이 높기 때문에 이에 대한 장기성능평가가 지속적으로 요구되고 있다. 따라서 장기간에 걸친 추가적인 연구가 수행되어야 한다.

5. 결 론

사무용건물의 지열냉난방시스템 성능평가를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 지중열교환기 가동결과 지중온도는 연중 13.5℃에서 14.5℃의 범위에서 거의 일정하였으며, 지열냉난방시스템의 가동에도 불구하고 안정적인 상태를 유지하였다.

(2) 난방운전 성능을 평가한 결과 외부기온의 변화에 관계없이 안정적인 난방능력을 확보하고 있으며 성능계수는 평균 3.46의 값을 나타내었다. 난방운전의 경우 비가동시에도 최저온도설정에 따라 지속적인 운전이 실시되어 난방비용의 증가가 발생하는 것으로 나타났다. 이에 따라 비가동시간의 운전방법에 대한 개선이 요구된다.

(3) 냉방운전 성능을 평가한 결과 안정적인 냉방능력을 확보하고 있으며 특히 최대부하 발생시에도 지중열교환기를 통해 충분한 열원확보가 가능하였다. 이는 지중열교환기 설계법에 따른 계산값이 30%이상의 안전율을 확보하고 있음을 의미한다. 냉방운전에 따른 히트펌프의 성능계수는 평균 4.1의 값을 나타내었으며 공조용 팬이 히트펌프에 포함되어 있는 점을 감안하면 높은 효율을 나타내고 있음을 알 수 있다.

후 기

끝으로 본 연구는 산업자원부 산하 신재생에너지센터의 지원을 받은 '지열냉난방시스템 실증연구'를 통해 수행되었음을 밝히며 감사를 드리는 바이다.

참고문헌

1. Hughes, P. J. and Shonder, J. A., 1998, The Evaluation of A 4000-home Geothermal Heat pump Retrofit at Fort Polk, Louisiana: Final Report, Oak Ridge National Laboratory.
2. 손병후, 조정식, 신현준, 안형준, 2005, 지열원 열펌프시스템의 냉·난방 성능평가, 설비공학 회논문집, 제17권 제1호.
3. ASHRAE, 1995, Commercial/institutional Ground-source Heat pump Engineering Manual, ASHRAE, Atlanta.
4. Bose, J. E., Parker, J. D. and McQuiston, F. C., 1985, Design/data Manual for Closed-loop Ground-coupled Heatpump Systems, ASHRAE, Atlanta.
5. Kavanaugh, S.P. and Rafferty, K., 1997, Ground-Source Heat Pumps: Design of Geo- thermal Systems for Commercial and Institutional Buildings, ASHRAE, Atlanta.