특집

지열원 열펌프 이용 학교건물 냉난방시스템의 경제성 고찰

조 정 식, 손 병 후
한국건설기술연구원

1. 서 론

지열원 열펌프시스템(ground source heat pump, GSHP)은 크게 지중 열교환기(ground heat exchanger)와 열펌프로 구성된 냉·난방 겸용 시스템으로 외기의 급격한 변화에도 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 열펌프는 연간 유지관리비용이 적게 들고, 이산화탄소와 같은 온실가스의 배출이 기존 냉난방 설비에 비해 상대적으로 적은 친환경적인 시스템이다. 그러나 지중 열교환기의 매설을 포함한 전체 시스템의 초기 설치비가 기존 냉난방 설비보다 큰 것이 단점이다.

미국을 비롯한 유럽 등의 선진국에서는 지열 에너지를 이용한 냉난방 시스템 기술이 보편화 되어 있다. 우리보다 에너지 사정이 좋은 국가들이 지열원 열펌프시스템을 국가적인 차원에서 활성화 시키고 있는 점은 우리에게 시사하는 바가 크다. 따라서 에너지원의 대부분을 수입에 의존하는 국내의 실정을 감안할 때, 건물의 냉난방 및 온수 급탕 설비로 지열원 열펌프를 적극적으로 보급하여 대체에너지 이용을 활성화시키는 것이 필요하다.

국내의 경우, 지열원 열펌프시스템에 관심을 갖기 시작한 것은 최근의 일이지만, 최근 들어 대체에너지 이용에 대한 관심도가 증가하고 보급 활성화를 위한 제도적인 장치가 마련되면서 설치 사이트가 증가하고 있다. 하지만 지열원 열펌프시스템에 대한 기술적인 검증이나 장기간 운전에 따른 성능분석 그리고 신축 시스템 및 이미 설치된 시스템을 대상으로 한 경제성 분석 등과 같은 연구는 미비한 실정이다.

이에 본고에서는 신축 건물에 적용된 지열원 열펌프시스템과 기존 냉난방 설비에 대한 경제성 분석을 통해 지열원 열펌프시스템의 경제성을 검토하였다. 이를 위해 지열원 열펌프가 설치된 고등학교의 신축 도서관 및 기숙사를 대상 건물로 선정하였다. 대상 건물의 냉난방부하 및 연간 에너지소비량 산출은 W/S Load를 이용하였으며 경제성분석은 BLCC5.1을 이용하였다.

2. 대상 건물 및 지열원 열펌프시스템

2.1 대상 건물 개요

일반적으로 냉난방 설비의 경제성은 건축 형태, 즉 신축과 개보수 등에 따라 상이한 결과가 도출될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 고등학교의 신축 도서관 및 기숙사를 대상 건물로 설정하였으며, 대상 건물의 개요는 **표 1** 및 **그림** 1과 같다.

대상 건물은 연면적 2,990 m^2, 지하 1층의 기계실 그리고 지상 4층으로 구성되었으며, 냉난방부

하 및 급탕부하는 각각 326.6 kW, 249.8 kW, 34.9 kW이다. 지상 1층과 2층은 도서관으로서 자료실, 열람실, 세미나실 등으로 되어 있으며, 3층과 4층은 세탁실, 샤워실, 휴게실, 26개의 방으로 구성된 기숙사이다.

2.2 지열원 열펌프시스템

대상 건물에 설치된 지열원 열펌프는 냉매22를 작동유체로 사용하는 물 대 물 방식(water-to-water type)이다. 대상 건물의 냉난방을 위해 20 RT급 4대와 10 RT급 1대의 열펌프를 사용하였다. 또한 급탕용으로 10 RT 용량의 열펌프 1대를 지하 기계실에 설치하였다.

그림 2는 기계실의 열펌프와 연결된 지중 열교환기의 위치 및 배열을 개략적으로 보여주고 있다. 지중 열교환기의 설계는 상용 소프트웨어인 GLD를 이용하였으며, 지면에서 150 m 깊이까지 천공한 36개의 보어홀(borehole)에 직경 25 mm(1 in.)의 고밀도 폴리에틸렌 U자 관(U-tube)을 수직으로 매설하여 지중 열교환기로 사용하였다. 이때 지중 열교환기 파이프를 보어홀에 삽입한 후 뒤채움재(grouting material)를 이용하여 보어홀 사이의 빈 공간을 마무리하였다. 지중 열교환기와 열펌프 사이를 순환하는 2차 순환유체는 에탄올과 물을 혼합한 부동액을 사용하였다. 또한 본 건물의 특성상 아침 및 저녁시간에 급탕부하가 집중되므로 7,000 ℓ의 급탕탱크를 기계실에 설치하였다.

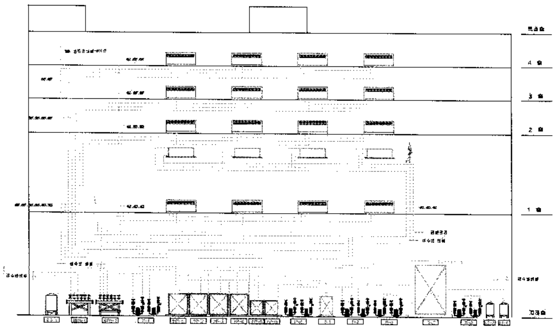
본고에서 지열원 열펌프시스템과 경제성 검토 대상인 냉난방 설비는 경유(light oil)용 증기보일러와 개별 에어컨(이하 ALT)으로 설정하였다.

2.3 연간 에너지소비량

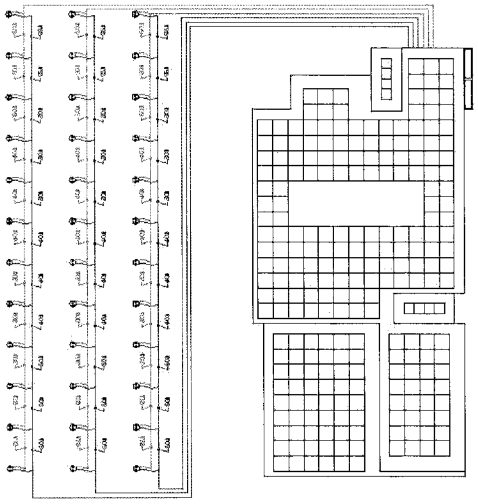
경제성 분석에 가장 큰 영향을 미치는 연간 에너지소비량을 정확히 산출하기 위해서는 현장 실증에 의한 방법을 사용하여야 한다. 그러나 현장 조사에 의한 설비 가동시간 및 이에 따른 에너지 소비량을 정확하게 추정하는 것은 불가능한 실정이다. 따라서 상용 소프트웨어를 이용하여 연간 에너지소비량을 산출하였다. 이 때 대상 건물의 냉난방 부하 및 사용 형태 (일일 운전시간, 공휴일

<표 1> 대상건물의 개요

구 분		내 용
건물 개요	건물 면적	820 m²
	연면적	2,990 m²
	건물 규모	지하 1층 ~ 4층
냉방부하		326.6 kW
난방부하		249.8 kW
급탕부하		34.9 kW



[그림 1] 분석 대상건물의 개요



[그림 2] 지중 열교환기 설치위치 및 배열

및 일요일, 방학 등), 외기 조건, 기기의 효율 등 제반 변수들을 모두 고려하였으며, **표 2**에 정리하였다.

지열원 열펌프는 열펌프의 압축기 및 부동액 순환펌프를 가동하기 위해 전기에너지만 사용하며, ALT는 경유와 전기를 동시에 사용한다. **표 2**에서 냉방의 경우 8월에 그리고 난방의 경우에는 12월에 에너지를 가장 많이 소비하는 것으로 나타났다.

3. 경제성 고찰

3.1 경제성 검토방법

냉난방 및 공조 설비에 대한 경제성 분석방법에는 초기투자비법, 회수기간법, 투자수익률법, 내부수익률법, 수명주기비용(LCC) 분석법 등이 있다. 과거에는 초기투자비법이 주로 사용되었으며, 내부수익률법과 투자수익률법은 계산방법의 어려움으로 인해 비교적 사용빈도가 적다. 현재는 회수기간법과 LCC 분석법을 주로 사용하고 있다.

회수기간이란 투자로부터 얻는 이익 또는 수입으로 투자액 전액(지열원 설비인 경우 초기 설치비)을 회수하는 데 소요되는 기간을 의미한다. 회수기간법으로 각 설비 대안의 회수기간을 계산하고, 그 기간이 짧은 대안을 최선의 안으로 선정하는 방법이다. 냉난방 설비의 사용자 또는 건물주가 투자된 자금을 빨리 회수하는 것이 중요하다면 이 방법은 상당히 유용한 방법이 된다. 회수기간법으로 경제성을 검토하는 것은 설비의 수명이나 유지 보수비용이 포함되지 않으며, 또한 계산 편의상 이자(interest)를 무시하므로 간편한 방법이지만 정확성은 다소 떨어진다. 투자 회수기간은 초기 투자비(또는 설치비) 차액을 연간 수입(또는 절약비용)으로 나눈 값이다.

LCC분석법은 각 대안 비교에 있어 시간적 가치에 대해 공통의 서점으로 환산하는 방법에 따라 현가법, 종가법, 연가법 등으로 구분할 수 있다. 건축설비 시스템과 같이 사용기간 동안 발생하는 연비용이 동일할 경우에는 현가법이 일반적으로 사용된다. 현가법은 검토하는 시점 이후에 발생하는 지출을 현시점의 가격으로 환산하여 합계하는 것으로 현가 P는 다음의 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

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

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

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

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

식 (3)의 연금현가계수 PWF(present worth

<표 2> 연간 에너지소비량

구 분	GSHP		ALT.	
	Elec. (MWh)	Oil (Liter)	Elec. (MWh)	Oil (Liter)
봄/가을	12.0	0	0	3.8
여 름	123.3	0	173.6	1.1
겨 울	257.2	0	0	81.4
합 계	392.5	0	173.6	86.3

factor)는 물가상승에 따른 화폐의 시간적 가치가 고려되어 있지 않기 때문에 이를 반영하기 위해서는 이자율보다 다음의 식 (4)와 같이 실질이자율, i_e가 적용되어야 한다.

$$i_e = \frac{i-e}{1+e} \qquad \text{식 (4)}$$

여기서,

a_p : P년도의 유지관리비 [\/년]
e : 물가 상승률 [%]
i : 이자율 [%]
i_e : 실질 이자율 [%]
I_0 : 초기 투자비 [₩]
n : 내용연수 [년]
P : 현가 [₩]
R : 기기 폐각비용 [₩]

으로 표시한다.

3.2 LCC 분석 수행절차

본고에서 검토하고 있는 냉난방 설비에 따른 LCC 분석절차는 다음과 같다.

(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), 현가환산율(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), 기타비용 등의 요소별 비용을 발생시기에 따라 정확히 산정한다.

(5) 요소별 미래발생 비용을 현재가치로 환산

미래에 발생하게 될 비용을 현재가치로 환산한다.

(6) 각 대안에 대한 수명주기비용 (LCC) 계산

냉난방 설비의 초기설치 이후에 발생하는 비용을 현재 가치(present value)로 환산하여 다음과 같이 계산한다.

LCC= 초기 투자비의 현재가(present value of initial costs, I) + 에너지 비용의 현재가(present value of energy costs, E) + 유지관리비용의 현재가(present value of OM&R costs, OM&R) + 시설 교체비용의 현재가(present value of replacement costs, R) - 잔여 가치의 현재가(present value of residual value, RV)

(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(예로서 현가환산율 등)은 대부분 추정된 값으로 입력자료가 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 이익의 비율(savings-to-investment ratio, SIR), 회수기간(payback period, PB) 등의 경제성 평가를 위한 보조적인 지표를 산정한다.

3.3 LCC 분석조건 설정

본 고의 두 대안에 대한 LCC 분석 시에는 초기

투자비, 유지관리비 및 기기 폐각비용과 같은 구성요소를 바탕으로 이자율, 에너지비용 상승률, 내용연수 등이 종합적으로 고려되어야 한다. 초기투자비는 분석시점에서의 현재가격으로 이루어지며, GSHP인 경우 실제 시공비용을 ALT에 대해서는 견적자료를 기준으로 산출하였다.

정기적인 유지관리비에 포함되는 항목으로는 수리비, 점검비, 청소비, 운영인건비, 일반 관리비 등이 있으며 건물과 설비의 특성과 관리능력에 따라 상당한 차이가 있을 것이다. ALT에 대한 유지관리비의 경우 국내 자료수집의 어려움으로 초기 투자비의 5%로 가정하였다. 또한 GSHP가 활성화되어 있는 외국이나 보급 초기단계인 국내의 경우 유지관리비의 정확한 자료가 거의 없는 실정이어서 1.5%로 가정하였다. 또한 운전기간 내에 돌발적인 고장 없이 사용한 후 설비를 전량 교체하는 것으로 가정하였으며, 따라서 건물을 운영할 때 예상치 못한 시점에서 발생하는 비정기적인 운영비용은 없는 것으로 가정하였다.

에너지 비용의 산출은 전기의 경우 건물용도, 계약전력, 계절, 사용시간대, 월별 총 사용전력량 등에 따라 달라진다. 본 고찰에서는 **표 3**의 에너지원 별 단가를 적용하였다.

건물의 냉난방 설비에 대해 LCC 분석을 수행할 때, 여러 가지 가격변동 요소에 대한 고려가 필요하다. 이에 대한 체계적인 데이터가 국내에는 아직 없기 때문에 통계청의 경제동향 데이터를 근거로 현가환산율(discount rate)은 8%, 물가 상승률(price escalation rate)은 5%로 하였다. 그리고 에너지가격 변동률(energy price escalation rate)은 전기인 경우 3%, 경유인 경우에는 9%를 적용하였다. 분석기간은 설비의 운전시작 일로부터 20년 간 운전된 후까지의 기간으로 하였다.

<표 3> 에너지원별 단가

구 분	단 가
전 기 (교육용)	86.2 ₩/kW: 여름 (7월, 8월) 55.4 ₩/kW: 봄/가을 (4월 ~ 6월, 9월) 59.6 ₩/kW: 겨울 (10월 ~ 3월)
경 유	750 ₩/liter

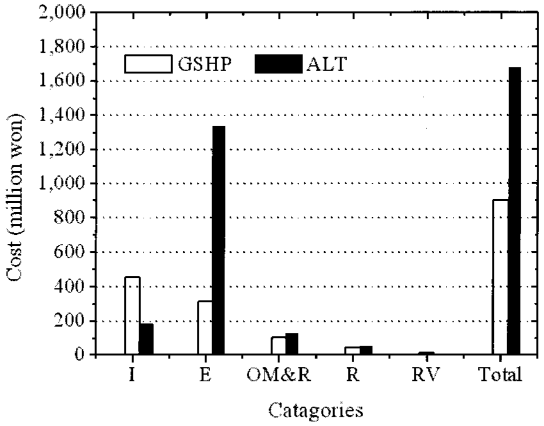
<표 4> LCC분석 총 현가 (단위 : 1,000₩)

구 분	GSHP	ALT
초기투자비(I)	455,631	189,846
에너지 소비 비용(E)	313,271	1,542,895
OM&R 비용(OM&R)	100,960	140,222
교체비용(R)	42,632	60,903
잔존 비용(RV)	12,969	0
LCC분석 총 현가(Total)	899,524	1,933,866

3.4 LCC 분석 결과

전술한 LCC 분석조건 및 **표 2**의 연간 에너지소비량을 기준으로 GSHP와 ALT 시스템에 대해 LCC 분석을 수행한 결과는 **표 4**와 **그림 3**과 같다. **표 4**와 **그림 3**에서 보는 바와 같이 초기 투자비 면에서는 ALT가 유리하나 에너지소비량이 과대하여 총 LCC가 크게 상승하였다. 또한 정기적인 유리관리비, 기기 교체비용, 잔여가치 등에서도 GSHP가 경제적인 시스템인 것을 알 수 있다.

LCC 분석을 통해 GSHP 시스템을 설치하여 수명주기 동안 발생하는 순이익은 1,034,342 천원이고, 투자 대 이익의 비율은 5.41, 내부수익율(internal rate of return)은 17.51%로 나타났다.



[그림 3] LCC분석 비교

<표 5> GSHP/ALT의 환경물질 배출량

구 분	연간 평균배출량	
	GSHP (kg)	ALT (kg)
전기		
CO_2	395,422.33	174,898.35
SO_2	1,219.16	539.22
NOx	1,191.16	526.87
경유		
CO_2	0	260,963.80
SO_2	0	1,866.74
NOx	0	235.24
합계		
CO_2	395,442.33	435,862.15
SO_2	1,219.16	2,405.96
NOx	1,191.16	762.11

또한 투자 회수기간 (payback period)은 4년인 것으로 나타났다.

표 5는 수명주기 동안 두 설비가 배출하는 오염물질을 BLCC를 이용하여 계산한 것이다. Nox를 제외하고 전체적으로 GSHP가 이산화탄소와 같은 환경오염물질을 적게 배출하는 것으로 미루어 친환경적인 시스템인 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본고에서는 최근 들어 관심도가 증가하고 있는 지열원 열펌프시스템의 경제성을 검토하고자 일반적으로 적용할 수 있는 기존 냉난방 설비를 선정하여 LCC 고찰을 수행하였다. LCC 고찰을 수행한 결과 지열원 열펌프시스템의 초기 투자비는 기존 설비에 비해 크게 나타났지만, 기타 연간 에너지소비량, 유지관리비용, 기기 교체비용 등에서 기존 시스템보다 경제적인 시스템인 것을 확인할 수 있었다. 환경적인 측면에서도 지열원 열펌프는 이산화탄소와 같은 온실가스를 기존 시스템보다 적게 배출하는 것으로 나타났다. 또한 본 대상건물에 적용된 지열원 시스템의 단순 투자 회수기간은 4년 정도인 것으로 나타났다.

본고와 같이 LCC 고찰을 이용하여 경제성 분석을 할 때, 분석과정에서 고려되지 않은 일부 비용요소 또는 현가환산율, 에너지가격 변동률 등과 같은 가격변동 요소에 대한 체계적이고 정확한 데이터를 구축하여 실제 운영 데이터와 비교 분석한다면 보다 정확한 LCC 분석이 수행될 것으로 예상된다.

참고문헌

1. DOE, 2001, Ground-source heat pumps applied to federal facilities-second edition, Federal Energy Management Program, DOE/EE-0245, PNNL-13534, US Department of Energy, Washington D.C.
2. Lund, J. W. and Freeston, D. H., 2001, World-wide direct use of geothermal energy 2000, Geothermics, Vol. 30, pp. 29-68.
3. Sohn, B. H., Cho, C. S., Shin, H. J., An, H. J., and Yim, S. K., 2003, Performance

evaluation of a closed loop vertical ground-source heat pump system, Proceedings of the SAREK 2003 Winter Annual Conference, pp. 56-61.
4. Sohn, B. H., Cho, C. S., Shin, H. J., and An, H. J., 2004, Cooling and heating performance evaluation of a ground source heat pump. Proceedings of the KSME 2004 Spring Annual Meeting, pp. 2117-2122.
5. An, H. J., Baek, S. K., Shin, H. J., and Cho, C. S., 2003, Study on heat exchanger performance of ground heat exchanger, Proceedings of the SAREK 2003 Winter Annual Conference, pp. 176-181.
6. 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.
7. Yu, I. K., 2000, Engineering Economy, 2nd ed., Hyungseul, Seoul.
8. 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.