

공기 및 지열 이용 Dual-Source 히트펌프 시스템의 성능실험 및 경제성 분석

The Performance Test and the Feasibility Study for a Dual-Source Heat Pump System Using the Air and Ground Heat Source

남유진(Yujin Nam)[†], 채호병(Ho-Byung Chae)

청주대학교 건축공학과

Department of Architectural Engineering, Cheongju University, Cheongju 360-764, Republic of Korea

(Received February 4, 2014; revision received March 23, 2014; Accepted: March 24, 2014)

Abstract Recently, the use of renewable energy has been increased due to growing concern on the energy-saving at buildings and the reduction of CO₂ emission. In the field of architecture, to reduce the energy consumption of heating, cooling and hot water supply, heat pump systems with renewable energy has been developed and used in various applications. However, there have been many of researches on the large-scale commercial heat pump systems, but the research and the field application of a compact heat pump system is rare. Therefore, in order to develop the compact heat pump for the small-scale residential building, this study conducted the performance test and feasibility study for a hybrid heat pump using the heat source of air, solar and ground. In the results of experiments through a trial product, the average COP of cooling mode with ground heat source was 4.75, and it of heating mode was 4.03. Furthermore, the average COP of cooling mode with air heat source was 2.60, and it of heating mode was 2.92. Finally, payback period of the system was calculated as 9.2 years.

Key words Heat pump(히트펌프), Renewable energy(신재생에너지), Life cycle cost(생애주기비용), Coefficient of performance(성적계수)

[†] Corresponding author, E-mail: namyujin@cju.ac.kr

기호설명

P_F : 비반복 비용의 현재가치의 합
 P_A : 반복 비용의 현재가치의 합
 A : 연간 등가발생비용
 F : 미래가
 P : 현가환산
 I : 실적 이자율
 n : 분석기간

1. 서 론

최근, 국제사회는 증가하는 에너지 수급 문제에 대응하기 위해 신재생에너지 보급 확대 및 관련 산업 육성을 위한 새로운 패러다임을 제시하고 있다. 국내에서도 신재생에너지 이용 확대를 위한 많은 정책들이 제안되고 있으며, 특히 신재생에너지 의무화 제도, RHO(Renewable heat obligation) 등 열에너지 이용에 관한 정책들도 활발히 논의되고 있다. 이러한 국가적, 사회적 배경

에 맞추어 다양한 열원을 동시에 이용할 수 있는 시스템 개발이 필요하다. 한편, 지열, 공기열원, 폐열 등을 이용하여 중·저온의 열원을 고온의 열원으로 생성하는 히트펌프 기술은 에너지 효율뿐만 아니라 CO₂ 절감 및 환경적인 측면에서 매우 유용한 기술이다. 이러한 히트펌프 시스템은 건축분야에서 소비되는 냉·난방 및 급탕의 에너지 소비를 줄일 수 있고, 타 신재생에너지와의 융합이 가능하기 때문에 국내외 건설사 및 연구기관에서 히트펌프의 연구개발이 활발히 이루어지고 있다. 국외 연구로는 Xu et al.⁽¹⁾이 주거공간에서 공기 열원과 잠배수를 이용한 멀티 히트펌프의 성능을 분석하였으며, Ozgener et al.⁽²⁾이 태양열과 지열을 조합한 Dual-Source 히트펌프의 고려사항 및 최적성능을 분석하였다. 한편, 국내에서도 Baek et al.⁽³⁾이 콤팩트형 태양열/지열 하이브리드 시스템에 대한 실증시험을 통해 냉, 난방 및 급탕 시스템의 작동성능을 파악하였고, Nam⁽⁴⁾은 에너지 시뮬레이션 툴을 이용하여 태양열 및 지중 열원을 이용한 히트펌프 시스템의 성능을 검토하였다.

그러나 상업용 대형 히트펌프에 대한 현장적용 및 연구는 이루어지고 있으나, 소형 건물 및 주거용 건축물에 적용 가능한 Dual-source 히트펌프 시스템에 대한 개발은 드물다. 또한 Dual-source 히트펌프에 대한 정량적 평가와 경제성 분석이 미비하여, 소형 건물 및 주거용 건축물에 적용 가능한 히트펌프의 설치 및 보급이 늦어지고 있다. 소형 건물 및 주거용 건축물에 소형 히트펌프의 보급을 촉진하기 위해서는, 먼저 열원 조합이 가능한 고효율의 소규모 유닛형 히트펌프의 개발이 필요하고, 그에 따른 시스템 효율 및 경제성 분석이 필요하다.

본 연구에서는 공기열, 지열, 태양열 등의 복합열원에 대해 효율적으로 대응할 수 있는 유닛형 히트펌프 시스템의 개발을 위해, 소형 히트펌프 시작품을 제작하고 성능실험을 실시하였다. 또한 일반적인 공기열원 시스템과의 경제성 분석을 위해, LCC(Life Cycle Cost) 분석을 통한 정량적 검토를 실시하였다.

2. 개발 히트펌프의 성능실험

2.1 Dual-Source 히트펌프의 개요

본 연구에서는 기존의 공기열원과 지열, 태양열 등의 다양한 신재생열원을 동시에 이용할 수 있는 Dual-Source 히트펌프를 개발하고 2.5 RT급 소형 시작품을 제작하였다. Fig. 1은 개발 히트펌프의 개요도를 나타낸다. 본 히트펌프는 열원측에 두 개의 열교환기(Air source, Water source)를 갖추고 있어 양측의 열원온도에 따라 효율적인 열원을 선택하여 운전이 가능한 시스템이다. 이러한 개념의 히트펌프는 선행 연구에서 소개되고 있으나 소형 유닛에 대한 연구는 드물다. 본 연구에서는 히트펌프 시작품을 제작하여 성능실험과 함께 적용가능성을 평가하였다.

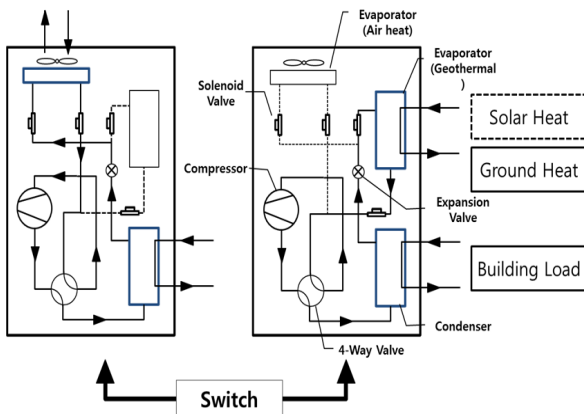


Fig. 1 Schematic diagram of dual-source heat pump.

히트펌프의 성능실험은 지열 및 공기열원의 이용을 가정하고 각각에 대해 냉방 및 난방의 총 4개의 운전모드로 모의실험을 실시하였다. 각 운전모드의 COP(Coefficient of Performance) 산정을 위해 순환수 온도 및 유량, 소비전력량 등을 측정하였고, 축열조를 이용하여 지중열원을 대체하는 모의실험을 실시하였다. 또한 히트펌프의 성능 실험을 위해, 한국산업표준 KS B 13256-1 (공기열원 히트펌프 부하측 입구온도 12℃(냉방), 40℃(난방)) 및 KS B 13256-2(수열원 히트펌프 열원측 입구온도 25℃(냉방), 5℃(난방), 부하측 입구온도 12℃(냉방), 40℃(난방))에 근거한 히트펌프 출입구 온도설정을 실시하였다. Fig. 2는 본 연구에서 개발된 하이브리드 히트펌프의 내부 모습을 나타내며, Fig. 3은 각 모드 별 히트펌프의 운전 패턴을 나타낸다.

3. 실험 결과

3.1 지열 냉방모드 실험결과

Fig. 4은 지열 냉방모드 시 히트펌프의 순환수 온도 및 전력량을 나타낸다. 순환수 온도를 측정된 결과, 지중방열로 인한 지열 출구온도가 가장 높게 나타났으며, 실내 냉방을 위한 부하 출구온도가 가장 낮음을 확인했다. 지열 입구온도 26.3℃, 지열 출구온도 28.4℃로 나타났고, 부하 입구온도 12.3℃, 부하 출구온도 9.9℃로 약 2.4℃의 온도차가 발생했다. 이를 통해 지열 냉방모드의 채열량은 6.77 kW로 계산되었다. 또한, 전력량은 1.43 kWh로 나타났으며, 지열 냉방모드의 COP는 4.75로 계산되었다.



Fig. 2 Developed dual-source heat pump.

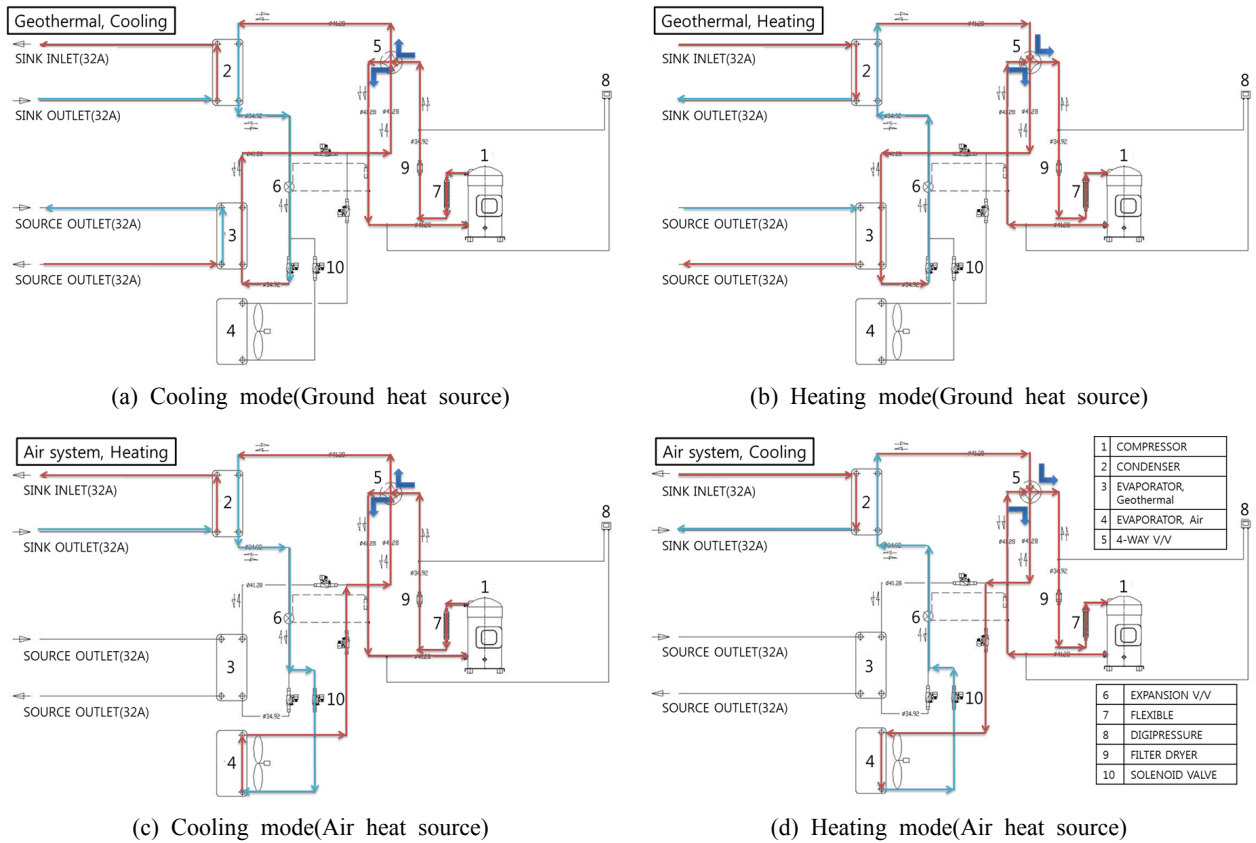


Fig. 3 Operating mode of the developed system.

3.2 지열 난방모드 실험결과

Fig. 5는 지열 난방모드의 실험결과로서 히트펌프의 순환수 온도 및 전력량을 나타낸다. 순환수 온도를 측정한 결과, 지열 출구온도가 가장 낮았고, 부하 출구온도가 가장 높음을 확인하였다. 지열측 평균 입출구온도는 각각 17.8℃, 16.5℃였고 부하측 입출구온도는 44.3℃, 41.6℃로 약 2.7℃의 온도차가 나타났다. 이를 통한 지열 난방모드의 채열량은 7.66 kW로 계산되었다. 또한, 전력량은 1.90 kWh로 나타났고, 전력량과 순환수 온도차를 확인한 결과, 지열 냉방모드의 COP는 4.03으로 나타났다.

3.3 공기열원 냉방모드 실험결과

Fig. 6는 공기열원 냉방모드의 실험결과로서 히트펌프의 순환수 온도, 외기온도 및 전력량을 각각 나타낸다. 부하측 입구 및 출구온도를 측정한 결과, 각각 11.7℃, 10.4℃로 약 1.3℃의 온도차가 나타났다. 이를 통한 공기열원 냉방모드에서의 채열량은 4.47 kW로 계산되었다. 그 결과 공기열원 냉방모드의 전력량은 1.71 kWh로 나타났다. 전력량과 순환수 온도차를 확인한 결과, 공기

열원 냉방모드의 COP는 2.60으로 나타났다.

3.4 공기열원 난방모드 실험결과

Fig. 7은 공기열원 난방모드 시 히트펌프의 순환수 온도, 외기온도 및 전력량의 변화를 나타낸다. 부하측 입구 및 출구온도를 측정한 결과, 각각 42.1℃, 40.4℃로 나타났다. 공기열원 난방모드에서의 채열량은 5.61 kW로 계산되었다. 또한, 이 때의 전력량은 1.96 kWh이었으며, COP는 2.92로 나타났다.

한편, Table 1은 본 연구에서 개발된 2.5 RT급 소규모 히트펌프의 성능실험 결과로서, 각각의 운전모드에 대한 전력 소비량, 채열량 및 COP를 종합한 결과를 나타낸다.

4. 경제성 분석

4.1 적용 대상건물 개요

본 연구에서는 개발된 Dual-Source 히트펌프 시스템이 일반적인 소규모 주택에 적용되었을 경우에 대해,

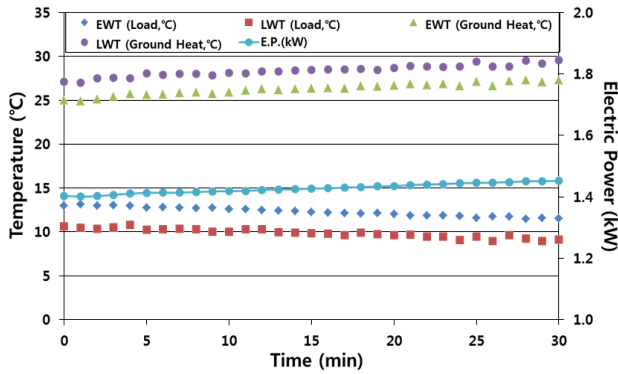


Fig. 4 Circulation water temperature of ground source and electric power in cooling mode.

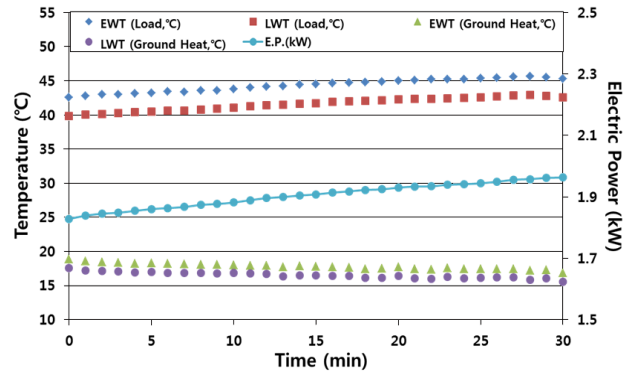


Fig. 5 Circulation water temperature of ground source and electric power in heating mode.

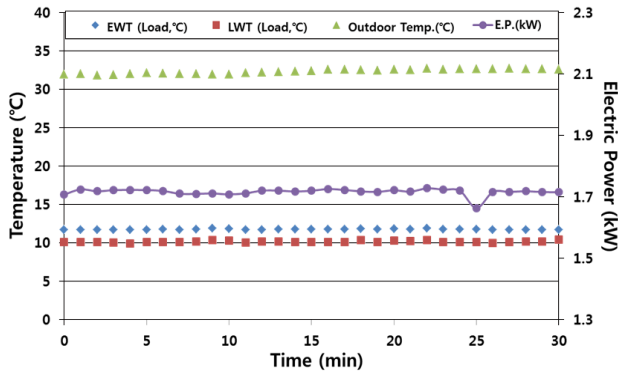


Fig. 6 Circulation water temperature of air source and electric power in cooling mode.

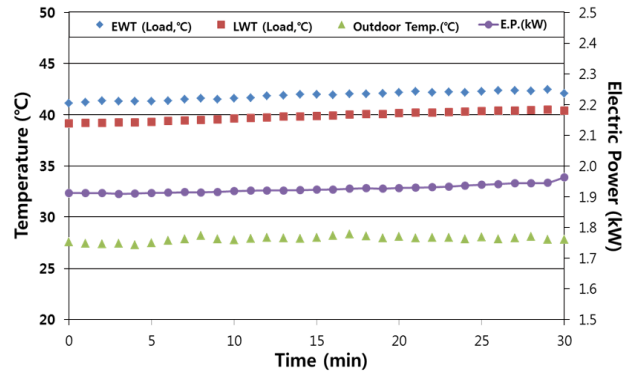


Fig. 7 Circulation water temperature of air source and electric power in heating mode.

기존 공랭식 시스템과 비교하여 경제성을 분석하였다. 대상 건물은 국민주택규모(전용면적 85 m² 이하)의 주택 모델로서 연면적 100.3 m²의 단층 주택⁽⁶⁾이며, 남측에 창문 3개가 있는 모델이다. Table 2는 시뮬레이션 대상 건물의 냉난방 부하 조건을 나타낸다. 4인 가족이 거

주하는 것으로 가정하고, 서울의 기상 데이터를 이용하였다. 연간 냉난방 부하를 산정하기 위해 동적 에너지 해석 프로그램인 TRNSYS 17을 이용하였으며, 그 계산 결과를 통해 기기 용량 산정 및 소비전력량 산출을 실시하였다.

Fig. 8은 대상건물의 냉난방 부하 계산 결과를 나타낸다. 1월의 난방 부하량이 가장 컸으며, 난방 피크 부하는 약 4.7 kW로 산출되었다.

대상 건물의 연간 냉난방 부하에 대해 기존의 공랭식 시스템(EHP)와 개발 Dual-Source 히트펌프 시스템의 소비전력 및 비용분석을 실시하였다. Dual-source 히트펌프 시스템은 외기조건이 유리한 중간기(4~6월, 9~11월)에는 공기열원을 가동하고, 12~3월, 7~8월에는 지열원으로 운전하는 것을 가정하였으며, 5월 및 10월에는 히트펌프를 가동하지 않았다.

Table 1 Experiment results of Cases

Case	E.C.(kW).	HER(kW)	COP
Geothermal Cooling mode	1.43	6.77	4.75
Geothermal heating mode	1.90	7.66	4.03
Air source Cooling mode	1.72	4.47	2.60
Air source heating mode	1.92	5.62	2.92

E.C. : Electric Consumption.

HER : Heat Exchange Rate.

4.2 초기투자비 산출

경제성 분석을 위한 비용 산출에 있어 각 시스템의

Table 2 Simulation conditions

Model		Standard housing model
Building model		100.3 m ² A one storied house
Indoor condition	summer	Indoor temp : 26°C Relative humidity : 50%
	winter	Indoor temp : 22°C Relative humidity : 50%
Operation period		Weekday : 20 hour, Weekend : 19 hour
Indoor load		Human : 4(150 W/person) Mechanical load : 230 W/unit Lighting : 19 W/m ²
Ventilation		0.7 /h
U-value	Roof	0.336 W/m ² K
	Wall	0.471 W/m ² K
	Bottom	0.331 W/m ² K
Weather data		Seoul

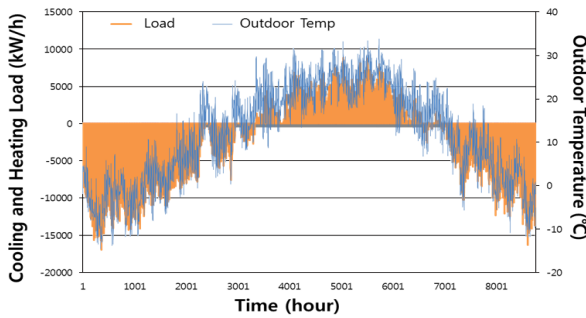


Fig. 8 Cooling and heating load of standard housing model.

Table 3 Monthly system performance of EHP heat pump

Month	1	2	3	4	6	7	8	9	11	12
Average temp(°C)	-3.3	-1.3	4.5	11.7	21.2	24.6	25.4	20.3	6.6	-0.3
COP	1.32	1.71	2.03	3.01	4.05	3.92	3.78	4.13	3.41	1.92

2차측 설비는 동일하다고 가정하고 히트펌프 및 천공비, 지중열교환기 설치비 등의 비용을 개략적으로 비교하였다. 지열설치비용의 산출은 에너지관리공단 신재생에너지 월별 기준단가와 다수의 지열전문 업체의 견적서 등을 검토하여 초기투자비 비용을 산정하였다. 공랭식 시스템과 Dual-Source 히트펌프의 각각의 초기 투자비는 약 3,000천 원, 약 11,500천 원으로 추정하였고,

Table 4 Calculation result of electric consumption and operation cost

Month	Electric consumption(kWh)		Operation cost(Won)	
	EHP	Dual-Source	EHP	Dual-Source
1	1,233	395	611,200	62,600
2	746	317	274,200	41,300
3	446	301	82,700	36,800
4	91	93	5,500	5,600
6	48	41	2,900	2,400
7	105	87	6,600	5,200
8	133	106	10,000	6,600
9	42	66	2,500	4,000
11	211	246	20,200	26,700
12	721	345	257,400	48,800

20년간 사용하였을 경우 발생비용을 계산하였다. 연간 유지비용은 각 시스템이 동일하다고 가정하고, 공기열원 히트펌프는 10년 사용 후 교체를 한다고 가정하였다.

4.3 운전비용 산출

각 시스템의 운전비용 산출에 있어, 먼저, 냉난방 부하량과 각 시스템의 COP를 고려하여 소비전력을 산출하고, 월별 소비전력을 요금으로 환산하여 비교하는 방식으로 계산하였다. Table 3은 본 계산에서 사용된 공랭식 시스템의 월별 COP⁽⁵⁾를 나타낸다. 개발 시스템의 운전성능은 실험 결과를 통해 얻은 각 운전모드의 COP를 이용하였다. 한편, 운전비용 산출은 한국 전력 공사 요금 산정기준을 참고하여 계산하였다.

운전비용 계산 결과, 공랭식 시스템의 연간 요금은 약 1,273천 원, Dual-Source 히트펌프의 요금은 240천 원으로, Dual-Source 히트펌프를 사용하였을 경우, 연간 약 1,033천 원의 비용절감이 가능한 것으로 나타났다(Table 4).

4.4 LCC 분석

본 연구에서는 LCC(Life Cycle Cost)을 구하기 위해 한국은행 기준금리의 10년간 평균 할인율인 3.66%를 적용하여 현가법으로 계산하였다. 초기비용 등의 비반복 비용은 식(1)을 이용하였고, 운전비용 등의 반복 비용은 식(2)를 이용하였으며, 두 계산치의 합(식(3))으로 LCC 분석을 실시하였다.

$$P_F = F \frac{1}{(1+i)^n} \quad (1)$$

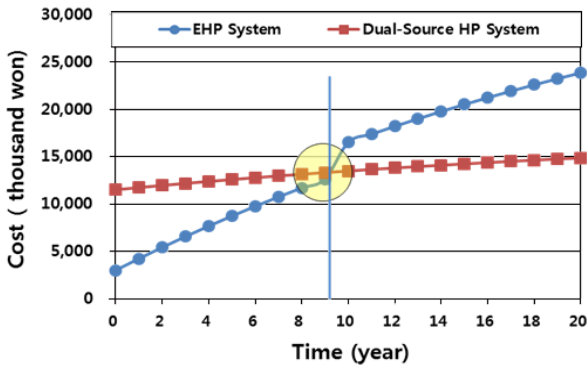


Fig. 9 Life cycle cost about an elapsed year.

$$P_A = A \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (2)$$

$$P = P_F + P_A \quad (3)$$

각 시스템의 사용기간을 20년이라 가정하였을 경우, 20년 동안 공랭식 시스템은 23,836천 원, 개발된 히트펌프는 14,862천 원의 비용이 발생하였다. LCC 분석을 통해 초기투자비 회수기간을 계산한 결과, 약 9.2년으로 나타났다. Fig. 9는 경과년수에 대한 생애주기 비용을 나타낸다.

5. 결론

본 연구에서는 공기열원과 지열원을 이용한 소규모 Dual-Source 히트펌프 시스템의 설계안을 제시하고 시제품 제작을 통한 성능분석을 하였다. 또한 표준 주택 모델에 적용하였을 경우, 기존 공기열원 히트펌프와의 경제성 분석을 실시하였다.

(1) 히트펌프의 시스템 성능실험을 한 결과, 지열 난방모드의 COP 4.75, 지열 난방모드의 COP 4.03, 공기열원 난방모드의 COP 2.60, 공기열원 난방모드의 COP 2.92로 지열 난방모드의 시스템 성능이 가장 좋음을 확인하였다.

(2) 공랭식 시스템과 Dual-Source 히트펌프의 연간 전력소비량은 각각 3,776 kWh, 1,997 kWh으로 나타났고, 연간 요금은 각각 1,273천 원, 240천 원으로 나타났다.

(3) 공랭식 시스템과 Dual-Source 히트펌프를 표준 주택 모델에 적용하여 20년간 사용했을 경우, 기존 공랭식 시스템은 23,836천 원, Dual-Source 히트펌프는 14,862천 원의 비용이 발하였고, 약 8,974천 원 절약이 가능했다.

(4) 초기 비용 및 운전비용 분석을 실시하여 기존 공랭식 시스템 대비 Dual-Source 히트펌프의 투자비 회수기간을 산정한 결과, 투자 회수 기간은 약 9.2년으로 나타났다.

본 성능실험에서 히트펌프 내 열교환기의 종류에 따라 각각의 열교환기 내 냉매 압력조절에 어려움이 있었으며 이를 최적화시키는 것이 향후 연구에서 필요할 것으로 사료된다. 또한, 타 열원 시스템과의 통합을 고려한 성능실험을 실시하여 상용화를 위한 기초자료로서 활용할 계획이다.

후 기

이 연구는 2013년도 미래창조과학부 연구비 지원(과제번호 : 2013-026889) 및 중소기업청에서 지원하는 2012년도 산학협력력 기술개발사업(No.C0033323)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

Reference

- Xu, G., Zjang, X., and Deng, S., 2006, A simulation study on the operating performance of a solar-air source heat pump water heater, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, pp. 1257-1265.
- Ozgener, O. and Hepbasli, A., 2005, Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system, *Energy and Buildings*, Vol. 37, pp. 101-110.
- Baek, N. C., Jeong, S. U., Yoon, E. S., and Lee, K. H., 2012, The development and performance analysis compact type solar thermal/ground coupled heat pump hybrid system for heating, cooling and heat water, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 32, No. 5, pp. 59-67.
- Nam, Y. J., 2012, Study on the optimum design of a heat pump system using solar and ground heat, *Korean Journal of SAREK*, Vol. 24, No. 6, pp. 509-514.
- Jun, C. H., Lee, H. S., Kim, J. D., and Yoon, J. I., 2006, Performance characteristics of air-cooled heat pump system using hydrocarbon refrigerants according to variation of outdoor temperature, *Korean Journal of SAREK*, Vol. 18, No. 3, pp. 218-224.
- Kim, Y. T., 2005, A study on the development of the representing day heating load model for the estimation of energy consumption in an apartment house, *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 21, No. 11, pp. 287-294.
- Chae, H. B., Nam, Y. J., and Kim, D. K., 2013, Study on the experimental analysis for a hybrid heat pump using the renewable heat source, *Proceedings of the SAREK Spring Conference*, pp. 416-419.