

ATES 열펌프 시스템 성능 및 경제성 분석에 관한 연구

오 명 석, 최 종 민[†]
국립 한밭대학교 기계공학과

Study on the Performance of an ATES Geothermal Heat Pump System and Economic Analysis

Myungsuk Oh, Jong Min Choi[†]

Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

(Received January 3, 2012; revision received January 10, 2012)

ABSTRACT: The aim of this study is to investigate the performance of a heating and cooling system with aquifer thermal energy storage(ATES heat pump system) known as one of the underground thermal energy storage application systems. The ATES system was composed of heat pump unit and ATES, which was installed in a factory building located in Anseoung. The system represented very high heating and cooling performance, and showed nearly constant COP at each heating and cooling season due to the stability of EWT. The economic analysis about an ATES system and a conventional system was also executed. The conventional system adopted an air-conditioner in the summer season and a LNG boiler in the winter season. The payback period of the ATES system was estimated by 6.62 years.

Key words: ATES(대수층 축열), GCHP(지열원 열펌프 시스템), COP(성적계수), LCC(생애주기비용), Economic evaluation(경제성 분석)

기 호 설 명

A_o	: 초기비용 [원]
COP_{HP}	: 열펌프 유닛 성적계수
COP_{sys}	: ATES 시스템 성적계수
C_p	: 비열 [kJ/kg · °C]
DR	: 할인율 [%]
IC_{alter}	: 대안 시스템의 초기투자비용 [원]
IC_{conv}	: 기존 시스템의 초기투자비용 [원]
\dot{m}	: 질량유량 [kg/s]
MW	: 관측공
OP_{alter}	: 대안 시스템의 운전비용 [원]
OP_{conv}	: 기존 시스템의 운전비용 [원]

PP	: 투자회수기간 [년]
PV	: 현재가치 [원]
PW	: 양수정
$PWAF$: 현재가치계수
Q_{id}	: 냉방 또는 난방용량 [kW]
T_i	: 실내열교환기 입구온도 [°C]
T_o	: 실내열교환기 출구온도 [°C]
W_{HP}	: 히트펌프 유닛 소비전력 [kW]
W_{pump}	: 심정펌프 소비전력 [kW]

1. ATES 시스템 실증 성능 분석

전 세계적으로 화석연료 매장량의 제한을 극복하고, 환경오염을 해결하기 위하여 신·재생에너지 개발 및 이용의 필요성이 급증하고 있다. 신·재생에너지 사용 시스템 중에 지열원 열펌프 시스템은 현존하는 냉난방 방식 중에서 가장 효율이 높고 환경

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-821-1731; fax: +82-42-821-1462

E-mail address: jmchoi@hanbat.ac.kr

친화적인 시스템으로 그 사용 및 기술 개발이 증가되고 있다.⁽¹⁾ 지열원 열펌프 시스템의 장점은 상용 공기 열원 열펌프 시스템보다 에너지 소비량이 적고, 대기 중에 노출되는 기기가 없으며, 사용되는 냉매의 양이 상대적으로 적다는 것이다. 또한 난방 및 냉방 사이클에서 지열은 공기보다 안정적이기 때문에 지열원 열펌프 유닛은 높은 효율과 우수한 성능을 갖는다. 그러나 지중열교환기의 매설을 포함한 전체 시스템의 초기 설치비가 기존 설비보다 크다는 단점이 있다.^(2,3) 이러한 점 때문에 지열원 열펌프 시스템의 초기 투자비를 줄이기 위하여 유럽, 중국 등에서는 건물기초를 활용한 에너지파일, 복수정 시스템 등의 다양한 형태의 지중열교환기를 활용한 지열원 열펌프 시스템 개발을 진행하고 있다.^(4,5)

일본에서는 현재까지 널리 보급된 수직밀폐형 시스템에 비해 초기설치비가 적은 복수층의 수평형 열교환기의 성능 향상에 관한 연구를 수행하였다.⁽⁶⁾ 또한, Hamada et al.⁽⁷⁾과 Yu⁽⁸⁾는 건물 기초를 활용하여 천공비용 저감이 가능한 에너지파일형 지열원 열펌프 시스템의 성능 평가 및 분석에 관한 연구를 수행하였다. 터키에서는 대수층을 활용하여 시스템 유지보수 비용 절감에 관한 연구를 추진하였다.⁽⁹⁾ 대수층축열(Aquifer thermal energy storage) 적용 지열원 열펌프 시스템(이하 ATEs 시스템)은 하절기에는 열펌프에서 생성된 온수를 대수층으로 주입시켜 지중축열체의 온도를 상승시키고, 동절기에는 열펌프에서 생성된 냉수를 대수층으로 주입시켜 축열체의 온도를 하강시켜 연간 지중 열원의 안정성과 효율 증대가 가능한 시스템으로 알려져 있다.⁽¹⁰⁾

하지만, 현재까지 국내에서 ATEs 시스템에 대한 기초 성능 및 경제성에 관한 연구 성과는 전무하다.

본 연구에서는 ATEs 시스템을 설계 및 시공하여 하절기와 동절기의 실증 성능 분석을 수행하였다. 이를 기반으로 ATEs 시스템에 대한 경제성 분석을 수행하였으며, 기존에 널리 사용되고 있는 에어컨과 LNG 보일러 시스템과의 경제성을 비교 평가하였다. 본 연구를 통하여 ATEs 시스템의 국내 적용을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. ATEs 시스템 실증 성능 분석

2.1 ATEs 실증 시스템 개요

본 연구의 ATEs 시스템 적용 대상 사이트는 안

성에 소재한 J기업의 작업실이다. 지상 1층으로 구성되어있으며, 작업자들이 주간에 기업에서 생산되는 제품을 조립하는 작업공간이다. 작업공간은 495.9 m²이며, 냉난방 피크부하는 각각 43.5 kW와 59.2 kW이다. Fig. 1은 본 연구의 ATEs 시스템의 개요도를 나타내고 있다. 부하량에 따라 20 RT 용량의 물대물 지열원 열펌프 유닛을 설치하였으며, 열펌프에서 생성된 냉수 또는 온수는 축열조에 저장된다. 실내 부하 공간에는 2개의 FCU가 설치되어 축열조로부터 계절에 따라 냉수 또는 온수가 공급되어 냉난방 기능을 수행한다. 대수층으로부터 열펌프로 지하수를 공급하기 위하여 2개의 주입정과 양수정을 설치하였다. 여름 냉방 운전 중에 한 개의 우물공으로부터 지하수가 열펌프 유닛의 실외열교환기로 유입된 후 타 우물공에 축열하고, 동절기에 여름에 축열된 우물공으로부터 지하수가 열펌프로 유입되어 타 우물공에 주입한다. 즉, 계절별로 대수층에 냉열 또는 온열을 축열하기 위하여 주입정과 양수정이 바뀌게 된다.

주입정과 양수정은 워비트(Φ300~400 mm)로 굴착 가능한 지층까지 굴착한 이후 풍화대 하부부터 연암층 상부까지는 트리콘비트(Φ250 mm)로 굴착하였다. 지하수면 상부까지는 무공관(Φ200 mm)을 설치하였으며, 지하수면 하부 포화대에는 유공관(Johnson Screen, Φ200 mm, 슬롯크기 0.2~0.7 mm)을 지층조건에 따라 설치하였다. 굴착지름과 우물자재 사이공간에 입경 2에서 8 mm의 자갈을 충전하였으며, 지하수위 상부부터 지표하 1.5 m 구간은 그라우팅을 실시하였다.

Fig. 1에서 PW-1은 난방시 양수정, 냉방시 주입정이며, 공저로부터 1.5 m 구간에 무공관을 설치하였다. 상부에는 지표하 9.0~49.0 m까지 스크린(슬롯크기; 0.7 mm)을 설치하였고, 지표부터 지표하 9.0 m까지 무공관을 설치하였다. PW-2는 냉방시 양수정, 난방시 주입정의 역할을 한다. 제일 하부에 3.0 m의 무공관을 설치하였으며, 그 상부에 슬롯크기 0.7 mm인 스크린 20.0 m와 슬롯크기 0.2 mm인 스크린 20.0 m를 설치하고, 스크린 상부 8.5 m 구간은 무공관을 설치하였다.

ATEs 시스템 성능평가를 위하여 지경부 고시 제 2008-3호⁽¹¹⁾에 따라 ATEs 시스템 성능 분석을 위한 각종 센서를 설치하였다. RTD 센서를 이용하여 지중순환수의 열펌프 유닛 실외열교환기 입·출구 온도를 측정하였으며, RTD의 정확도는 ±0.15°C이

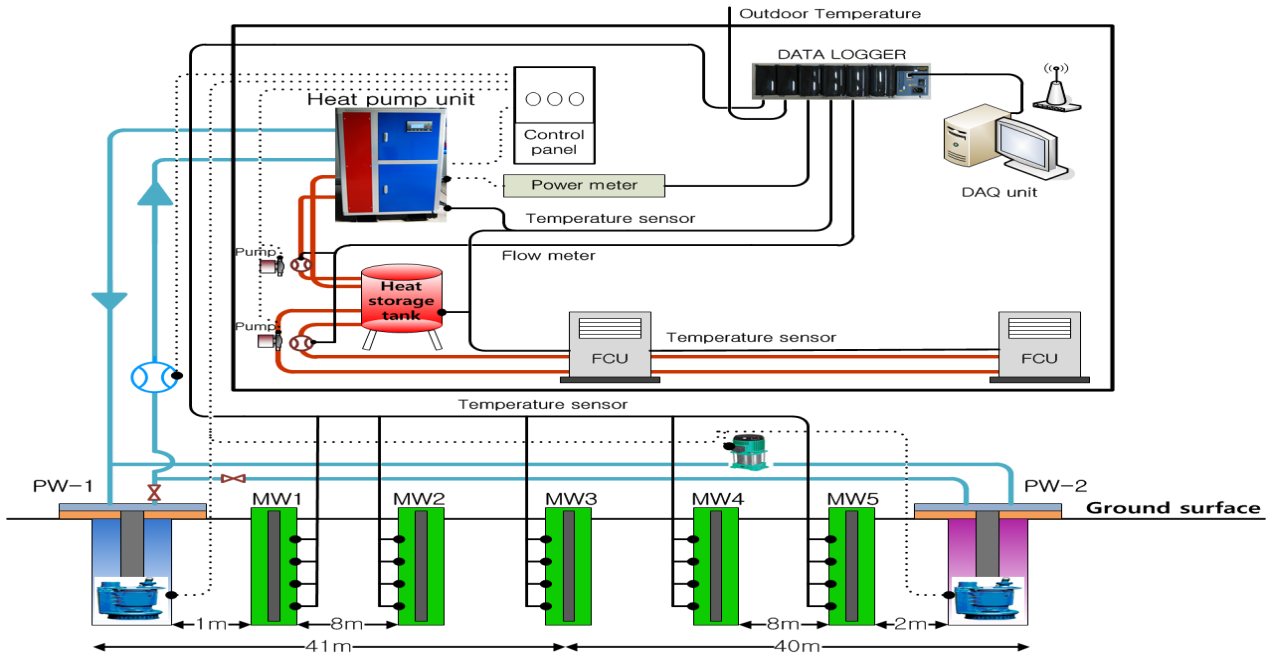


Fig. 1 Schematic diagram of an ATES system.

다. 열펌프 유닛의 소비전력은 적산전력계(WT 230, Yokogawa Co., 정확도 : $\pm 0.2\%$)로 측정하였으며, 순환수의 유량은 마그네틱 체적유량계(KTM-800, Korea flow meter Co., 정확도 : $\pm 0.5\%$)를 설치하여 측정하였다. 지중 온도 변화 모니터링을 위하여 PW-1과 PW-2 사이에 5개의 관측공을 시공하였으며, 관측공에는 T형 열전대(T-Type, Omega Co., 정확도 : $\pm 0.15\%$)를 지중에 매설하였다.

본 연구에서는 열펌프의 실내열교환기를 순환하는 지하수의 입출구 온도와 유량으로 냉방 및 난방 용량을 산정하였으며(식(1)), 열펌프 유닛 COP와 시스템 COP는 각각 식(2)와 식(3)으로 계산하였다. 시스템 COP는 열펌프의 소비전력과 심정펌프의 소비동력을 고려한 ATES 시스템 COP이다. 본 시스템의 냉방 및 난방용량과 COP의 불확실성은 각각 3.1%와 3.3%였으며, ASHRAE⁽¹²⁾에 따라 평가하였다. 본 ATES 시스템 구조 등에 대한 보다 상세한 내용은 관련 참고문헌⁽¹⁰⁾을 참조하도록 한다.

$$Q_{id} = \dot{m} C_p (T_i - T_o) \quad (1)$$

$$COP_{HP} = Q_{id} / W_{HP} \quad (2)$$

$$COP_{sys} = Q_{id} / (W_{HP} + W_{pump}) \quad (3)$$

2.2 ATES 시스템 냉난방 성능

본 연구에서는 ATES 시스템의 경제성 분석을 위

해 ATES 실증 시스템에 대한 데이터 취득 및 분석을 수행하였다. 따라서 경제성 분석 관련 DB로 활용될 수 있는 범위에 국한하여 ATES 시스템의 성능을 간략히 분석하였다.

Fig. 2는 2009년 8월의 주요일자별 ATES 시스템의 냉방운전 가동 기간 중의 일일 평균 냉방용량 및 외기온도를 나타낸다. 일반적으로 외기온도의 변화에 따라 지열원 열펌프 시스템의 성능은 영향을 받지 않지만, 하절기 지속적인 사용에 따라 지중열원의 온도가 점차적으로 증가하게 되어 냉방 성능이 저하된다. 하지만, 본 ATES 시스템은 8월 중 모든 일자에 대하여 시스템 냉방용량이 유사한 값을 나타냈다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 열펌프 유닛 COP와 시스템 COP도 모두 유사한 값을 나타냈다. 이는 냉방시 양수정인 PW-2로부터 대수층 지하수의 온도 변화가 없어서 열펌프 유닛으로 공급되는 대수층 지하수의 EWT(Entering water temperature)가 일정하였기 때문이다. 일자별 냉방용량과 COP가 미소량 차이가 난 것은 일자별로 시스템 가동율 차이에 따른 단속운전 손실 때문으로 분석된다. 8월 하절기 냉방운전 기간 동안의 일일 평균 열펌프 유닛 COP와 시스템 COP는 각각 4.78과 3.49를 나타냈다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 하절기 운전에 따라 주입정(PW-1)에 근접한 지중온도 관측공 MW1의 온도가 일부 상승하였으며, 동절기까지 유지된다면 동절기 성능은 기존의 지열 시스템 보다 유리

한 조건의 지중온도 환경에서 시스템이 운전 될 것으로 예상된다.

Fig. 5는 2010년 3월중의 주요일자별 ATES 시스템의 난방운전 가동기간 중의 일일 평균 난방용량과 외기온도를 나타낸다. 일자별 평균 외기온도가

다르지만 난방용량은 유사한 값을 나타냈다. 즉, 공기열원과 달리 외기온도가 낮은 경우에도 시스템 난방용량 저하가 발생하지 않았다. 일례로 2010년 3월 6일 외기온도가 6.6℃로 3월 10일의 -0.9℃보다 높게 나타났으나, 일일 평균 난방용량은 각각 67.3 kW와 66.9 kW로 유사한 값을 나타냈다. 또한, ATES 시스템은 3월 난방 운전 중에 열펌프 유닛 COP와 시스템 COP 변화도 미소하였다(Fig. 6). 이는 Fig. 7에서 보여지듯이 난방 운전 시 양수정인 PW-1에 인접한 관측공 MW1의 온도변화가 일정하여 PW-1으로부터 열펌프로 공급되는 EWT가 일정하였기 때문이다. 3월 가동 기간 중의 기간 평균 열펌프 유닛 COP와 시스템 COP는 각각 5.3과 3.9로 높게 나타났다.

Fig. 4와 Fig. 7에서 보여지듯이 냉방 및 난방 운전 시 ATES 시스템의 열원은 안정적이었으나, 축열 효과는 크게 나타나지 않았다. 본 ATES 시스템 설치 사이트의 지하수 유동 특성과 지질학적 변수 분석자료에 의한 모델링 결과 축열에 의하여 관측공

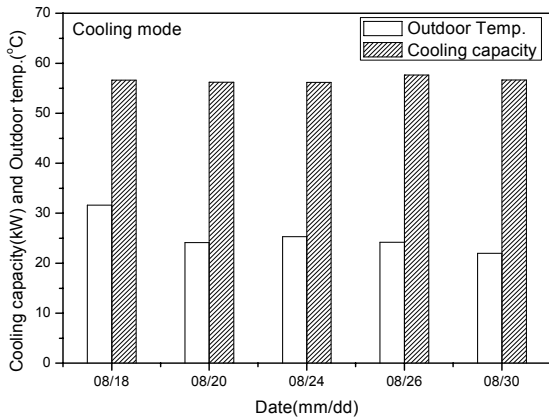


Fig. 2 Variation of cooling capacity.

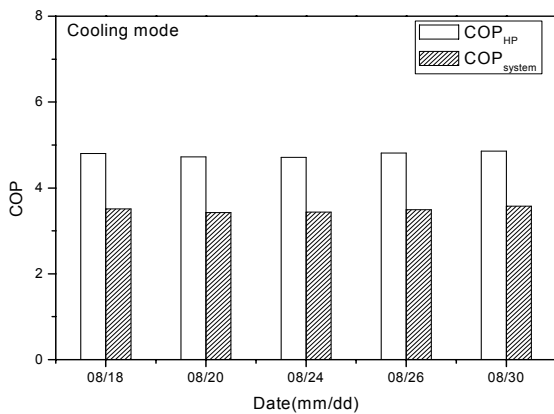


Fig. 3 Variation of COP in the cooling mode.

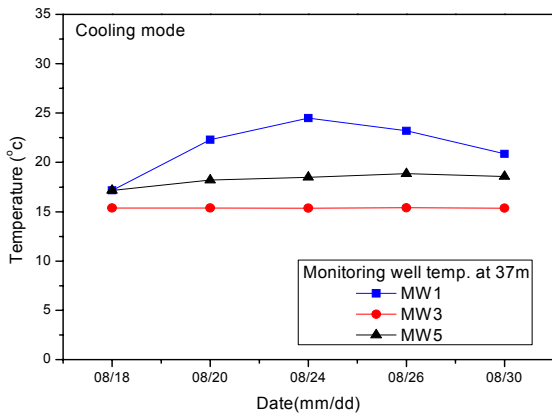


Fig. 4 Variation of monitoring well temperature in the cooling mode.

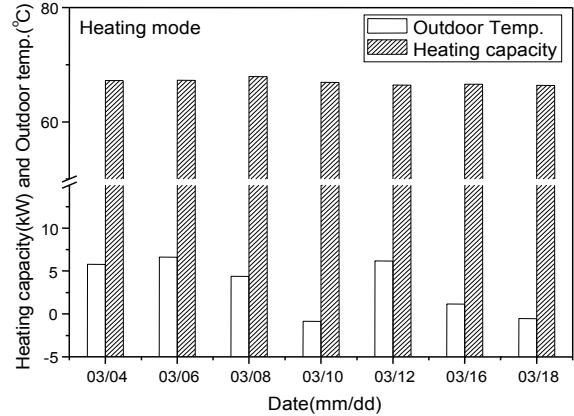


Fig. 5 Variation of heating capacity.

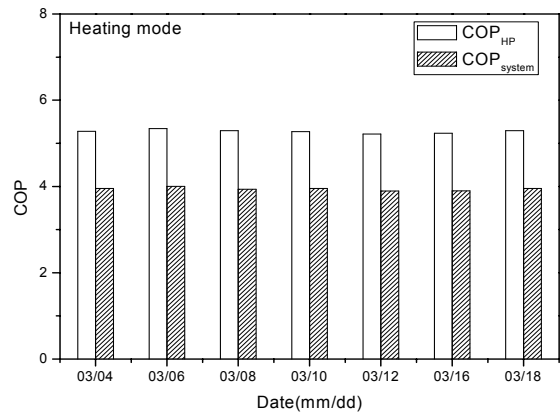


Fig. 6 Variation of COP in the heating mode.

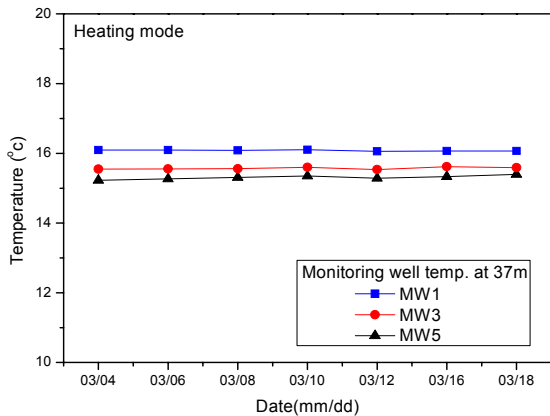


Fig. 7 Variation of monitoring well temperature in the heating mode.

MW1에서의 온도 상승과 MW5에서의 온도 하락은 552일 이후 발생하기 때문이다.⁽¹⁰⁾ 따라서, 본 ATES 시스템의 장기간 사용에 따라 냉난방 용량과 COP는 지속적으로 증가할 것으로 예측된다.

3. ATES 시스템 경제성 분석

ATES 시스템은 외기의 급격한 변화에도 영향을 받지 않고 일정하게 온도가 유지되며, 축열에 의한 사용기간이 증가함에 따라 효율이 증가하는 에너지 절약형 냉난방 시스템이다. 여름과 겨울의 계절적 차이가 확연한 우리나라의 기후조건에서 활용 가능성이 매우 우수한 시스템이라고 할 수 있다.⁽¹⁰⁾ 또한 본 시스템은 연간 유지·관리비용이 적게 들고, 이산화탄소와 같은 온실가스의 배출이 기존 냉·난방 설비에 비해 상대적으로 적은 친환경적인 시스

템이다. 그러나 전체 시스템의 초기 설치비가 기존 냉·난방 설비보다 다소 큰 것이 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 국내에 처음 시공하여 얻은 ATES 시스템의 성능 자료와 시공비용 등을 활용하여 경제성 분석을 수행하였다.

ATES 시스템에 대한 경제성 평가 결과를 기존의 시스템과 비교 분석하기 위하여 난방은 LNG 보일러를 적용하고, 냉방은 공기열원 에어컨을 사용하는 시스템을 선정하였다.

경제성 평가의 방법으로는 생애주기법과 투자회수 기간법을 사용하는데, 생애주기법은 일반적으로 제품의 생산, 사용, 폐기처분의 각 단계에서 발생하는 비용을 합한 총비용을 계산하는 방법이며, 투자회수 기간법은 대안의 투자로 인해 예상되는 편익이 투자된 금액까지 도달하는데 필요한 시간을 구하는 방법이다.⁽¹³⁾ 따라서 본 연구에서는 생애주기법을 통해 각 시스템의 설치 및 운전에 필요한 총 소요비용을 구하고, 이 결과를 바탕으로 투자회수 기간법을 통해 ATES 시스템의 투자회수 기간을 산정하였다.

본 연구에서는 생애주기법을 적용하기 위해서 현재가치법을 사용하였고, 이는 수명주기에 발생하는 모든 투자비용과 절감액을 일정한 시점을 기준으로 등가환산하는 방법을 말한다. 현재가치법에 사용되는 현재가치는 식(4)와 같이 초기비용과 현재가치 계수의 곱으로 나타나는데, 여기서의 현재가치 계수는 식(5)의 임의의 이자율로 일정기간 동안 정기적인 할부금액이 적립될 때의 현재금액을 구하기 위해 사용하는 계수를 의미한다.⁽¹³⁾

$$PV = A_0 \cdot PWAF \tag{4}$$

Table 1 Initial charges for energy

Electricity	Classification	Base rate(won/kW)	Cost(Won/kWh)		
			Summer	Spring/Fall	Winter
	High volt, A choice 2	5,280	93.5	62.3	69.5
LNG	Classification	Caloric value(kcal/Nm ³)		Cost(won/Nm ³)	
	Charge(Heating)	10,500		764.49	

Table 2 Initial cost of the system

ATES system (Won)	Well	Screen	Piping	Heat pump	Pump	Total
	26,000,000	6,400,000	5,000,000	35,000,000	4,000,000	76,400,000
Conventional system (Won)	LNG Boiler(heating)			Air-conditioner(cooling)		Total
	3,320,000			9,920,000		13,240,000

$$PWAF = \frac{(1 + DR)^n - 1}{DR(1 + DR)^n} \quad (5)$$

Table 1은 경제성 평가에 사용되는 계절별 전기요금과 LNG 가스요금을 나타내며, 각각 (주)한국전력공사와 (주)한국가스공사의 2011년 고시요금을 참조하였다.

본 연구에서는 경제성 평가를 위하여, ATES 시스템 실증 시스템 설치용량인 20 RT를 대상 건물로 가정하였고, 이에 대해 초기투자비를 선정하였다. 초기투자비는 크게 공사비와 냉난방 설비 구입비로 구성되어 있으며, 기존 시스템에 대해서는 (사)한국물가정보(KPI)의 고시 데이터를 사용하였다. ATES 시스템은 국내 시공 사례가 전무하여 본 연구의 사이트 설치 및 구축에 투입된 비용으로 산정하였다. 이때, 연구용 데이터 취득 등을 위한 전력계 및 DAQ 시스템과 센서들의 비용은 제외하였다.

시스템의 상세 초기투자비는 Table 2에 나타내었으며, 각 시스템의 성능 데이터와 전기요금, LNG 가스요금을 바탕으로 일일 8시간 사용기준으로 계절별 전력요금을 고려하여 초기 연간 운전 비용을 Table 3과 같이 산정하였다. 이때, 냉난방 기간은 각각 3개월과 5개월로 선정하였으며 부하율 80%를 사용하였다. 운전비용은 물가상승율과 할인율 등을 감안하여 생애운전비용 산정 시에 계산하였다. LNG 가스의 연료비가 높기 때문에 난방의 경우에 ATES 시스템의 운전비용이 매우 크게 절감되었으며, 냉방의 경우에도 공기열원 에어컨보다 ATES 시스템의 열원측 온도 조건이 양호하여 운전비용이 절약되었다. ATES 시스템 적용 시 냉방비용과 난방비용은 각각 22.6%와 83.8% 절감되었다.

각 시스템에 대한 생애주기 비용을 환산하기 위하여 에어컨과 보일러의 가용연수는 각각 10년과 7년으로 선정하였고, ATES 시스템의 가용연수를 20년으로 설정하였다. 따라서, 본 연구에서는 20년을 생애주기로 선정하였으며, 초기투자비 산정시에는 에어컨과 보일러의 교체비용을 함께 고려한 것이다. 유지보수 비용은 초기투자비용의 2.5%로 가정하였다. 할인율은 은행 예금이자율 기준으로 5%로 설정하였다. 전기와 LNG의 요금 상승률은 (사)한국물가정보를 바탕으로 각각 3%와 9%로 선정하였고, 이러한 경제성 평가의 기존 요소를 Table 4에 정리하였다. 이러한 조건에서 생애주기법을 이용한 경제성 평가 결과를 세부항목별로 Table 5에 나타

내었다. ATES 시스템의 경우 생애운전비용이 초기투자비용보다 적게 나타났으며, LNG 보일러와 공기열원 에어컨 시스템은 생애운전비용이 초기투자비에 비하여 높게 나타났다. 기존 시스템의 경우는 ATES 시스템에 비하여 초기투자비용은 적지만, 전기 및 가스요금 등을 포함한 생애운전비용이 매우 큰 비중을 차지하고 있다.

생애주기법을 통하여 기존 시스템에 대한 ATES 시스템의 효용가치가 검증되었지만, 초기투자비를 회수하는 기간이 합리적이지 않다면 경제적인 이득이 없다. 이를 분석하기 위해 본 연구에서는 추가적으로 투자회수기간법을 이용한 경제성 평가를 통해 ATES 시스템을 설치하기 위해 투자된 금액을 회수할 수 있는 기간을 산정하였다. 일반적으로 사용되는 기존의 장치를 대신하여 새로운 대안이 되는 장치를 설치하는 경우의 투자회수기간은 식(6)과 같

Table 3 Initial operation cost

System	Mode	Operation cost (won/year)
ATES system	Cooling	1,415,791
	Heating	1,222,123
Conventional system	Cooling	1,830,040
	Heating	7,559,039

Table 4 Data for LCC analysis

Items	ATES system	Conventional System
Useful life(year)	20	7 : boiler 10 : aircon
Discount rate(%)	5	5
Escalation of energy rate(%)	3 (Electricity)	9 (LNG)

Table 5 Results of LCC analysis

System	Items	Cost	
ATES system	Life initial cost(won)	76,430,000	
	Life operation cost(won)	Cooling	28,315,811
		Heating	24,442,459
Conventional System	Life initial cost(won)	30,296,000	
	Life operation cost(won)	Cooling	36,600,808
		Heating	151,180,784

이 계산하였다.⁽¹³⁾

$$PP = \frac{IC_{alter} - IC_{conv}}{OP_{conv} - OP_{alter}} \quad (6)$$

본 연구의 ATES 시스템 실증 성능 결과와 생애 주기 비용을 적용한 결과 ATES 시스템에 대하여 공기열원 에어컨과 LNG 보일러 적용한 기존 시스템에 대한 투자회수 기간은 6.62년으로 나타났다.

본 ATES 시스템은 최초 국내에 적용된 시스템으로 이에 대한 시공이 처음 이루어진 것이므로 향후에는 천공비와 스크린 설치 등의 고가의 비용이 소요된 부분에 대해서 비용 절감이 가능할 것으로 예상되며, 대용량화가 가능한 시스템으로 이 경우 부속 장비들의 설치비용 감소가 가능하다. 또한, 지속적인 운전에 따라 축열효과에 의하여 시스템의 효율이 향상될 것이므로 투자 회수 기간 등은 더욱 감소될 수 있을 것으로 예상된다.

6. 결 론

본 연구에서는 국내 최초로 ATES 시스템에 대한 실증 시스템을 구축하여 하절기와 동절기의 단기 성능을 분석하고, 이를 기반으로 기존의 냉난방 시스템인 LNG 보일러와 에어컨과의 경제성을 비교 분석하여 다음의 결론을 얻었다.

ATES 시스템은 하절기와 동절기에 열원의 안정성으로 인하여 지속적인 사용에도 불구하고, 냉난방 용량 및 COP가 높게 나타났으며, 기간 사용에 따른 성능 변화가 거의 없었다.

ATES 시스템은 냉방의 경우 공기열원 에어컨에 비하여 운전비가 22.6% 절감되었으며, LNG 보일러와 비교하여 난방 운전비는 83.8% 절감되었다.

기존에 널리 보급되고 있는 냉난방 시스템과 비교하여 생애주기비용 분석 방법에 따른 ATES 시스템의 투자회수기간은 6.62년으로 나타났다. 하지만, 본 연구의 ATES 시스템은 국내 최초로 연구목적으로 시공됨에 따라 고가의 스크린 등이 채용되었으며, 시스템의 대용량화에 따라 부속장비 등의 단가 절감과 시공비 저감이 가능할 것이므로 투자회수기간은 더욱 감소가 가능할 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업 연구개발

의 연구비지원(No. 11기술혁신C05)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Lund, J., Sanner, B., Rybach, L., Curtis R., and Hellstrom, G., 2003, Ground-Source Heat Pumps-A World Overview, Renewable Energy World, pp. 218-227.
2. 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.
3. Ozgener, L., Hepbasli, A., and Dincer, I., 2007, A key review on performance improvement aspects of geothermal district heating systems and applications, Renew Sustainable Energy Rev., Vol. 11, pp. 1675-1697.
4. Laloui, L., Nuth, M., and Vulliet, L., 2006, Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile, Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 30, pp. 763-781.
5. Hamada, Y., Saitoh, H., Nakamura, M., Kubota, H., and Ochifuji, K., 2007, Field performance of an energy pile system for space heating, Energy and Buildings, Vol. 39, pp. 517-524.
6. Tarnawski, V. R., Leong, W. H., Momose, T., and Hamada, Y., 2009, Analysis of ground source heat pumps with horizontal ground heat exchangers for northern Japan, Renewable Energy, Vol. 34, pp. 127-134.
7. Hamada, Y., Saitoh, H., Nakamura, M., Kubota, H., and Ochifuji, K., 2007, Field performance of an energy pile system for space heating, Energy and Buildings, Vol. 39, pp. 517-524.
8. Yu, H. K., 2008, Development and performance evaluation of ground heat exchanger utilizing PHC pile foundation of building, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 5, pp. 56-64.
9. Paksoy, H. O., Gürbüz, Z., Turgut, B., Dikici, D., and Evliya, H., 2004, Aquifer thermal storage(ATES) for air-conditioning of a super-market in Turkey, Renewable Energy, Vol.

- 29, pp. 1991-1996.
10. NexGeo, 2010, Aquifer thermal energy storage heating and cooling systems development, Final Report of Ministry of Knowledge Economy, 2007-N-GE02-P-01.
 11. Ministry of Knowledge Economy, 2008, Standards of support, installation, and management for new and renewable energy system, Ministry of Knowledge Economy Announcement 2008-3.
 12. ASHRAE, 1986, Engineering analysis of experimental data, ASHREAE Guideline2, Atlanta U. S. A.
 13. Park, C., 2010, Economic analysis of a ground source heat pump, Journal of KSMT, Vol. 12, No. 4, pp. 93-99.