

단독주택용 지열원 열펌프 시스템의 경제성 분석

손병후*, 강신형, 임효재

Economic Analysis of a Residential Ground-Source Heat Pump System

Byonghu Sohn*, Shin-Hyung Kang, Hyo-Jae Lim

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 pollutant emissions than the alternative HVAC systems considered in this work.

Key words

Economic analysis(경제성 분석), Life-cycle cost analysis(생애주기비용분석), Ground-source heat pump system(지열원 열펌프 시스템), Residential house(단독주택), Ground loop heat exchanger(지중열교환기), Annual energy consumption(연간 에너지 소비량)

* 한국건설기술연구원 화재 및 설비연구센터

■ E-mail : byonghu@kict.re.kr ■ Tel : (031)369-0511 ■ Fax : (031)369-0540

Nomenclature

a_p : P년도의 유지관리비 [W/년]
 e : 물가 상승률 [%]
 i : 이자율 [%]
 i_c : 실질 이자율 [%]

I_0 : 초기 투자비 [W]
 n : 내용연수 [년]
 P : 현가 [W]
 R : 기기 폐각비용 [W]

1. 서론

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

또한 지열원 열펌프 시스템은 연간 유지관리 비용이 적게 들고, 이산화탄소와 같은 온실가스의 배출이 기존 냉난방 설비에 비해 상대적으로 적은 친환경적인 시스템이다. 그러나 지중열교환기 매설을 포함한 전체 시스템의 초기 투자비가 기존 냉난방 설비보다 다소 큰 것이 단점이다.¹⁾

미국을 비롯한 유럽 등의 선진국에서는 지열 에너지를 이용한 냉난방 시스템 기술이 보편화 되어있다. 우리보다 에너지 사정이 좋은 국가들이 지열원 열펌프 시스템을 국가적인 차원에서 활성화시키고 있다는 점은 우리에게 시사하는 바가 크다. 따라서 에너지원의 대부분을 수입에 의존하는 국내 실정을 감안할 때, 건물 냉난방과 온수급탕 설비로 지열원 열펌프 시스템을 적극적으로 보급하여 신·재생에너지 이용을 활성화시키는 것이 필요하다.

현재 국내에서 지열원 열펌프 시스템은 공공기관 신축건물이나 상업용 건물, 복지시설, 학교 등 중·대형 건물에 주로 설치되고 있다. 이는 시스템의 저렴한 운영비, 환경친화성, 건물 설계와의 적합성 등 지열 에너지의 장점과 시장의 요구가 일치하기 때문이다. 하지만 많은 장점이 있는 지열원 열펌프 시스템이 단독주택용으로는 보급되지 못하고 있는 것도 우리 현실이다. 이는 기술에 대한 일반인의 인식 부족 등 여러 원인과 함께 무엇보다 주택용 전기 사용에 대한 누진세 적용이 가장 큰 걸림돌이 되고 있기 때문이다.

이에 본 연구에서는 Fig. 1에 도시한 단독주택(115m²)용 지열원 열펌프 시스템의 국내 적용 타당성을 제시하기 위해 경제성을 검토하였다. 경제성 검토를 위해 생애주기비용 분석법(이하 LCC 분석법)을 적용하였으며, 지열원 시스템과 기타 대안 시스템의 연간 운전비용과 생애주기비용 등을 비교하였다. 아울러 상용 프로그램(BLCC5.1)을 이용하여 지열원 시스템과 대안 시스템이 환경에 미치는 영향을 분석하였다.

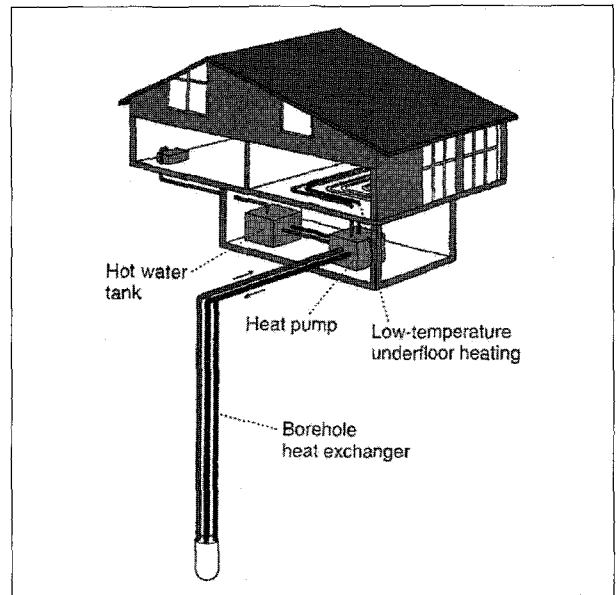


Fig. 1 Typical residential ground-source heat pump system.

2. 경제성 분석

2.1 경제성 분석 방법

일반적인 경제성 분석 방법에는 초기투자비법, 회수기간법, 투자수익률법, 내부수익률법, 생애주기비용 분석법 등이 있다. 과거에는 초기투자비법이 주로 사용되었으며, 내부수익률법과 투자수익률법은 계산방법이 다소 복잡하기 때문에 비교적 사용빈도가 적다. 현재는 회수기간법과 LCC 분석법을 주로 사용하고 있다.²⁾³⁾

회수기간이란 투자로부터 얻는 이익 또는 수입으로 투자액 전액(지열원 열펌프 시스템인 경우 초기 투자비)을 회수하는 데 걸리는 기간을 의미한다. 회수기간법으로 각 대안의 회수기간을 계산한 다음 그 값이 가장 짧은 대안을 최선의 안으로 선정하는 방법이다.

회수기간법은 시스템의 수명이나 유지관리 비용 등을 고려하지 않으며, 또한 계산편의상 이자(interest)를 무시하기 때문에 간편한 방법이지만 정확성은 다소 떨어진다. 여기서 회수기간은 초기 투자비 차액을 연간 수입(또는 절약비용)으로 나눈 값이다.⁴⁾

LCC 분석법은 각 대안 비교에 있어 시간적 가치에 대해 공통의 시점으로 환산하는 방법에 따라 현가법, 종가법, 연가법 등으로 구분된다. 건물 냉난방 시스템과 같이 사용기간 동안 발생하는 연비용이 동일할 경우, 일반적으로 현가법을 적용한다. 현가법은 검토하는 시점 이후에 발생하는 지출을 현시점의 가격으로 환산하여 합계하는 것으로, 현가 P는 다음 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

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

시스템 가동에 따른 에너지비용, 보전비용 등과 같은 P년도의 유지관리비 a_p 는 거의 매년 동일하게 발생하므로 식(1)을 식(2)로 정리할 수 있다.

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

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

식(3)의 연금현가계수 PWF(present worth factor)에는 물가상승에 따른 화폐의 시간적 가치가 포함되어 있지 않기 때문에, 이를 반영하기 위해서는 이자율보다 다음 식(4)의 실질이자율(i_e)을 적용해야 한다.

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

2.2 생애주기비용 분석 절차

단독주택용 지열원 열펌프 시스템과 각 대안 시스템의 LCC 계산 절차는 다음과 같다.⁴⁾

(1) 기초 조사

대안을 설정하기 위한 목적물의 적용사례나 각종 경제관련 지표를 조사한다.

(2) 대안 설정

최소 성능기준을 만족하는 대안들을 선정하고, 만약 성능기준을 초과하는 대안이 도출된 경우 추가 이익을 반영한다.

(3) 가정 설정

분석기간(study period), 현가환산율(discount rate), 분석시점(base date) 등 LCC 분석에 필요한 가정들을 설정한다.

(4) 각 시스템별 비용 산정과 발생시점 결정

초기투자비, 운영비(operational cost), 기타비용 등을 발생시점에 따라 정확히 산정한다.

(5) 요소별 미래 발생 비용을 현재가치로 환산

각 비용요소 중, 미래에 발생하게 될 비용을 현재 가치(present value)로 환산한다.

(6) 각 대안에 대한 생애주기비용 계산

각 대안 시스템을 설치한 후 발생하는 비용을 현재 가치로 환산하여 다음과 같이 계산한다.

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

(7) 측정 불가능한 비용과 편익에 대한 고려

비용과 같이 정량적인 측정은 불가능하지만, 대안 선정 시 간접적으로 영향을 미칠 수 있는 요소에 대해 정성적인 영향을 반영한다.

(8) 민감도 분석

LCC 분석에 적용되는 여러 지표들(현가환산율 등)은 대부분 추정된 값이다. 만약 예측이 부정확할 경우, 결과에 영향을 미치기 때문에 민감도분석(sensitivity analysis)을 수행한다.

(9) 경제성 평가를 위한 관련 지표의 선정

필요시 순익(net savings), 투자 대 이익의 비율(savings-to-investment ratio, SIR), 회수기간(payload period, PB) 등의 경제성 평가를 위한 보조 지표를 산정한다.

2.3 생애주기비용 분석 조건 설정

본 연구에서는 Table 1에 나타난 시스템을 대상으로 LCC를 계산하였다. 아울러 Table 1에 각 시스템의 효율과 COP 그리고 현 시점에서 각 연료의 기준 발열량과 단가를 정리하였다. 시스템의 효율과 COP는 가정된 값이다. 따라서 이 값들이 변할 경우 LCC 계산결과도 변하지만, 그 영향은 그리 크지 않을 것으로 예상된다.

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

단독주택용 지열원 열펌프 시스템과 기타 대안 시스템의 LCC를 계산할 때, 초기 투자비, 유지관리비 및 기기 폐각비용과 같은 비용 항목을 바탕으로 이자율, 에너지비용 상승률, 내용연수 등을 종합적으로 고려해야 한다. 초기 투자비는 분석시점에서의 현재 가격이며 지열원 열펌프 시스템인 경우 실제 시공비용을 그리고 기타 대안 시스템인 경우 견적자료를 기준으로

Table 2. Reference values for LCC analysis.

항목	난방	냉방
설치용량	15.6 kW	15.6 kW
부하율	0.7	0.6
운전 개월수	5	3
월 운전일	30	30
일 운전시간	14	6

Table 3. Current electricity price framework.

사용량	기본요금[₩/호]	전력량 요금[₩/kWh]
100 kWh 이하	370	55.1
101~200 kWh	820	113.8
201~300 kWh	1,430	168.3
301~400 kWh	3,420	248.6
401~500 kWh	6,410	366.4
501 kWh 이상	11,750	643.9

로 산출하였다.

정기적인 유지관리비에는 수리비, 점검비, 청소비, 인건비, 일반 관리비 등이 있다. 이 비용은 대상 건물이나 시스템의 특성 그리고 관리능력에 따라 상당한 차이가 날 수 있다. 지열원 열펌프 시스템인 경우, 국내에는 정확한 유지관리비 데이터가 거의 없기 때문에 시스템 구입비용의 1.5%로 가정하였다.⁶⁾ 기타 대안 시스템에 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 건물의 용도, 계약 전력, 계절, 사용 시간대, 월별 총 사용전력량 등에 따라 달라진다. 본 연구에서는 Table 3의 현행 주택용(저압) 전기요금 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 도시가스과 LPG는 9%로 가정하여 적용하였다. 분석기간은 운전시작 일로부터 20년 간 운전되는 것으로 하였으며, 이때 운전시작 일은 2007

Table 1. Systems for LCC analysis.

항목	GSHP	AIT-1	ALT-2	ALT-3
시스템 구성	지열원시스템	보일러/에어컨	보일러/에어컨	보일러/에어컨
COP 또는 효율	3.3(난방) 4.0(냉방)	80% / 2.7	80% / 2.7	80% / 2.7
사용 연료*	전기/전기	경유/전기	도시가스/전기	LPG/전기

* 연료의 기준 발열량 및 단가

- 전기 : 860 kcal/kWh, 현행 주택용(저압) 전기요금
- 경유 : 9,050 kcal/liter, 1,162원/liter
- 도시가스 : 10,500 kcal/Nm³, 585원/Nm³
- LPG : 12,050 kcal/Nm³, 1,500원/Nm³

Table 4. Economic comparison of ALT-1 and residential GSHP system(unit: 1,000 #).

항목	ALT-1		GSHP								
	난방	냉방	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5	Case-6	Case-7	Case-8	
월 비용	난방	719	-	902	835	768	701	131	205	645	387
	냉방	-	442	219	152	106	70	74	84	90	66
연간 운전비		3,595	1,326	5,168	4,633	4,161	3,718	874	1,278	3,492	2,130
회수기간		-	-	82.6년	31.3년	19.7년	5.8년	6.5년	16.6년	8.5년	
LCC		115,130	134,889	123,856	114,131	105,018	46,428	54,745	100,359	72,303	
(비율)		(100%)	(117%)	(108%)	(99%)	(91%)	(40%)	(48%)	(87%)	(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).

년 1월부터인 것으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

Table 4는 위에서 설정한 LCC 분석 조건 그리고 Table 1에서 Table 3의 값들을 적용하여 지열원 열펌프 시스템과 경유보일러/에어컨(ALT-1)의 LCC를 계산한 결과다. 표에서 Case-1은 Table 3의 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 조정하고 계산한 결과다.

계산 결과에서 보듯이, 기존 시스템인 ALT-1의 LCC를 100으로 하였을 때, 현행 주택용 전기요금 체계(Case-1)에서는 지열원 열펌프 시스템의 가격 경쟁력은 상대적으로 떨어질 수밖에 없다. 이는 ALT-1과는 달리, 지열원 열펌프 시스템은 냉난방에 모두 전기를 사용하기 때문이다.

이러한 점을 극복하여 지열원 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, 지열원 시스템의 연간 운전비와 LCC가 감소하여 ALT-1과 거의 동일한 수준을 보였다. 하지만 초기 투자비 회수기간 면에서 지열원 시스템의 경쟁력

이 그래도 부족하여 이에 대한 해결 방안을 마련해야 할 것으로 판단된다.

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

Table 5는 모든 시스템에 일반(갑) 저압 요금을 적용하였을 때, 각 시스템의 월간 연료 소비량, 연간 운전비, 투자비 회수기간, LCC 등을 계산한 결과다. 지열원 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, 유리관리비, 교체비용, 잔여가치 등에서도 기존 설비보다 지열원 열펌프 시스템이 경제적이다. 이는 Table 5의 계산 결과에서도 확인할 수 있다.

생애주기 동안 단독주택용 지열원 열펌프 시스템과 경유보일러/에어컨(ALT-1) 두 시스템이 배출하는 오염물질을 계산하

Table 5. Total present value of LCC for each system(unit: 1,000 #).

항목	GSHP				
	ALT-1	ALT-2	ALT-3		
월 소비량	난방	1,566 kWh	614 liter	529 Nm ³	461 Nm ³
	냉방	633 kWh	938 kWh	938 kWh	938 kWh
연간운전비		769	3,876	2,036	4,133
투자회수기간		-	7.6년	18.7년	7년
LCC(비율)		44,259	93,644	53,499	99,213
		(100%)	(212%)	(121%)	(224%)

Table 6. Life-cycle emissions in kilograms for GSHP and ALT-1.

	Average annual emissions		LCC reduction
	GSHP[kg]	ALT-1[kg]	
Electricity			
CO ₂	395,422	174,898	-4,244,266
SO ₂	1,219	539	-13,085
NOx	1,191	527	-12,786
Light oil			
CO ₂	0	260,964	5,022,079
SO ₂	0	1,867	35,924
NOx	0	235	4,527
Total			
CO ₂	395,442	435,862	777,853
SO ₂	1,219	2,406	22,839
NOx	1,191	762	-8,258

였으며, 그 결과를 Table 6에 정리하였다. 표에서 질소산화물(NO_x)를 제외하면 전체적으로 지열원 열펌프 시스템이 환경오염 물질을 적게 배출하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 다른 대안 시스템(ALT-2와 ALT-3)과 비교했을 경우에도 유사하였으며, 이는 지열원 열펌프 시스템이 환경친화적인 시스템이라는 것을 받든다.

4. 결론

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

- (1) 현행 주택용(저압) 전기요금 체계를 적용할 경우, 단독주택용 지열원 열펌프 시스템의 가격 경쟁력은 다소 떨어짐을 확인할 수 있었다.
- (2) 현행 전기요금 체계를 상향 조정하거나 또는 일반 전기요금을 적용할 경우, 지열원 열펌프 시스템의 단독주택 적용 가능성은 충분하였다.
- (3) 분석 대상인 모든 시스템에 일반(갑) 저압 요금을 적용하여 생애주기비용을 계산한 결과, 단독주택용 지열원 열펌프 시스템의 경제성은 기존 냉난방 설비보다 탁월하였다.

(4) 환경측면에서도 지열원 열펌프 시스템은 이산화탄소와 같은 온실가스를 기존 시스템보다 적게 배출하는 것으로 계산되었다.

다양한 시스템을 보급하고 있는 외국은 초창기에 주거용으로 보급을 시작한 후, 점차 중·대형 건물에 적합한 시스템을 보급한 점은 우리와 반대라고 할 수 있다. 이는 초기 시공비용이 과도한 문제와 함께 기술에 대한 일반인의 신뢰도 부족이나 시공 부실 우려 등에서 그 원인을 찾을 수 있지만 무엇보다 주택용 전기요금 누진제 적용도 가장 큰 걸림돌이 되고 있다. 따라서 정부의 지속적인 지원과 함께 전기요금 제도를 개선하고, 장기간에 걸친 성능분석과 이에 따르는 경제성 분석 등을 실시하여 외적인 걸림돌을 개선한다면 단독주택용 지열원 열펌프 시스템의 국내 보급 활성화는 매우 밝을 것으로 전망된다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단 신·재생에너지센터/지열이용기술연구회의 2007년도 연구 기획(주거용 소형·소용량 지열원 열펌프 시스템 개발)에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다. 아울러 본 논문의 일부 내용은 한국신·재생에너지학회 2007 추계학술대회에서 발표한 내용입니다.

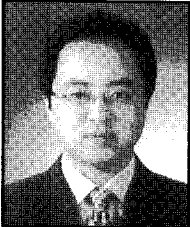
References

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.

- (4) Yu, I. K., 2000, Engineering Economy, 2nd ed., Hyungseul, Seoul.
- (5) 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.

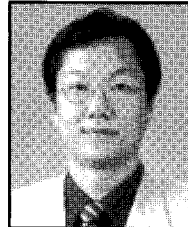
손병후



1993년 홍익대학교 기계설계학과 공학사
1995년 홍익대학교 기계공학과 공학석사
2003년 홍익대학교 기계공학과 공학박사

현재 한국건설기술연구원 화재 및 설비연구센터 지열연구팀장
(E-mail ; byonghu@kict.re.kr)

강신형



1985년 연세대학교 기계공학과 공학사
1987년 연세대학교 기계공학과 공학석사
1994년 연세대학교 기계공학과 공학박사

현재 건양대학교 기계공학과 교수
(E-mail ; shkang@kongyang.ac.kr)

임호재



1985년 서울대학교 기계공학과 공학사
1989년 한국과학기술원 기계공학과 공학석사
1995년 한국과학기술원 기계공학과 공학박사

현재 호서대학교 기계공학과 교수
(E-mail ; hylim@office.hoseo.ac.kr)