

공동주택에서 에너지 파일을 이용한 지열히트펌프 시스템의 성능 분석

Performance Evaluation of Ground Source Heat Pump System Utilizing Energy Pile in Apartment

이진욱* 김태연** 이승복***
 Lee, Jin-Uk Kim, Taeyeon Leigh, Seung-Bok

Abstract

In Korea, Apartment houses recently occupy over 80% of all buildings. Ground source system has to be designed to consider feature of apartment house. Most apartment houses use PHC pile to get a bearing power of the soil. Therefore, the purpose of this study is to evaluate performance of ground source heat pump system utilizing energy pile under apartment. Object of experiment is low-energy experiment apartment in Song-do and Energy Pile are applied to 80%, 100% energy reduction model for heat-source. First, performance evaluation of Energy Pile geothermal system was done during summer season. As a result, The COP(coefficient of performance) about geothermal heatpump was approximately 5~6 while cooling. In winter season, Long experiment was performed because it was very important to evaluate ground condition for long time. During heating experiment, Indoor room set temperature was 20℃ and kept constant by heating. Coefficient of performance for heat pump and overall system was calculated. It was 3.5~4.5 for COP and 2.5~3.7 for system COP.

키워드 : 에너지 파일, 성적계수, 지열 히트펌프

Keywords : Energy Pile, Coefficient of Performance, Geothermal HeatPump

1. 서론

1.1 연구의 목적

최근 우리나라 건물 부분의 에너지 소비에 대한 문제가 심각해지고 있으며 그 중에서 주택부분이 절반 이상을 차지하고 있다. 에너지 경제 연구원의 통계자료¹⁾에 의하면 가정에서 난방으로 쓰여 지는 에너지가 59%(2008년 기준)를 차지하고 있어 이를 대체 할 수 있는 에너지의 필요성이 점차 대두되고 있다. 정부에서도 이러한 상황을 고려하여 신재생에너지에 대한 투자를 지속적으로 늘리고 있으며, 그 중에서도 지열부분의 투자가 가장 많은 부분을 차지하고 있다.²⁾

하지만 지열 시스템이 보편화되기까지는 큰 장애물이 존재한다. 천공에 따른 초기 투자비가 증가하고 이를 회수할 수 있는 기간이 너무 오래 걸린다는 점이다. 따라서

국내외에서는 지열 시스템의 효율을 향상시키거나 초기 투자비를 절감 할 수 있는 기술 및 대안에 대해 연구가 집중되고 있는 상황이다.

하지만 이는 각 국가의 상황과 실정에 맞는 연구가 필요하며 표1은 최근 3년 동안의 우리나라 주택건설실적 통계를 나타낸 것이다.

표 1. 주택건설실적통계³⁾

연도	주택 유형별			
	단독주택 (다가구포함)	아파트	연립주택	다세대주택
2008	53,667	263,153	4,044	50,421
2009	54,665	297,183	5,426	24,513
2010	62,173	276,989	5,956	41,424

주택건설 실적 중 공동주택의 비율이 80% 이상을 넘어서 있으며 그 중에서도 아파트가 70%이상으로 대부분을 차지한다. 그 동안 정부의 주택공급계획은 연 520천세

3) 국토부

* 교신저자, 포항산업과학연구원 연구원(rumor7@rist.re.kr)
 ** 연세대학교 건축공학과 부교수(tkim@yonsei.ac.kr)
 *** 연세대학교 건축공학과 교수(sbleigh@yonsei.ac.kr)
 본 연구는 국토해양부 첨단도시개발 연구개발사업의 연구비지원(11첨단도시G03)에 의해 수행되었습니다.
 1) 에너지 통계연보, 2008, 에너지 경제 연구원
 2) 에너지 관리 공단

대이며, 실제공급은 아파트를 중심으로 한 공동주택의 계속적인 증가추세를 보여왔다.

지열의 초기 투자비가 크게 증가하고 대규모 냉난방 부하에 대응할 수 있는 지중 열교환기의 시공상 문제를 등을 고려하면 공동주택이 많은 우리나라의 특성에 맞는 기술적 보완이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 PHC 파일을 이용한 에너지 파일형 지열시스템을 대안으로 제시하고자 한다.

에너지 파일형 지열시스템은 건물의 기초 또는 구조물이 지중의 에너지를 흡수하여 건물의 냉난방등 운영에 필요한 에너지를 얻음으로써 별도의 천공비를 필요로 하지 않으며 초기투자비를 최소화 시키는 기술이다.

본 논문에서는 에너지 파일을 사용하는 저에너지 친환경 공동주택을 대상으로 하절기와 동절기의 피크 부하 기간을 선정하여 성능 분석을 실시하였다.

1.2 문헌 고찰

유럽에서는 1990년대 중반부터 건물 기초를 이용한 지중열교환기에 대한 연구가 지속적으로 진행 되고 있다. 영국의 Oxford 대학에 있는 Keble 칼리지 신축건물에는 전체 파일기초의 25%를 파일형 지중열 교환기로 활용하고 있다. 또한 스위스는 파일형 지중열 교환기를 개발하여 1997년 쥐리히 공항 신 터미널에 직경 1~1.5m인 파일 기초를 300본 이상 적용하였다. 국내에서도 건설 회사들이 수평 폐쇄형 지중열교환기와 말뚝형 지중열교환기, 지하수형 지중열교환기를 개발해서 적용 중이다.⁴⁾ 그러나 아직 충분한 성능 검증이 이루어지지 않는 상황이며 이러한 시스템 보급을 위해서는 앞으로 현장 적용을 통한 성능 검증과 보완이 필요한 상황이다.

2. 현장실험의 대상 및 방법

2.1 현장실험 대상

표 2. 실측 대상

구 분	개 요
건물명	저에너지 친환경 공동주택
위치	인천광역시 연수구 송도동 162-1 연세대학교 송도 캠퍼스
연면적	1,860.70㎡
건축면적	968.76㎡
구조	철근 콘크리트 라멘조
용도	1층 - 홍보전시실, 모니터링실, 기계실, 전기실, 시청각실 2~4층 - 실험용 공동주택(5세대)

4) 임재한, 그린홈 공동주택을 위한 복사냉난방시스템의 지열에너지 활용 기술, 2009

표 3. 지열시스템 개요

구 분	세부사항	비 고	
지중열교환기	코일 재질	PB재질 나선형 파이프	
	코일 두께	25A	ISO규격
	코일 길이	1본당 196m	
	그라우팅재	습윤된 왕사와 모래	
지열히트펌프	냉방능력 8,847W 난방능력 9,501W		
온수버퍼탱크	700L		
순환펌프	550W, 370W		

표2에 실측대상 건물을, 표3에 지열시스템의 개요를 나타내었다. 실험대상 건물은 인천시 송도에 위치한 저에너지 친환경 공동주택⁵⁾으로 에너지 절감 80% 모델과 100%모델을 대상으로 지열시스템의 성능 검증을 실시하였다. 80%모델은 PVC단창 52mm 3중 일면로이유리와 내·외단열을 통해 열손실을 최소화하였고 100%모델은 PVC 단창 52mm 3중 양면로이유리, 내단열 15mm 진공 단열재와 230mm그라스울을 통해 실내 부하를 최소화 하고 제로에너지를 목표로 하였다. 두 모델 모두 지열히트펌프를 통해 실내측은 80%모델의 경우 바닥 복사 냉난방이 적용되어 있고 100% 모델은 온수가 판형열교환기를 거쳐서 모세유관 바닥 복사 냉난방 시스템으로 열량이 공급된다. 모세유관 바닥 복사 시스템이 일반적인 바닥 복사 시스템에 비해서 병렬로 연결되어 있어 설치 면적에 걸쳐 균일한 온도 분포를 가지는 장점이 있다.

3. 냉방 성능 실험

3.1 냉방 성능 실험 개요

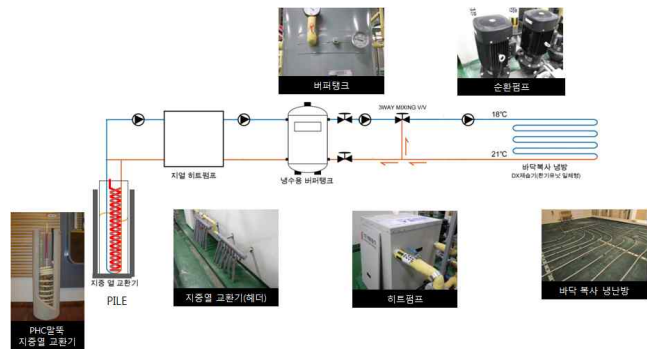


그림 1. 냉방 실험 시스템 계통도

5) www.greenhomeplus.re.kr

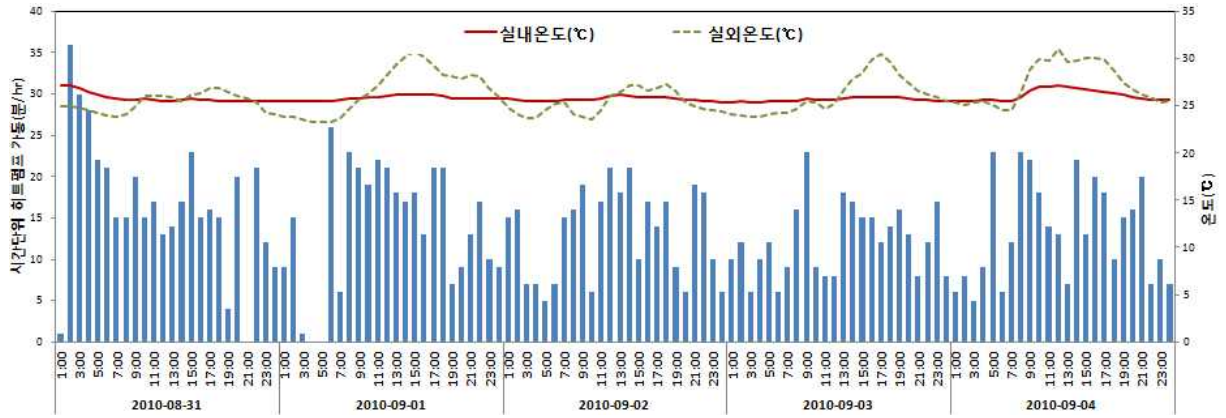


그림 2. 실험 기간 내 실내외 온도와 지열히트펌프의 부하 대응성

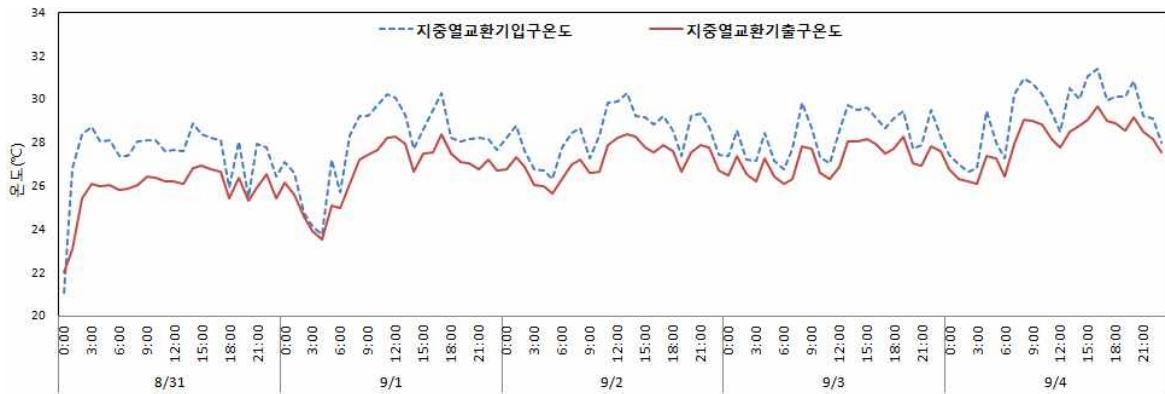


그림 3. 지중열 교환기 입출구 온도

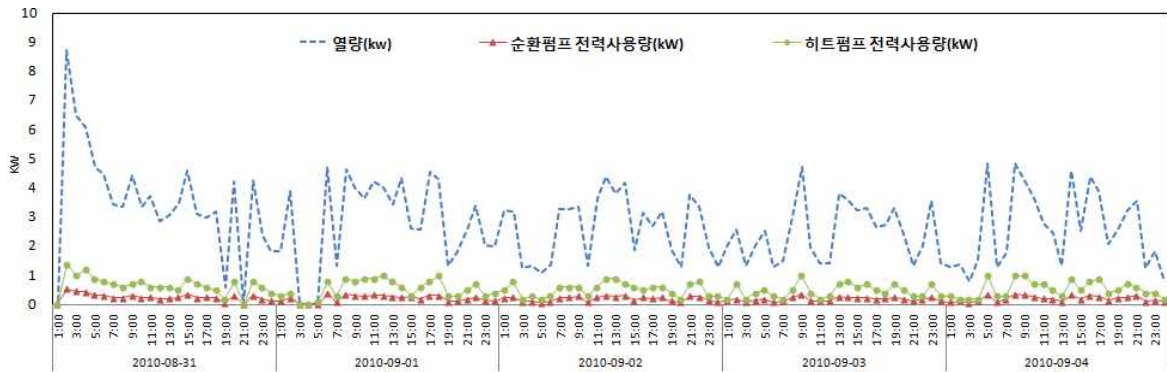


그림 4. 부하측 열량과 전력사용량

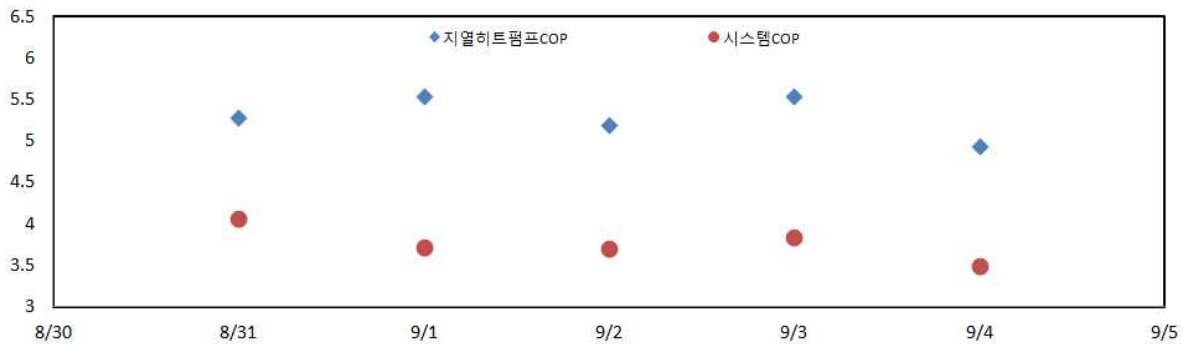


그림 5. 지열 히트펌프 및 시스템 냉방 COP

그림1은 냉방 실험 시스템 계통도를 나타낸다. 냉방 실험은 지열히트펌프를 사용하는 80%모델 1세대를 대상으로 실시하였으며 이 모델에는 PB배관의 바닥 복사 냉난방시스템이 적용되어 있다. 냉방 실내 설정온도는 일반적인 26℃로 하였으며, 부하 시 버퍼탱크를 통해 실내로 18℃의 냉수가 유입되도록 설정하였다. 실험은 8월 31일 0시를 기준으로 9월 4일 24시까지 5일간 밀폐된 상태에서 냉방을 가동하였다. 실측 값은 대부분은 공동주택의 성능검증을 위해 구축된 모니터링 시스템을 통해 이루어졌다. 하지만 열원수 측의 유량과 지열히트펌프와 버퍼탱크 사이의 배관 유량이 모니터링 되지 않아서 초음파유량계를 통해 별도로 유량측정을 실시하였다.

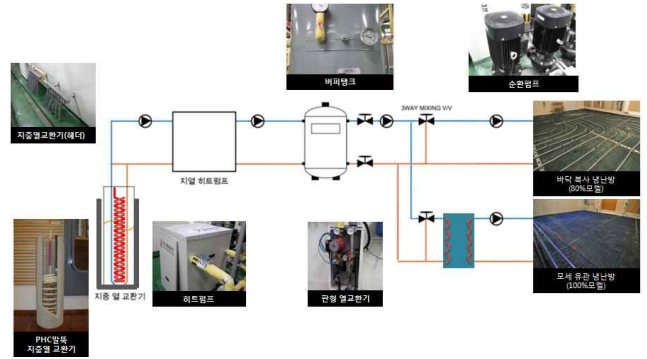


그림 6. 난방 실험 시스템 계통도

3.2 냉방 성능 실험 결과

그림2는 실험기간 중인 8월 31일부터 9월 4일까지의 실내·외 온도 변화와 지열히트펌프의 부하대응성을 나타낸다. 8월 31일과 9월 2일은 비가 내림으로써 기온이 낮아지고 그 외의 날은 최고기온이 31℃까지 상승했다. 냉방 설정 온도가 26℃로 설정되어있기 때문에 부하상승에 따른 히트펌프의 자동 ON/OFF가 이루어졌다. 1일 오전3시~5시는 외기온도가 매우 낮아짐으로써 부하 발생되지 않아서 히트펌프가 운전하지 않은 것으로 판단된다. 결과적으로 일중 외기온도가 높은 낮 시간에 부하 상승에 따라 상대적으로 히트펌프의 운전이 많은 것으로 나타났다.

그림3은 냉방 가동 후 변하는 지중열교환기 입·출구 온도를 나타낸다. 시간이 지날수록 온도가 약간씩 상승하였으며 이는 지중으로 지속적인 열의 방출에 따라서 지중 온도가 상승함에 따라서 발생한 것으로 판단된다. 5일 동안의 온도 범위는 입구온도 21~31.4℃, 출구온도 22~29.7℃로 나타났다. 평균 온도차는 1.32℃를 보였다.

그림4는 지열히트펌프의 부하측 열량과 순환펌프, 지열히트펌프의 전력사용량을 나타낸다. 냉방을 시작한 직후에는 온도차가 커지면서 순간적으로 열량이 크게 나타났으며 5일평균 열량은 2.9KW로 나타났다.

그림5는 지열히트펌프의 효율을 나타낸다. 실험 마지막 날인 9월 5일에는 부하가 커지고 열원수온도가 상승함에 따라서 다른 날에 비해 COP가 조금 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 5일 동안의 평균 COP는 5.3으로 나타났으며 순환펌프 사용량까지 포함한 시스템 COP는 3.8로 나타났다.

냉방 실험 분석 결과 에너지 파일형 지열 히트펌프 시스템의 성능은 일반적인 U자형 지열 시스템에 비해서 뒤쳐지지 않는 것으로 나타났다. 하지만 냉방 실험이 5일동안 실시되었다는 점은 한계로 작용하며 정확한 성능검증을 위해서는 좀 더 장기적인 실험이 필요할 것으로 보인다.

4. 난방 성능 실험

4.1 난방 성능 실험 개요

그림6은 난방 실험 시스템 계통도를 나타낸다. 난방 실험은 냉방 실험과 다르게 시스템을 구성하였다. 난방 대상을 80%모델 뿐만 아니라 100%모델까지 포함시켜서 두 세대에 열량을 투입할 수 있도록 하였다. 그 이유는 에너지 파일이 공동주택에 적용되기 때문에 한 세대가 아닌 다세대에 열량을 원활히 공급할 수 있는지 검증하기 위해서다. 80%모델에는 냉방 실험과 동일하게 PB배관의 바닥 복사 난방 시스템이 적용되어 있고 100%모델에는 모세유관 바닥 복사 난방 시스템이 적용되어 있다. 부하측의 열손실을 감안해서 온수버퍼탱크를 45℃로 설정하고 실내측에 40℃의 온수가 공급되도록 하였다. 모세유관 바닥 복사 난방 시스템은 온수버퍼탱크와의 사이에 판형 열교환기를 통해 열 교환을 거쳐서 실내로 열량이 공급된다.

난방 설정온도는 두 세대 모두 20℃로 하였고 실내온도에 따라서 온수 분배기의 개폐에 따라 자동적으로 온수가 공급되도록 되어있다. 난방실험은 1월7일부터 1월 15일까지 1차 실험, 1월 18일부터 1월 29일까지 2차 실험으로 2회에 걸쳐 실험을 진행하였다. 이유는 두 차례의 실험과 장기간 성능 분석을 통해 지중조건의 장기적인 변화 추이를 살펴보기로 하였다.

측정방법은 지중열교환기 입출구와 지열히트펌프 부하측 입출구는 RTD온도센서를 사용하여 측정하였다. 지열히트펌프와 순환펌프의 전력소모량은 전력량계를 사용하여 측정하였고 초음파 유량계를 통해서 배관의 유량을 측정하였다. 기상스테이션을 통해 외기온도를 측정하였으며 실내온도는 열전대를 설치하였다.

4.2 난방 실험 결과

그림7은 1차와 2차 난방실험 동안에 지중열교환기 입출구 온도와 외기온도를 나타낸다. 1월 7일 1차 난방실험을 시작한 뒤에 온도가 떨어지기 시작해서 지중에서 나오는 출구온도가 3~7℃, 입구온도는 1~6℃ 범위를 유지하였다. 부하가 없어서 히트펌프가 작동을 멈추게 되면 입출구 온도가 기계실 온도에 따라 상승을 하였고 실내온도가 설정온도에 안정적으로 도달하였을 때 그 빈도수가 상대적으로 많아졌다. 이는 실내온도가 안정화 되고 열량의 공급이 상대적으로 줄어들면서 발생한 것으로 판단된다.



그림 7. 지중열 교환기 입출구 온도 및 외기온도

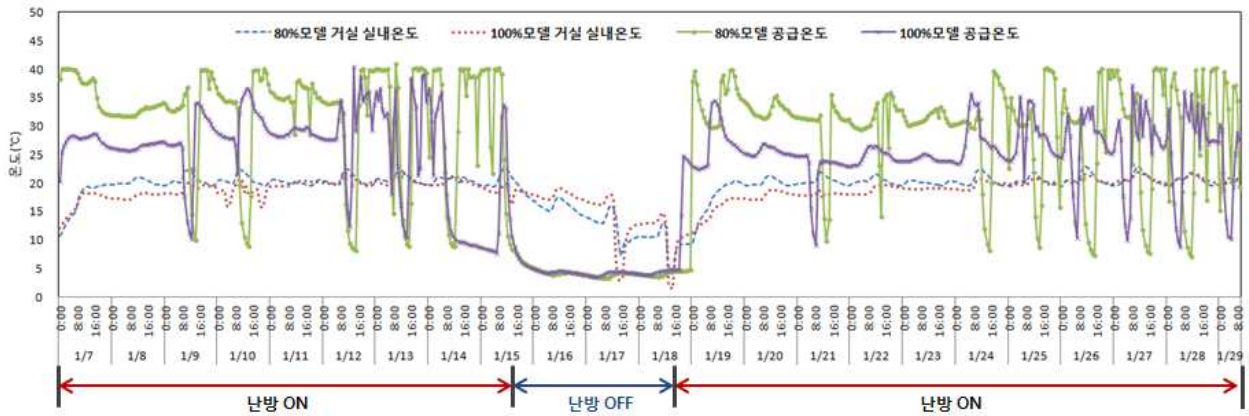


그림 8. 실내온도 및 온수 공급온도

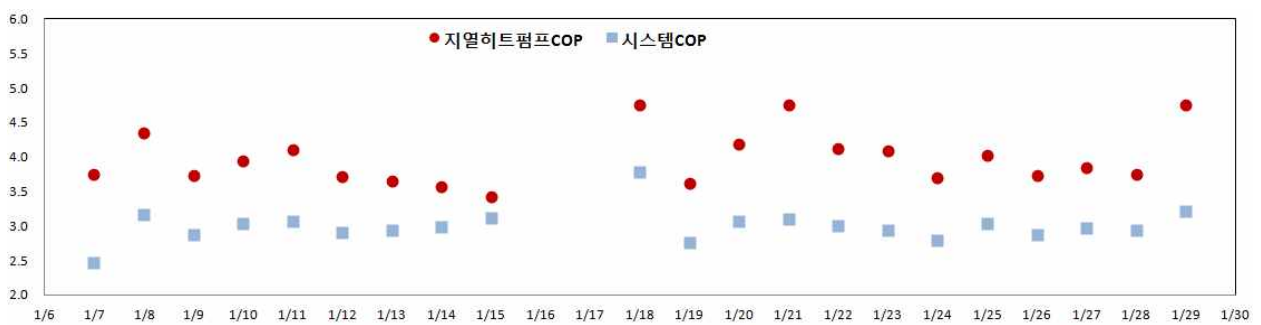


그림 9. 지열히트펌프 및 시스템 난방 COP

1차 실험이 끝난 후 난방을 OFF 한 뒤에 지중열교환기 입출구 온도는 기계실 온도에 맞추어서 온도가 조금씩 하강하였다.

1월18일에 2차 난방실험을 시작하자 1차 난방실험 때와 비슷하게 입출구 온도를 유지하였고 1차 실험과 비슷한 온도 패턴을 보였다.

난방 실험기간 동안 외기온도는 평년에 비해서 낮은 분포를 보였다. 1월 16일은 -15°C 로 가장 낮은 온도를 보였으며 실험기간 동안 평균 -5°C 를 나타내었다.

그림8은 난방실험 동안의 실내온도 변화와 온수 공급

온도를 나타낸다. 실험 대상이 되는 에너지 절감 80%모델과 100%모델은 모두 난방이 시작된 후에 얼마 지나지 않아서 난방 설정 온도인 20°C 에 안정적으로 도달하는 것을 확인하였다. 온수 공급온도의 패턴을 보면 난방을 시작한 뒤에 지속적인 온수의 공급이 있고 난방 설정온도에 도달하게 되면 부하가 줄어들고 온수 분배기의 개폐 빈도수가 상대적으로 많아지는 것을 확인하였다.

80%모델과 100%모델은 적용된 요소기술과 설비시스템의 차이에 따라 각각 다른 온도패턴을 보였다. 100%모델은 80%모델에 비해서 실내 설정온도에 도달하는데 상대

적으로 시간이 더 걸렸다. 원인은 100%모델은 실내로 열량이 공급되기 전에 관형열교환기에서 열손실이 발생함에 따라서 40℃의 온수가 공급되지 못하고 상대적으로 낮은 온도의 온수가 공급되었기 때문이다. 그러나 100% 모델이 상대적으로 우수한 단열 성능을 가지고 있어서 80%모델에 비해 적은 온도 변화 패턴과 난방 OFF 뒤에도 온도의 하강이 천천히 이루어지는 특징을 나타내었다.

1차 실험이 끝난 뒤에 세대 환기를 통해 외기를 도입하면서 실내 온도가 크게 떨어졌다.

그림9는 일별 지열히트펌프 난방 COP와 전체 시스템 COP를 나타낸다. 1차, 2차 난방 실험기간 동안 지열히트펌프의 COP는 3.5~4.5 범위를 나타내었고 순환펌프까지 포함한 전체 시스템 COP는 2.5~3.7 범위를 나타내었다. 분포 패턴을 보면 외기온도와 관련성을 가지고 있는 것으로 나타났다. 외기온도가 하강함에 따라서 열량 공급이 상대적으로 많아지고 압축기의 구동이 많아짐에 따라 지열히트펌프의 COP가 하강하는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 공동주택을 대상으로 적용된 에너지 파일형 지열시스템에 대해 냉난방 성능 실험을 실시하였으며 연구의 주요 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 80%모델 한 세대를 대상으로 냉방 현장 실험을 실시하였으며 5일 동안의 실험에서 8월 31일과 9월 2일은 비가 내림으로써 기온이 낮아지고 그 외의 날은 최고기온이 31℃까지 상승했다. 부하상승에 따른 지열히트펌프의 자동 ON/OFF가 원활하게 이루어졌다. 일반적으로 일중 외기온도가 높은 낮 시간에 부하 상승에 따라 상대적으로 히트펌프의 운전이 많은 것으로 나타났다.

(2) 지중열교환기 입·출구온도를 분석한 결과 시간이 지날수록 온도가 약간씩 상승하였으며 5일 동안의 온도 범위는 입구온도 21~31.4℃, 출구온도 22~29.7℃로 나타났다. 평균 온도차는 1.32℃를 보였다.

(3) 지열히트펌프의 COP의 분석 결과로 시간이 지날수록 열원수온도가 상승함에 따라서 그에 반비례하여 COP가 조금씩 지속적으로 낮아지는 것을 확인 할 수 있었다. 5일 동안의 평균 COP는 5.3으로 나타났으며 순환펌프 사용량까지 포함한 시스템 COP는 3.8로 나타났다.

(4) 에너지 파일형 지열 히트펌프 시스템의 냉방 성능 분석 결과 일반적인 수직밀폐형의 성능에 비해 뒤쳐지지 않게 나타났지만 현장 냉방 실험기간이 짧았다는 점은 아쉬운 부분이며 추후 장기적인 냉방 실험이 필요하다고 판단되었다.

(5) 난방 실험 결과 난방 실험을 실시한 이후에 지중에서 나오는 출구온도가 3~7℃, 입구온도는 1~6℃ 범위를 유지하였다.

(6) 1차, 2차 난방 실험기간 동안 지열히트펌프의 COP는 3.5~4.5 범위를 나타내었고 순환펌프까지 포함한 전체 시스템 COP는 2.5~3.7 범위를 나타내었다.

(7) 난방 실험의 경우 지중에서 나오는 열교환기 출구 온도가 예상보다 낮았다. 그 이유는 본 난방실험을 하기 전에 12월부터 예비실험을 실시하였기 때문에 적지 않은 영향을 끼친 것으로 판단된다. 또한 난방 실험 기간이 23일동안 실시되었으며 냉방 실험에 비해 길었지만 실제로 재실자가 하절기와 동절기에 냉난방에 사용하는 운영시간은 더 길기 때문에 추후에는 좀 더 장기적인 실험이 필요할 것이다.

참고문헌

1. 유형규, PHC파일 기초를 이용한 지중 열교환기 개발 및 성능 평가, 2008
2. 임재한, 그린홈 공동주택을 위한 복사냉난방시스템의 지열에너지 활용 기술, 2009
3. 황광일, 주상복합 건축물의 기초 슬래브에 설치된 수평형 지열교환기의 계절별 성능평가, 2007
4. 황석호, 오오카료조, 남유진, 세키네켄타로, 요코이무츠미, 시바 요시로, 건물기초를 이용한 지중열 공조시스템의 개발에 관한 연구 (1), 대한설비공학회, 2005
5. 박용부, 지열 냉난방 시스템에서 에너지 파일을 이용한 지중 열교환기 시공법, 2007
6. 백성권, 중공말뚝을 이용한 지열 냉난방 시스템 개발에 관한 연구, 공학 박사학위 논문, 2004
7. Lund, J.W. Ground-source (geo-thermal) heat pumps, In: Lineau P.J., editor. Course on heating with geothermal energy: conventional and new schemes. World Geothermal Congress 2000 Short Courses, 2000, 209-236.
8. Lund, J.W.; Freeston, D.H. World-wide direct use of geothermal energy 2000, Geothermics, 2001, 30, 29-68.
9. Lund, J.W. Direct-use of geothermal energy in the USA, Applied Energy, 2003, 74, 33-42.
10. Kavanaugh, S.P.; Rafferty, K. Ground-source heat pumps: design of geothermal systems for commercial and institutional buildings, ASHRAE, 1997.
11. Cane, D.; Morrison, A.; Christopher, J. Operating experiences with commercial ground-souce heat pump systems, ASHRAE, 1998

투고(접수)일자: 2012년 6월 11일

수정일자: 2012년 8월 28일

게재확정일자: 2012년 8월 30일