

단독주택용 지열 열펌프 시스템의 경제성과 이산화탄소 배출 저감 가능성 평가

손 병 후[†], 강 신 형^{*}

한국건설기술연구원 설비플랜트연구실, *건양대학교 기계공학과

Assessing the Economic and CO₂ Emission Reductions Viability of Domestic Ground-Source Heat Pumps

Byonghu Sohn[†], Shin-Hyung Kang^{*}

ABSTRACT: Because of their low operating and maintaining costs, ground-source heat pump(GSHP) systems are an increasingly popular choice for providing heating, cooling and water heating to public and commercial buildings. Despite these advantages and the growing awareness, GSHP systems to residential sectors have not been adopted in Korea until recently. A feasibility study of a residential GSHP system was therefore conducted using the traditional life cycle cost(LCC) analysis within the current electricity price framework and potential scenarios of that framework. As a result, when the current residential electricity costs for running the GSHP system are applied, the GSHP system has weak competitiveness to conventional HVAC systems considered. However, when the operating costs are calculated in the modified price frameworks of electricity, the residential GSHP system has the lower LCC than the existing cooling and heating equipments. The calculation results also show that the residential GSHP system has lower annual prime energy consumption and total greenhouse gas emissions than the alternative HVAC systems considered in this work.

Key words: Domestic Ground-source heat pumps(단독주택용 지열 열펌프 시스템), Economic analysis(경제성 분석), CO₂ Emissions(이산화탄소 배출), Environmental impact(환경 영향)

기 호 설 명

a_p : P년도의 유지관리비 [W/년]
 e : 물가 상승률 [%]
 i : 이자율 [%]
 i_e : 실질 이자율 [%]
 I_0 : 초기 투자비 [W]

n : 내용연수 [년]
 P : 현가 [W]
 R : 기기 폐각비용 [W]

1. 서 론

지열 열펌프 시스템(ground-source heat pump system)은 크게 지중열교환기(ground loop heat exchanger)와 열펌프로 구성된 냉난방 겸용 시스템으로 외기의 급격한 온도변화에도 영향을 받지 않고 일정하게 온도를 유지하는 지열을 활용하기

[†] Corresponding author

Tel. : +82-31-910-0495; fax : +82-31-910-0498

E-mail address: byonghu@kict.re.kr

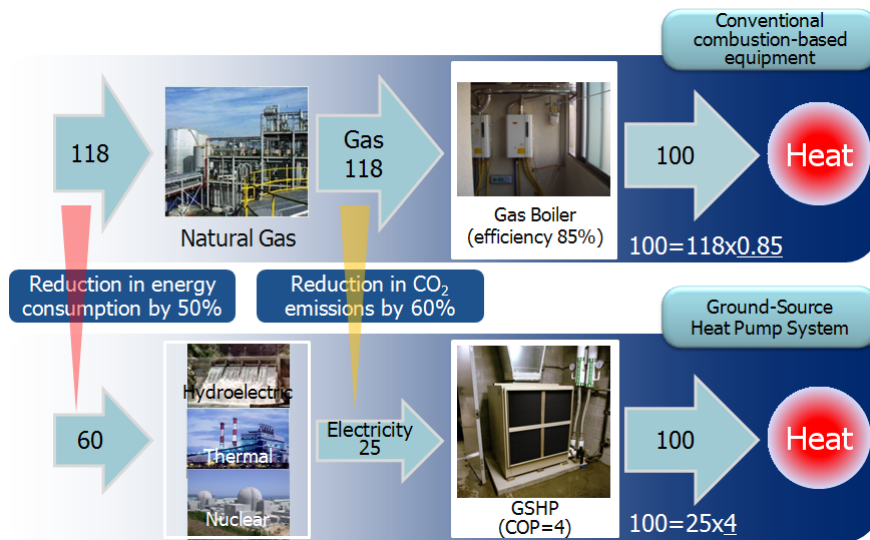


Fig. 1 Energy conservation and reduction in CO₂ emissions by ground-source heat pumps.

때문에 효율이 높은 에너지 절약형 시스템이다. 여름과 겨울이 확연한 우리의 기후조건에서 활용 가능성이 매우 우수한 시스템이라고 할 수 있다.

또한 Fig. 1에서 보듯이, 지열 열펌프 시스템은 이산화탄소와 같은 온실가스의 배출이 기존 냉난방 설비에 비해 상대적으로 적은 환경친화적인 시스템이다. 아울러 에너지 사용 비용이 적게 들기 때문에 경제적인 시스템이다. 하지만 지중열교환기 시공을 포함한 전체 시스템의 초기 투자비가 기존 설비보다 다소 큰 것이 단점이다.⁽¹⁾

현재 국내에서 지열 열펌프 시스템은 공공기관 신축건물이나 상업용 건물, 복지시설, 학교 등 주로 중·대형 건물에 설치되고 있다. 이는 시스템의 저렴한 운영비·환경친화성·건물 설계와의 적합성 등 지열 시스템의 다양한 장점과 시장의 요구가 일치하기 때문이다. 하지만 많은 장점이 있는 지열 열펌프 시스템이 단독주택용으로는 보급되지 못하고 있는 것도 우리 현실이다. 이는 기술에 대한 일반인의 인식 부족 등 여러 원인이 작용하였지만, 무엇보다 단독주택용 전기요금 누진제가 가장 큰 걸림돌이었다.

이에 본 연구에서는 Fig. 2에 도시한 단독주택(115 m²)용 지열 열펌프 시스템(GSHP)의 국내 적용 타당성을 경제성과 이산화탄소 배출 저감 가능성 측면에서 고찰하였다. 지열 시스템과 기존 설비의 연간 에너지 사용 비용과 생애주기비용(LCC) 등을 비교하였으며, 각각의 시스템이 환경에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 경제성 및 이산화탄소 배출량 분석

2.1 시스템 개요

본 연구에서는 Table 1에 나타낸 시스템을 대상으로 각각의 경제성과 이산화탄소 배출량을 계산하였다. 아울러 Table 1에 각 시스템의 효율과 COP 그리고 각 연료의 기준 발열량과 단가를 정리하였다. 여기서 각 시스템의 효율과 COP는 가정한 값으로 이 값들이 변할 경우 계산 결과도

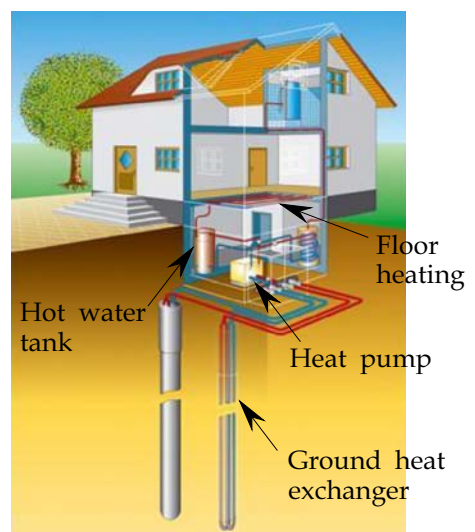


Fig. 2 Typical residential ground-source heat pump system.

Table 1 Systems for economic analysis.

	GSHP	ALT-1	ALT-2	ALT-3
System	Ground-Source Heat Pump	Boiler and AC	Boiler and AC	Boiler and AC
COP or efficiency	3.3 for heating, 4.0 for cooling	80% for heating, 2.7 for cooling	80% for heating, 2.7 for cooling	80% for heating, 2.7 for cooling
Fuel	Electricity	Oil & electricity	City gas & electricity	LPG & electricity

- ※ Heating values and unit costs for fuels
 - Electricity: 860 kcal/kWh, current price framework
 - Oil: 9,050 kcal/liter, 1,162 ₩/liter
 - City gas: 10,500 kcal/Nm³, 585 ₩/Nm³
 - LPG: 12,050 kcal/Nm³, 1,500 ₩/Nm³

변하지만, 그 영향은 그리 크지 않을 것으로 예상된다.

Table 2는 115 m²의 단독주택에 대한 설비의 설치용량과 부하율, 운전 개월 수, 월 운전일, 일 운전시간 등을 정리한 것이다. 이 값들 역시 계산을 위해 가정한 값들이다. 앞서 각 시스템의 효율과 마찬가지로 이 값들을 변화시키면서 계산할 경우, LCC 결과도 변한다.

2.2 경제성 분석 조건 설정

단독주택용 지열원 열펌프 시스템과 기존 설비의 LCC를 계산할 때, 초기 투자비, 유지관리비 및 기기 폐각비용과 같은 비용들을 바탕으로 이자율, 에너지비용 상승률, 내용연수 등을 종합적으로 고려해야 한다. 초기 투자비는 분석시점에서의 현재 가격이며 지열 열펌프 시스템인 경우 실제 시공비용을 그리고 비교 대상인 기존 설비인 경우 견적자료를 기준으로 산출하였다.

정기적인 유지관리비에는 수리비·점검비·청

Table 2 Reference values for LCC analysis.

	Heating	Cooling
Capacity [kW]	15.6	15.6
Load factor	0.7	0.6
Operation time [month]	5	3
Operation time [days/month]	30	30
Operation time [hours/day]	14	6

소비·인건비·일반 관리비 등이 있다. 이 비용들은 대상 건물이나 시스템의 특성 그리고 관리 능력에 따라 상당한 차이가 날 수 있다. 지열 열펌프 시스템인 경우, 국내에는 정확한 유지관리비 데이터가 거의 없기 때문에 시스템 구입비용의 1.5%로 가정하였다.⁽²⁾ 기존 설비에 대한 유지관리비는 초기 투자비의 5%로 가정하였다. 아울러 돌발적인 고장 없이 사용한 후 시스템을 전량 교체하는 것으로 가정하였다. 따라서 예상치 못한 시점에서 발생하는 비정기적 운영비는 없다고 할 수 있다.

에너지비용(운전비용) 산출 시, 전기요금은 건물용도·계약 전력·계절·사용 시간대·월별 총 사용 전력량 등에 따라 달라진다. 본 연구에서는 현행 주택용(저압) 전기요금 체계와 이를 다소 수정한 요금 체계를 적용하였으며, 기타 대안 시스템의 에너지원 단가는 Table 1에 주어져 있다.

생애주기비용 분석 시, 다양한 가격변동 요소를 고려해야 한다. 이러한 요소에 대한 체계적인 데이터가 국내에는 아직 없기 때문에, 통계청의 경제동향 데이터를 이용하였다. LCC 계산에서 중요한 인자인 현가환산율(discount rate)은 8%를 그리고 물가 상승률(price escalation rate)은 5%를 적용하였다. 마지막으로 에너지 가격 변동률(energy price escalation rate)에 대해서는 전기는 3%, 경유를 포함한 도시가스 LPG는 9%로 가정하여 적용하였다. 분석기간은 운전시작일로부터 20년 간 운전되는 것으로 하였으며, 이때 운전시작 일은 2007년 1월부터인 것으로 하였다.

2.3 경제성 분석

LCC 분석법은 각 대안 비교에 있어 시간적 가치에 대해 공통의 서점으로 환산하는 방법에 따라 현가법, 증가법, 연가법 등으로 구분할 수 있다. 사용기간 동안 발생하는 연비용이 동일할 경우에는 현가법이 일반적으로 사용된다.^(3,4) 현가법은 검토하는 시점 이후에 발생하는 지출을 현시점의 가격으로 환산하여 합계하는 것으로 현가 P 는 다음의 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$P = I_0 + \sum_{P=1}^n a_P \frac{1}{(1+i)^P} + \frac{R}{(1+i)^n} \quad (1)$$

설비 시스템의 가동에 따른 에너지비용, 보전 비용 등과 같은 P년도의 유지관리비 a_p 는 거의 매년 동일하게 발생되므로 식(1)은 식(2)와 같이 정리된다.

$$P = I_0 + a(PWF) + \frac{R}{(1+i)^n} \quad (2)$$

$$PWF = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (3)$$

식(3)의 연금현재가계수 PWF (present worth factor)는 물가상승에 따른 화폐의 시간적 가치가 고려되어 있지 않기 때문에 이를 반영하기 위해서는 이자율보다 다음의 식(4)와 같이 실질이자율, i_e 가 적용되어야 한다.

$$i_e = \frac{i-e}{1+e} \quad (4)$$

2.4 LCC 분석 수행절차

본 연구에서 검토하고 있는 냉난방 설비에 따른 LCC 분석절차는 다음과 같다.⁽⁵⁾

(1) 기초조사

대안을 설정하기 위한 목적물의 적용사례 및 각종 경제 관련지표를 조사한다.

(2) 대안의 설정

최소 성능기준을 만족하는 대안들로 구성하고, 성능기준을 초과하는 대안이 도출된 경우 추가적인 이익을 고려한다.

(3) 가정의 설정

분석기간(study period), 현재가환산율(discount rate), 분석시점(base date) 등 LCC 분석을 위하여 공통적으로 적용해야 할 가정 등을 설정한다.

(4) 대안에 따른 설비시스템의 요소별 비용 산정 및 발생시점 결정

초기투자비(initial investment cost), 운영비(operational cost), 기타 비용 등 요소별 비용을 발생시기에 따라 정확히 산정한다.

(5) 요소별 미래발생 비용을 현재 가치로 환산 미래에 발생하게 될 비용을 현재 가치로 환산한다.

(6) 각 대안에 대한 생애주기(LCC) 계산

냉난방 설비의 초기설치 이후에 발생하는 비용

을 현재 가치(present value)로 환산하여 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} LCC = & \text{초기 투자비의 현재가} \\ & \text{(present value of initial costs, I)} \\ & + \text{에너지 비용의 현재가} \\ & \text{(present value of energy costs, E)} \\ & + \text{유지관리비용의 현재가} \\ & \text{(present value of OM\&R costs, OM\&R)} \\ & + \text{시설 교체비용의 현재가} \\ & \text{(present value of replacement costs, R)} \\ & - \text{잔여 가치의 현재가} \\ & \text{(present value of residual value, RV)} \end{aligned}$$

(7) 측정 불가능한 비용과 편익에 대한 고려 비용과 같이 정량적인 측정은 불가능하지만 대안 선정에 있어 간접적으로 영향을 미칠 수 있는 요소에 대하여 정성적인 고려가 있어야 한다.

(8) 민감도 분석

LCC 분석에서 적용되는 여러 지표들(현재가환산율 등)은 대부분 추정된 값으로 입력 자료가 잘못 예측되었을 경우 LCC 분석결과에 영향을 미침으로써 잘못된 판단을 내릴 수 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서는 민감도 분석(sensitivity analysis)을 통하여 입력변수의 범위를 조정해 가면서 결과에 미치는 영향의 정도를 분석한다.

(9) 경제성 평가를 위한 관련지표의 산정

필요시 순익(net savings, NS), 투자 대 이익비율(savings-to-investment ratio, SIR), 회수기간(payback period, PB) 등의 경제성 평가를 위한 보조적인 지표를 산정한다.

3. 결과 및 고찰

Table 3은 앞서 설정한 LCC 분석 조건 그리고 Table 1과 Table 2의 값들을 적용하여 지열 열펌프 시스템과 경유보일러/에어컨(ALT-1)의 LCC를 계산한 결과다. 표에서 Case-1은 현행 주택용 전기요금 체계를 적용한 결과이며, Case-2에서 Case-4는 처음 사용량을 각각 200, 300, 400 kWh로 상향 조정하여 계산한 결과다. 또한 Case-5와 Case-6은 각각 일반(갑) 저압 요금과 2006년도 평균 판매단가를 적용한 경우다. 마지막으로 Case-7과 Case-8은 처음 사용량과 단계별 사용범위를 각각 200 kWh와 300 kWh로 조

Table 3 Economic comparison of ALT-1 and residential GSHP system (unit: 1,000 ₩).

		ALT-1		GSHP							
		cooling	heating	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6	Case-7	Case-8
Monthly running cost	Cooling	719	-	902	835	768	701	131	205	645	387
	Heating	-	442	219	152	106	70	74	84	90	66
Yearly running cost		3,595	1,326	5,168	4,633	4,161	3,718	874	1,278	3,492	2,130
Payback [year]		-		-	82.6	31.3	19.7	5.8	6.5	16.6	8.5
LCC [$\times 1,000$ ₩] (%)		115,130 (100%)		134,889 (117%)	123,856 (108%)	114,131 (99%)	105,018 (91%)	46,428 (40%)	54,745 (48%)	100,359 (87%)	72,303 (63%)

- 1) Case-1: 주택용 전기요금 개별 누진제 적용. 2) Case-2: 누진제 1단계 상향 적용(200 kWh).
- 3) Case-3: 누진제 2단계 상향 적용(300 kWh). 4) Case-4: 누진제 3단계 상향 적용(400 kWh).
- 5) Case-5: 일반(갑), 저압 요금 적용. 6) Case-6: 2006년도 평균 판매단가 적용.
- 7) Case-7: 누진제 조정(최초 200 kWh 이하, 각 단계별 사용 범위 200 kWh).
- 8) Case-8: 누진제 조정(최초 300 kWh 이하, 각 단계별 사용 범위 300 kWh).

정하고 계산한 결과다.

계산 결과에서 보듯이, 기존 시스템인 ALT-1의 LCC를 기준으로 하였을 때, 현행 주택용 전기요금 체계(Case-1)에서는 지열 열펌프 시스템의 가격 경쟁력은 상대적으로 떨어질 수밖에 없다. 이는 ALT-1과 달리, 지열 열펌프 시스템은 냉난방에 모두 전기를 사용하기 때문이다.

이러한 점을 극복하여 지열 열펌프 시스템을 단독주택에 보급하기 위해 고려할 수 있는 방안 중의 하나가 주택용 전기요금 체계를 개선하는 것이다. 즉 Case-2부터 Case-4와 같이 처음 사용량을 상향 조정할 경우, 지열 시스템의 연간 운전비와 LCC가 감소하여 ALT-1과 거의 동일한 수준을 보였다. 하지만 초기 투자비 회수기간 면에서 지열 시스템의 경쟁력이 여전히 부족하여 이에 대한 해결 방안을 마련해야 할 것으로 판단된다.

반면, 지열 열펌프 시스템에 대한 전기요금을 일반(갑) 요금과 2006년도 평균 판매단가를 적용할 경우, LCC와 투자비 회수기간 면에서 지열 열펌프 시스템이 ALT-1보다 우수함을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 Case-7과 Case-8에서도 유사하였다.

Table 4는 모든 시스템에 일반(갑) 저압요금을 적용하였을 때, 각 시스템의 월간 연료 소비량·연간 운전비·투자비 회수기간·LCC 등을 계산한 결과다. 지열 열펌프 시스템의 초기 투자비는 기존 냉난방 설비에 비해 상대적으로 많이 드는

것이 일반적이다. 하지만 시스템 운전비용 면에서 기존 설비보다 우수하기 때문에 경제성을 확보할 수 있다. 아울러 기타 비용항목 즉, 유리관 리비, 교체비용, 잔여가치 등에서도 기존 설비보다 지열 열펌프 시스템이 경제적이다. 이는 Table 4의 계산결과에서도 확인할 수 있다.

생애주기 동안 단독주택용 지열 열펌프 시스템과 경유보일러/에어컨(ALT-1) 두 시스템이 배출하는 온실가스 배출량을 계산하였으며, 그 결과를 Table 5에 정리하였다. 질소산화물(NOx)를 제외하면 전체적으로 지열 열펌프 시스템이 이산화탄소를 포함한 온실가스를 적게 배출하였다. 이러한 결과는 다른 대안 시스템(ALT-2와 ALT-3)과 비교했을 경우에도 유사하였다. 이는 지열 열펌프 시스템이 환경친화적인 시스템이라는 것을

Table 4 Total present value of LCC for each system.

		GSHP	ALT-1	ALT-2	ALT-3
Monthly fuel consumption	Heating	1,566 kWh	614 liter	529 Nm ³	461 Nm ³
	Cooling	633 kWh	938 kWh	938 kWh	938 kWh
Yearly operation cost [$\times 1,000$ ₩]		769	3,876	2,036	4,133
Payback [year]		-	7.6	18.7	7
LCC [$\times 1,000$ ₩] (%)		44,259 (100%)	93,644 (212%)	53,499 (121%)	99,213 (224%)

Table 5 Life-cycle emissions in kilograms for GSHP and ALT-1.

	Average annual emissions		LCC reduction [kg]
	GSHP [kg]	ALT-1 [kg]	
Electricity			
CO ₂	395,422	174,898	-4,244,266
SO ₂	1,219	539	-13,085
NO _x	1,191	527	-12,786
Light oil			
CO ₂	0	260,964	5,022,079
SO ₂	0	1,867	35,924
NO _x	0	235	4,527
Total			
CO ₂	395,442	435,862	777,853
SO ₂	1,219	2,406	22,839
NO _x	1,191	762	-8,258

의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 단독주택용 지열 열펌프 시스템의 국내 적용 타당성을 제시하기 위해 경제성을 검토하였다. 경제성 검토를 위해 생애주기비용 분석법(LCC analysis)을 적용하였으며, 지열 열펌프 시스템과 기존 설비의 연간 운전비용과 생애주기비용 등을 비교하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 현행 주택용(저압) 전기요금 체계를 적용할 경우, 단독주택용 지열 열펌프 시스템의 가격 경쟁력은 다소 떨어짐을 확인할 수 있었다.

(2) 현행 전기요금 체계를 상향 조정하거나 또는 일반 전기요금을 적용할 경우, 지열 열펌프 시스템의 단독주택 적용 가능성은 충분하였다.

(3) 분석 대상인 모든 시스템에 일반(갑) 저압 요금을 적용하여 생애주기비용을 계산한 결과, 단독주택용 지열 열펌프 시스템의 경제성은 기존 냉난방 설비보다 탁월하였다.

(4) 환경측면에서도 지열 열펌프 시스템은 이산화탄소를 포함한 온실가스를 기존 시스템보다 적게 배출하는 것으로 계산되었다.

초기 시공비용이 과다한 문제와 함께 기술에 대한 일반인의 신뢰도 부족 그리고 주택용 전기

요금 누진제 적용 등 다양한 원인 때문에 단독주택에 대한 지열 열펌프 시스템의 보급이 거의 전무한 실정이다. 따라서 정부의 지속적인 지원과 함께 전기요금 제도를 개선하고, 장기간에 걸친 성능분석과 이에 따르는 경제성 분석 등을 실시하여 외적인 걸림돌을 개선한다면 단독주택용 지열 열펌프 시스템의 국내 보급 활성화는 매우 밝을 것으로 전망된다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원의 2009년 신·재생에너지기술개발사업에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- DOE, 2001, Ground-source heat pumps applied to federal facilities-2nd edition, Federal Energy Management Program, DOE/EE-0245, PNNL-13534, US Department of Energy, Washington D.C.
- Sohn, B. H., Shin, H. J. and Park, S. K., 2004, Comparative analysis of life-cycle cost of ground source heat pump and conventional HVAC system, Proceedings of the SAREK 2004 Summer Annual Conference, pp. 1339-1344.
- Park, Y., Park, M. Y. and Kim, C. M., 2003, Economic analysis of heat pump system in educational building-focused on the high school or twenty four classes," Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 15, No. 10, pp. 879-887.
- Choe, S. H., Cha, B. J., Kim, S. M. and Leigh, S. B., 2002, A study on optimized design decision of building service systems based on a life-cycle cost analysis- a case study on community center and congress hall of a local government, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 2, pp. 134-142.
- Yu, I. K., 2000, Engineering Economy, 2nd ed., Hyungseul, Seoul.