

공조시스템용 지열히트펌프의 실증평가에 관한 연구

박윤철† · 박성구*

(원고접수일 : 2007년 10월 12일, 심사완료일 : 2007년 12월 13일)

In-situ Performance Evaluation of a Ground Source Heat Pump for an Air Conditioning System

Youn-Cheol Park† · Seong-Koo Park*

Abstract : In this study, the ground source heat pump was installed at a research center in Jeju Island to verify the performance of the system and to give an information for a economic feasibility. The performance test was conducted until the heat storage tank temperature reached at 5°C from 50°C in the cooling operation, and until the storage temperature goes up to 50°C from 10°C in the heating mode.

As results, the system performance shows that 2.2~3.5 for the cooling operation and 2.5~3.5 for heating operation. It is found that the underground is good heat source for the heat pump with 3~10°C variation range. The ground source heat pump could be connected one of air conditioning system without any problem in system performance. Based on the economic analysis, the initial cost for the ground source heat pump will be compensated after 4 years operation. If the system runs 20 years, approximately 300 million Won will be saved when the air conditioning system adapt the ground source heat pump based on Life Cycle Cost analysis.

Key words : Ground source heat pump(지열히트펌프), Geothermal heat exchanger(지중열교환기), EER(에너지효율비), Life cycle cost(LCC, 생애주기비용), Payback period(투자회수기간)

1. 서 론

21C에 들어서 이라크전쟁과 같이 에너지가 국가 안보와 연관되고 에너지사용에 따른 환경오염으로 인한 지구 온난화가 가속화되고 있어 대체에너지 개발이 시급한 과제로 대두되고 있다. 제주도는 청

정 환경을 가진 지역으로써, 환경 인프라를 계속적으로 유지함과 동시에 에너지의 안정적인 공급을 통하여 지역 사회의 개발 및 발전을 기여하여야 하는 시점에 있다.

지열히트펌프(GSHP, Ground source heat pump or GHP, Geothermal heat pump)는

† 교신저자(제주대학교 기계에너지시스템공학부), E-mail: ycpark@cheju.ac.kr, Tel: 064)754-3626

* (주)지오테크

일반적인 가정용 공기조화기와 같은 장치이나 열원이 공기가 아닌 지중의 열을 이용하는 차이점이 있다. 일반적으로 지하 1m이하는 연중 일정한 온도를 유지하는 것으로 알려져 있어 안정적인 열원으로 평가받고 있다^[1]. 최근에는 공공건물의 신재생에너지 의무화 규제^[2]에 따라서 많은 공공건물들이 지열히트펌프를 설치하고 있으며, 관련연구도 활발히 진행되고 있다^{[3],[4]}.

제주지역은 거의 제주도 전역이 화산지역으로써 지질구조가 육지와 크게 다른 특징을 가지고 있다. 특히 암반층이 나타날 경우에는 용암이 굳어서 이루어진 아주 단단한 Luber층이 있을 수 있거나 화산재로 이루어져 토양에 공극이 매우 많은 송이층 발견되기도 한다. 따라서 제주는 토양으로부터의 열전달이 특이한 특징^[5]을 나타내는 바 지열이용 열펌프를 설치할 경우에 이에 대한 기초 연구가 수행되어야 할 것이다.

본 연구에서는 대체 에너지개발과 환경오염 방지 및 예방을 위한 에너지 정책의 일환으로 현재 대체 에너지원으로 각광 받고 있는 지열히트펌프에 대하여 제주도지형에 설치한 경우에 대한 기초 성능평가를 수행하고 이를 통하여 지열히트펌프의 도입에 대한 경제성을 분석하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치의 구성

본 연구는 제주시 아라동에 위치한 제주 생물자원산업화센터의 항온실에 하이브리드 지열히트펌프를 설치하고 시스템의 성능을 현장에서 측정한 것이다. Fig. 1은 지열히트펌프가 설치된 건물공조시스템의 개략도로서 냉동기와 증기보일러가 지열히트펌프와 연계되어 구동하도록 구성하였다.

건물공조시스템의 운전은 냉방의 경우에는 지열히트펌프가 기본부하를 담당하고 부하가 커질 경우에는 공랭식 냉동기가 작동되어 부족한 용량을 보완하는 시스템이다. 난방의 경우에는 지열히트펌프와 더불어 증기보일러를 작동시켜 안정적인 난방열을 항온실에 공급 할 수 있도록 제어 하였다.

제주도의 현장시추를 통한 지반조사 자료에 의하

면 지중열교환기를 설치하기 위한 천공공법이 내륙에서 적용하고 있는 공법을 적용할 수 없다는 것을 알 수 있다. 내륙에서 수직형 지열시스템의 일반적인 천공방법으로 드릴비트(Drill bit)를 회전시키면서 그 내부로 압축공기와 물을 불어내어 파쇄된 암반가루를 분출시키는 Air rotary drilling 방식이 적용되고 있다. 하지만 제주도는 화산지형에 따른 다공성 암반특성에 의해 압축공기가 암반층으로 소멸되어 파쇄된 암반가루가 지상으로 배출되지 못하기 때문에 드릴비트를 통한 파쇄 및 절삭작업을 수행할 수 없다^[6]. 따라서 본 연구에서 지열히트펌프의 지열열교환기를 설치하기위한 천공작업은 시간이 많이 소요되지만 암반을 코어비트(Core bit)로 절삭하여 코어형태의 암반을 지면으로 회수하는 천공방법을 사용하였다.

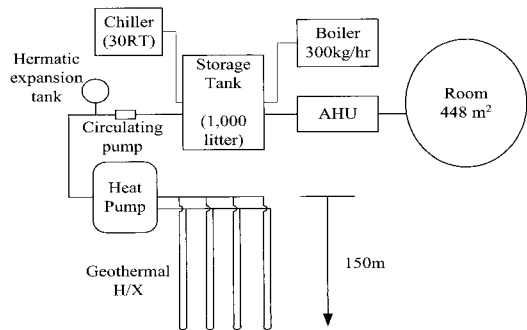


Fig. 1 Schematic of hybrid ground source heat pump system

본 연구를 통하여 설치된 지열히트펌프의 용량은 10 RT이다. 또한 건물공조시스템의 증기보일러는 300 kg/hr이고, 냉동기는 30 RT의 스크류압축기를 장착한 것이다.

지열히트펌프는 2개의 판형 열교환기, 냉매 흐름을 조정하기 위한 4way 밸브 및 팽창밸브 등으로 구성 되어 있고 냉매는 R-22를 사용 하였다. 지중 열교환기는 재질이 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)인 수직형 지열열교환기이며, 직경이 31.75 mm이고 형상은 Single U-Tube 이다^[7]. Table 1은 지중 열물설치와 지중열교환기의 사양을 나타내고 있다. 이러한 기본요소부품 이외에도 지중열교환기의 작동유체의 순환을 위한 순환펌프와 열펌프에서 건물

공조시스템의 부하(공조기의 AHU)로 열매체를 공급하는 순환펌프를 부가적 설치하였다.

2.2 실험방법

본 연구에서 지열히트펌프가 설치된 건물에 지열 히트펌프만을 가동하여 난방을 위한 축열운전을 수행함으로써 순수 지열히트펌프의 성능을 측정하고, 또한 공조기를 지열히트펌프와 연동시켜 가동하여 냉방운전 시 전체 부하에 대하여 지열히트펌프와 냉동기의 운전 분담율에 대한 분석을 하였다.

본 연구에서는 열전대를 사용하여 열교환기와 지열히트펌프 각 요소기기의 온도를 측정하였으며, 초음파 유량계로 축열조에 흐르는 유체의 유량을 측정하였고, 전력량 측정기(Power meter) 이용하여 지열히트펌프의 압축기 소비전력 및 전체 시스템의 소비전력을 측정하였다.

측정시간은 난방운전의 경우에는 축열조의 유체 온도가 10℃에서 50℃까지 상승할 때까지, 냉방운전의 경우에는 50℃에서 5℃까지 감소할 때까지 운전을 지속하였고, 모든 자료는 데이터 획득 장치를 이용하여 5초 간격으로 저장하였다.

지열시스템의 성능은 성능계수(COP, Coefficient of performance) 또는 에너지 효율비(EER, Energy efficiency ratio)로 나타낸다. 냉방(또는 난방) 사이클로 작동하는 지열시스템의 냉방 및 난방용량은 다음의 (1)로부터 계산할 수 있다.

$$Q = \dot{m}_w c_{pw} \Delta T \tag{1}$$

여기서, \dot{m}_w 는 히트펌프 부하측을 순환하는 물의 질량유량, c_{pw} 는 물의 정압비열, ΔT 는 열교환기의 입·출구 온도차이다.

지열히트펌프의 소비전력은 (2)와 같다.

$$W = \frac{IV \cos \phi}{1000} \sqrt{3} \tag{2}$$

여기서, V 는 전압, I 는 전류 및 ϕ 는 역률 (Power Factor)이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 지열히트펌프의 성능

Fig. 2는 지열히트펌프의 시간의 변화에 따른 냉방용량의 변화를 나타내고 있다. 지열히트펌프는 기동초기에 최대성능을 나타낸 후 운전이 지속됨에 따라서 냉방용량이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 냉방용량의 감소는 지열히트펌프의 고압과 저압의 차이가 커지면서 시스템을 순환하는 냉매의 순환유량의 감소에 따른 결과이다.

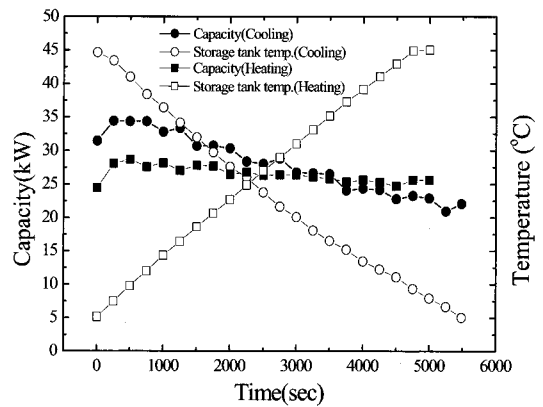


Fig. 2 Capacity and storage tank temperature variation with time

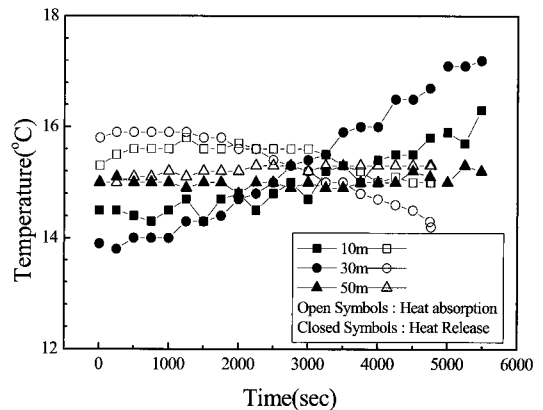


Fig. 3 Underground temperature variation with time

또한 Fig. 2에서 난방용량의 변화를 살펴보면 난방용량은 냉방용량과 마찬가지로 운전 시작 후 약 90분경과한 후에 축열조의 온도가 어느 정도 상

승하고 이후 지속적으로 고온의 물을 축열조에 저장함에 따라 열전달량이 감소함으로써 난방용량이 약간씩 계속 감소하고 있는 경향을 보여 주고 있다.

Fig. 3은 지열열교환기가 매설된 지하의 온도변화를 나타내고 있다. 지열히트펌프에 있어서 냉방운전시 지열열교환기는 온열을 버리는 열수요처 역할을 한다. 지열히트펌프가 냉방운전을 시작하면 축열조의 온도가 떨어지게 되나 응축기 역할의 지중열교환기는 열을 지중으로 방출하여 지하의 온도는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 30m의 깊이에서 약 3°C증가하게 된다. 이로부터 지중열교환기를 순환하는 유체의 온도는 상승하지만 지중의 온도변화는 3°C정도로 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 따라서 지중열교환기에서의 열전달량은 축열조의 온도와 상관없이 거의 일정하다는 것을 알 수 있다. 반면에 축열조의 온도는 운전을 시작한 초기 온도 50°C에서 냉방을 수행하여 축열조온도가 5°C가 될 때까지 운전하였기 때문에 온도차는 약 45°C에 달한다. 결국 열펌프의 사이클 측면에서 살펴보면 고압과 저압의 간격이 벌어져 압축기의 소비전력이 증가하는 것을 알 수 있다.

난방운전에서 있어서는 지중을 열원으로 이용하기 때문에 지중열교환기는 증발기의 역할을 수행하게 된다. 난방운전도 지중온도는 일정한 온도를 계속 유지하고 있기 때문에 지중열교환기의 순환유체온도는 약 10°C정도만 강하하였으나 축열조의 온도는 10°C에서 50°C로 40°C 정도로 상승한다. 이로 인하여 냉동 사이클에서 응축압력과 증발압력차가 증가하여 냉매의 순환유량은 감소하고 지열히트펌프의 소비전력은 증가하게 된다.

냉방의 경우가 난방의 경우보다 지중온도의 변화가 큰 것은 지열히트펌프의 특성에 따른 것으로서 지열히트펌프가 냉방운전을 할 경우에 전술한 바와 같이 지중열교환기는 히트펌프의 응축기 역할을 수행한다. 일반적으로 응축기의 용량은 증발기의 용량에 압축기에 소비전력을 더한 값이므로 지중열교환기가 증발기 역할을 할 경우보다 응축기 역할을 할 경우가 열전달량이 크기 때문이다.

Fig. 4는 이때의 소비전력의 변화와 냉방 혹은

난방용량을 기준의 계산된 지열히트펌프의 효율인 EER을 나타내고 있다. Fig. 4는 냉방운전시 지열히트펌프의 압축기에 소비되는 전력을 기준으로 계산된 EER과 지중열교환기를 순환하는 작동유체의 순환펌프에 소비된 전력을 포함하는 전체시스템의 EER을 보여주고 있다. 두 가지 경우의 EER차이는 절대 값의 차이만 있으며 경향은 같다. 난방운전 뿐만 아니라 냉방운전의 경우에도 EER은 시간이 지남에 따라 지속적으로 감소한다. 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 지중열교환기로의 열전달량은 거의 일정하나 시간이 경과함에 따라 축열조의 축냉 혹은 축열로 인해 열전달량이 계속적으로 감소하고 열펌프 시스템에 소비되는 에너지는 계속적으로 증가하기 때문이다. EER의 감소경향은 시스템이 저온에서 정상상태를 유지하여 더 이상의 압축기의 소비전력이 증가가 없다면 감소폭이 줄어들게 된다.

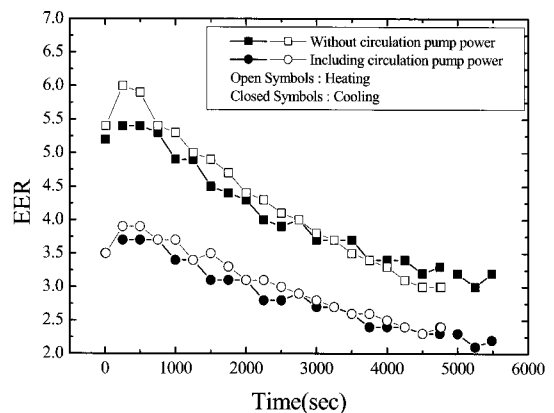


Fig. 4 Efficiency variation with time in heating and cooling operation

3.2 건물공조시스템의 운전특성

지열히트펌프가 설치된 건물냉난방용 공기조화 시스템에 있어서 냉방운전 중에 냉동기와 지열히트펌프의 운전분담율을 살펴보기 위하여 두 냉방장치가 모두 운전될 수 있도록 시스템을 제어하였다. 실내온도를 24°C로 유지하기 위하여 냉동기와 지열히트펌프의 운전상태를 모니터링 한 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5는 건물공조시스템의 전력 소비량으로써 냉동기는 평균 6.8 kW의 전력을 소

비한 반면에 전체 운전기간 중 34%시간동안 작동하였고, 지열히트펌프는 평균 9.4 kW의 전력을 소비하면서 전체 건물공조시스템의 운전시간동안 계속 100%로 가동되었다. 이것은 부하에 대응하여 본 연구의 건물공조시스템이 작동하는 형태를 살펴볼 수 있는 자료로써 경제성 분석의 기초자료로 활용하였다. 건물공조시스템의 운전특성을 검토하면 전체 공조부하를 지열히트펌프가 주로 담당하고 건물의 공조부하가 지열히트펌프 용량을 초과하는 경우에는 공랭식냉동기가 작동한다는 것을 알 수 있다.

3.3 경제성분석

본 연구에서는 지열히트펌프를 실제건물에 직접 설치하고 이를 건물공조시스템에 연결하여 건물의 냉방 및 난방운전을 수행하여 지열히트펌프의 경제성 분석하였다. 경제성분석은 투자회수법에 의한 경제성 분석과 생애주기비용법(LCC, Life cycle cost)에 의한 경제성 분석의 두 가지 방법을 사용하였다.

투자회수법을 이용한 경제성분석은 초기설치비 또는 투자비에 대한 연간에너지절약비용의 비를 투자회수기간으로 산정하는 것으로써 본 연구의 전

체공조시스템 설치비는 6천5백만원이며, 이 중에서 냉동기와 보일러의 가격 2천5백만원을 공제하면 4천만원의 초기투자비가 소요된다.

초기 투자비는 분석 시점의 시공비용을 기준으로 산출하였다. 운전비에 있어서는 냉동기와 보일러를 운전하였을 경우에 소요되는 운전비에서 지열히트펌프를 건물공조시스템에 추가하여 하이브리드로 운전하였을 때의 운전비를 차감하면 약 천만원의 운전비 절감을 얻을 수 있다.

이로부터 투자비 회수기간을 식(3)으로부터 계산하면 약 4년 정도가 되며 이로부터 지열히트펌프를 설치하여 운전한 후 4년이 경과하면 초기에 투자한 투자비를 회수할 수 있다는 것을 알 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{Payback period} &= \frac{\text{Initial cost}}{\text{Energy saving per year}} \\
 &= \frac{65,000,000 - 25,000,000}{9,875,041} \quad (3) \\
 &\approx 4 \text{ year}
 \end{aligned}$$

본 연구의 투자비회수기간의 산정에 필요한 에너지의 가격 및 기타 자세한 세부 사항은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Reference data for the payback period calculation

Categories		Heating	Cooling	Sum (for a year)	System operation cost (for a year)		Difference
					Cost(won)	%	
Boiler & Chiller	Consumption power	82,080	—	82,080	24,324,096	100.0	▽9,875,041
	Consumption oil(L)	—	18,480	18,480			
Hybrid ground source heat pump	Consumption power	54,994	6,600	61,594	14,449,055	89.4	
	Consumption oil(L)	—	10,105	10,105			
※ References 1. Calorie of diesel : 7,800kcal/L 2. Cost of diesel : ₩1,000/L 3. Electric power cost : ₩ 91.6/kWh(July, August), ₩ 61.0/kWh(April~June, September), ₩ 64.9/kWh(October~March) 4. Annual cooling operation time : 4,4320 hours 5. Annual heating operation time : 2,4000 hours 6. Energy consumption of the system - Chiller : 19kW - Hybrid ground source heat pump : 9kW(cooling), 11kW (heating) - Boiler fuel consumption : 7.7L/hr 7. Initial cost - System : ₩ 65,000,000 - Chiller & boiler : ₩ 25,000,000							

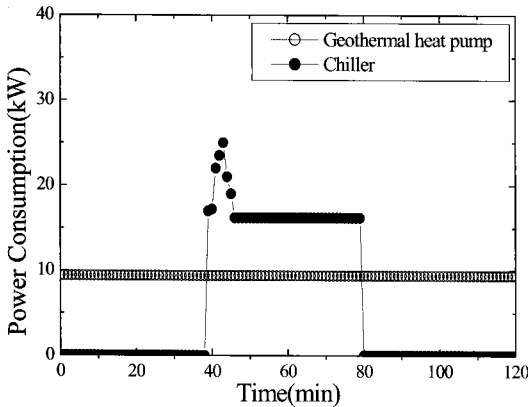


Fig. 5 Power consumption with time in a chiller and a ground source heat pump

또 다른 경제성 분석방법으로 생애주기비용법을 통한 분석은 초기 투자비, 이자율, 에너지비용 상승률, 유지관리비 및 기타 제반 비용 등을 종합적으로 고려하는 것으로 투자회수법에 비하여 좀더 복잡하나, 보다 현실적인 방법으로 평가되고 있다. 본 연구에서 검토한 LCC해석법에서 유지 관리비는 수리비, 점검비 외에 기기폐기 비용을 포함하였으며, 관리비는 초기투자비에 5%로 가정하고, 유지 관리비는 1.5%로 가정하였다. 기기수명은 운전 기간 동안 고장 없이 사용한 후 설비기기를 전량 교체하는 것으로 가정하였다. 에너지 비용 산출은 투자회수법과 마찬가지로 Table 2의 에너지 단가를 적용하였다.

Table 2 Unit energy price variation with season

Categories	Price
Electricity (Normal)	91.6 ₩/kW [July, August]
	61.0 ₩/kW [April~June, September]
	64.9 ₩/kW [October~March]
Light oil	1.000 ₩/L

LCC분석을 위해서는 여러 가지 가격 변동 요소에 대한 고려가 필요하다. 이에 대해 구체적인 자료는 통계청의 경제동향을 근거로 현가환산율은 8%, 물가상승률은 5%, 에너지 변동 가격변동률은 전기인 경우 3%, 경유의 가격상승률은 9%를 적용하였다. 건물공조시스템은 부 20년간 운전되는 것

으로 가정하였다.

LCC해석은 상용프로그램인 BLCC 4.9를 사용하여 계산한 결과는 Table 3과 같다. 하이브리드 지열히트펌프시스템은 냉동기와 보일러를 이용한 건물공조시스템에 대한 경제적 이득은 20년간 약 2억 8천만원 정도에 달하는 것으로 나타났다.

Table 3 Calculation sheet for life cycle cost

[unit : 1,000Won]

Categories	Hybrid GHP	Chiller+Boiler
Initial costs	65,000	25,000
Energy costs	616,841	929,782
Operating & maintenance cost	26,227	33,882
LCC	707,251	988,541

4. 결 론

본 연구에는 지열히트펌프를 이용한 건물공조시스템의 성능을 현장실험을 통해 측정하고 이를 통하여 지열히트펌프의 설치를 위한 경제성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

지열히트펌프가 설치된 지역의 지중온도는 냉난방 부하가 지중열교환기를 통하여 지중으로 전달되어도 온도변화가 거의 3-10℃ 정도로 변화가 미미하다는 것을 알 수 있으며, 이로부터 지중은 열펌프의 열원으로 적합하다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서 제주도의 화산지형에 설치된 지열히트펌프는 냉방 EER는 2.2-3.5이고 난방 EER은 2.5-3.5 정도로 비교적 우수한 성능을 보이고 있다. 펌프동력을 배제한 순수한 히트펌프인 경우에는 냉방시 EER은 약 5.8-3.0으로 나타났고 난방 운전시에는 6.2-3.0으로 타나났다.

제주도에 위치한 연구용 건물에 설치한 지열히트펌프를 기존의 건물공조시스템에 연결할 경우에 기존의 냉동기와 보일러로 구성된 건물공조시스템의 운전에는 큰 영향을 미치지 않는다. 이때 지열히트펌프의 초기투자비는 약 4년간의 운전을 통하여 회수할 수 있으며, 생애주기법(LCC)을 이용한 분석에서는 약 20년간 운전 시 2억 8천만원정도의 이득을 볼 수 있다.

본 연구를 통하여 알 수 있는 것은 지열히트펌프가 제주지역에 널리 보급되기 위해서는 지중열교환기 설치를 위한 천공작업의 수월성의 확보되어야 할 것이며, 제주지역에 적합하고 적은 투자비로 설치가 가능한 방안 등이 강구되어야 할 것이다. 또한 한 걸음 더 나아가 지하수 오염방지 등 친 환경적인 시공 방법 개발이 절실히 요구 된다.

참고문헌

- [1] 신현준, 안철홍, 조정식, “지열에너지의 유효이용 방안,” 공기조화 냉동공학회 1995 하계학술 발표 논문집, pp. 404-409, 1995.
- [2] 신에너지 및 재생에너지 개발이용보급 촉진법, 제 12조(신재생에너지사업에의 투자권고 및 신재생에너지 이용의 의무화등), 2006.
- [3] 고건혁, 김지영, 이의준, 노관중, 현명택, “지열원 열펌프 시스템의 초기 커미셔닝 및 성능 측정에 관한연구,” 대한설비공학회 2007년 하계 학술발표대회 논문집, pp. 239-244, 2007.
- [4] 이의준, “지열원 열펌프 시스템 기술 연구 현황 및 현안,” 대한설비공학회 2006 하계학술발표대회 논문집, pp. 1238-1243, 2006.
- [5] 박홍남, 김태우, 이상규, 박인식, 오상훈, “제주의 저온 지열 유량 연구,” 한국자원공학학회지 Vol. 32, pp. 1-12, 1995.
- [6] 양성기, “제주도 지하수의 오염저감 기술에 관한 연구,” 제주지역환경기술개발센터 보고서, 2002.
- [7] 손병호, 조정식, 신현준, 안형준, “수직 U자 관 지중 열교환기의 열교환 성능,” 대한설비공학회 2004 추계학술대회 논문집, pp. 1323-1328, 2004.

저 자 소 개



박윤철(朴閔鐵)

1966년 12월생. 1990년 고려대학교 기계공학과 졸업(학사), 1992년 고려대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1997년 고려대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 1997년-1998년 University of Illinois at Urbana-Champaign Post Doc., 1999년-2000년 한국과학기술연구원, 2000년-2002년 삼성전자, 2002년-현재 제주대학교 기계에너지시스템공학부



박성구(朴性九)

1962년 7월생. 1985년 인하대학교 기계공학과 졸업(학사), 1987년 KAIST 기계공학과 졸업(석사), 1987년-1995년 대우전자(주), 1996년-2001년 (주)홍창, 2002년-현재 (주)지오테크 대표이사