

최근 다양한 지열 열펌프 적용 기술 사례

조 홍 현

조선대학교 기계공학과 교수

1. 서언

1.1 지열 열펌프 시스템 개요

지열 열펌프 시스템은 크게 지중열교환기(ground heat exchanger 또는 borehole heat exchanger)와 열펌프(heat pump)로 구성된 냉·난방 겸용 시스템이다. 즉, 냉방시에는 건물 내의 열을 지중으로 방출하고, 난방과 급탕 시에는 지중의 열을 실내와 온수에 공급함으로써 하나의 시스템으로 공간 냉난방과 온수·급탕을 동시에 구현할 수 있다. 냉방과 난방 운전시 각각 냉열원(heat sink)과 온열원(heat source)의 역할을 하는 지중 온도는 연중 안정적이고 우수한 열원을 가지기 때문에 지열 열펌프 시스템은 높은 효율과 높은 성능을 갖는다. 따라서 기존 냉·난방 설비나 공기열원 열펌프 시스템과 비교했을 때, 효율이 높고 성능이 우수한 시스템으로 알려져 있다.

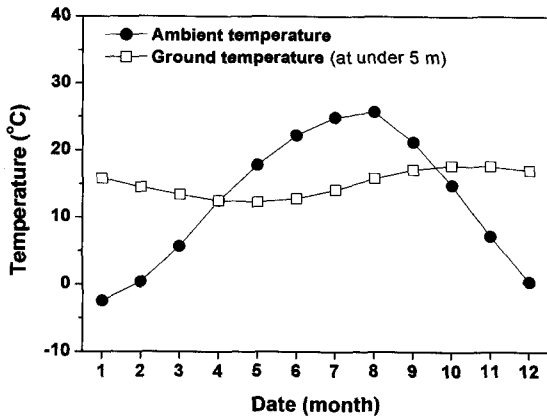
1.2 지열 열펌프 시스템의 특징

지열 열펌프 시스템은 효율과 성능 면에서 사용 공기열원 열펌프 시스템보다 우수한 것으로 알려져 있다. 이는 냉·난방 사이클에서 각각 냉열원과 온열원의 역할을 하는 지중의 연중 온도 변화가 외기의 변화보다 상대적으로 안정적이고 우수한 열원을 가지기 때문이다. 그림 1은 기상청에서 제공하는 자료로 서울지역의 최근 30년

(1981 ~ 2010년)간 외기온도와 지중온도의 평년값 자료를 월별로 나타내고 있다. 여기서 년중 외기온도는 최저 -2.4°C 에서 최대 25.7°C 로 크게 차이나는 것을 확인할 수 있다. 반면에 지중온도(5 m 기준)는 $12.3 \sim 17.7^{\circ}\text{C}$ 범위로 변화폭이 크지 않는 것을 알 수 있다.

아울러 지열 열펌프 시스템은 대기 중에 노출되는 기기가 없고 냉매를 적게 사용하며, 공간 활용 측면에서도 탁월하기 때문에 최근 들어 많은 관심을 받고 있다. 대부분의 지열 시스템은 냉·난방 겸용 시스템이기 때문에 기존 설비나 다른 신·재생에너지를 이용한 시설에 비해 우수한 경제성을 갖는다. 다양한 종류의 지열 열펌프 시스템 중, 현재 국내외에서 주를 이루고 있는 지열 시스템은 지중 토양(ground)의 에너지를 활용하는 지열원 열펌프 시스템(ground-coupled heat pump systems)이다.

이 시스템은 보어홀 천공(borehole drilling), 보어홀 그라우팅(grouting), 열펌프 설치, 팬 코일 유닛(FCU)이나 바닥난방 코일 등의 부하 측 공기조화 설비 시공 등 여러 단계를 거쳐 제작된다. 즉, 열펌프 작동유체인 냉매의 증발과 응축에 필요한 에너지를 공급하기 위해, 보어홀에 매설된 지중열교환기를 통하여 지열을 이용한다는 점이 이 시스템의 가장 큰 특징이다. 미국 환경보호청(Environment Protection Agency: EPA)은 현존하는 냉·난방 기술 중에서 가장 에너지 효



[그림 1] 최근 30년간 외기온도와 지중 온도 변화 (1981~2010, 서울지역)

을적이고 환경 친화적이며, 비용 효과가 우수한 공기조화 시스템으로 지열 열펌프 시스템을 예로 들고 있다.

2. 지열 열펌프 시스템 연구 동향

지열원 열펌프 시스템은 지중열교환기 설치를 위한 부지와 설치비용 면에서 제약을 받으며, 건물이 커질수록 지중열교환기 설치비용은 더욱 상승하게 된다. 그러나 최근 유가의 지속적인 상승에 따른 에너지의 절감이 최대 화두가 되어 냉·난방 기기의 고효율화가 절실히 요구되고 있는 실정이다. 따라서 지열을 이용한 열펌프 시스템 성능 향상과 설치비용의 절감을 위해 여러 가지 형태의 열펌프가 개발되고 연구 진행중이며 여기서는 최근에 발표된 지열을 이용한 대표적인 여러 시스템들의 성능과 운전특성에 대한 몇 가지 사례를 설명한다.

2.1 GCHP(ground coupled heat pump) 시스템

Chung and Choi(2011)은 작동 매개변수에 따른 지열원 열펌프 시스템의 설계와 성능에 관한 연구를 진행 하였다. 그림 2는 지중순환수 유량 변화에 따른 지열원 물대물 열펌프 유닛의 성능

을 측정하기 위한 실험장치의 개략도를 나타낸다. 열펌프는 왕복동식 압축기, 2개의 판형 열교환기(실내/실외 열교환기), 팽창장치 및 사방밸브로 구성되었다.

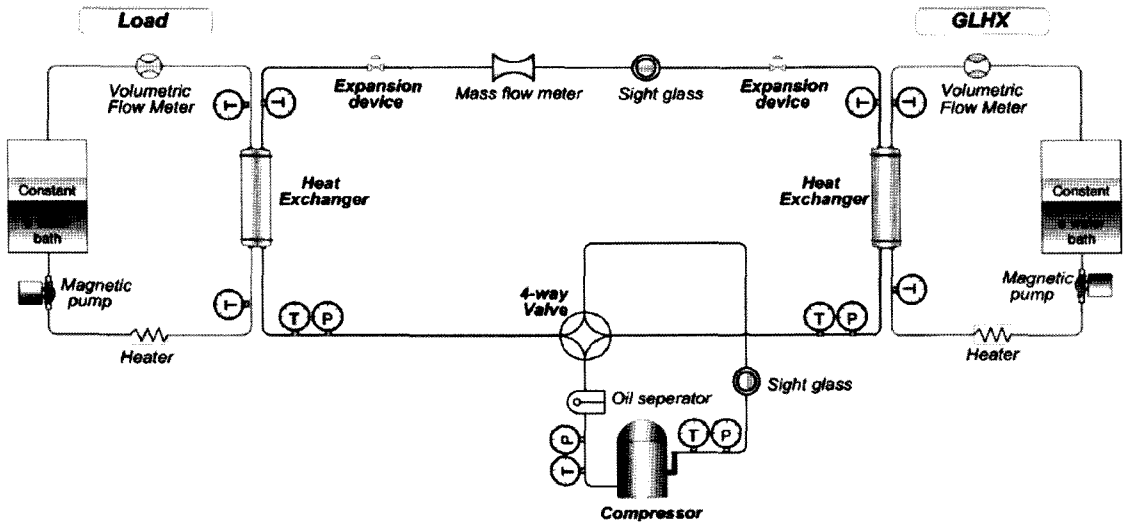
지중순환수 유량 변화에 따른 열펌프 유닛의 성능을 측정하기 위하여 7 kW의 냉방용량을 갖는 R134a 열펌프를 사용하였고, 냉매히트펌프 유닛의 실내열교환기와 실외열교환기에 건물부하 및 지중열원을 모사하여 항온조를 설치하였으며, 전기히터와 냉동기로 구성된 각각의 항온조를 이용하여 실내열교환기와 실외열교환기의 2차 유체 유입 온도를 조절하였다. 냉방모드 운전시 실내 열교환기와 실외열교환기 입구 2차 유체온도는 각각 12°C와 25°C로 선정하였으며, 난방 모드 운전 시에는 실내열교환기와 실외열교환기 입구 2차 유체온도는 각각 40°C와 5°C로 선정하였다.

그림 3과 4는 냉방 조건과 난방 조건에서 2차 유체의 질량유량 변화, 압축기 회전수 변화에 따른 지열원 열펌프 유닛의 성능변화를 보여주고 있다. 난방 모드와 냉방 모드에서 압축기 회전수에 따른 시스템의 성능은 같은 유량에서 압축기 회전수가 클수록 열펌프의 성능계수는 작아졌으며, 같은 압축기 회전수에서 질량유량이 증가함에 따라 성능은 증가폭은 점차 줄어들고 냉·난방용량은 점차 비슷한 수준을 유지하는 모습을 보인다.

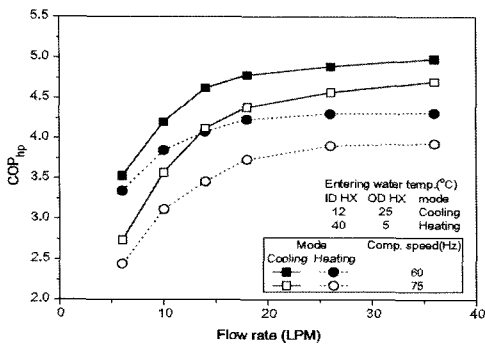
열펌프 유닛의 유량 증가에 따라 열펌프 유닛 COP 증가율 대비 시스템 COP 증가율은 감소하였다. 또한, 난방 모드에서 일정 유량 이상에서는 열펌프 유닛 COP는 증가하였으나 시스템 COP는 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 이유로 인하여 열펌프 유닛 개발 시에 시스템 COP도 함께 고려하여야 한다고 밝혔다.

2.2 2단 캐스케이드(Cascade) GCHP 시스템

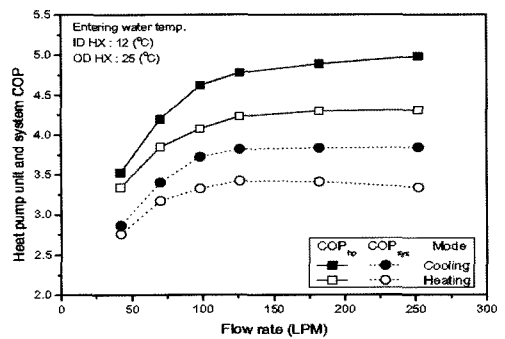
Antonijevic and Komatina(2011)은 복사 난방 시스템(radiator heating system)을 가지는 캐스케이드 지열 열펌프 시스템에 대하여 연구를



[그림 2] GCHP 시스템 개략도



[그림 3] 2차유체 질량 유량과 압축기 회전수에 따른 열펌프 성능 변화



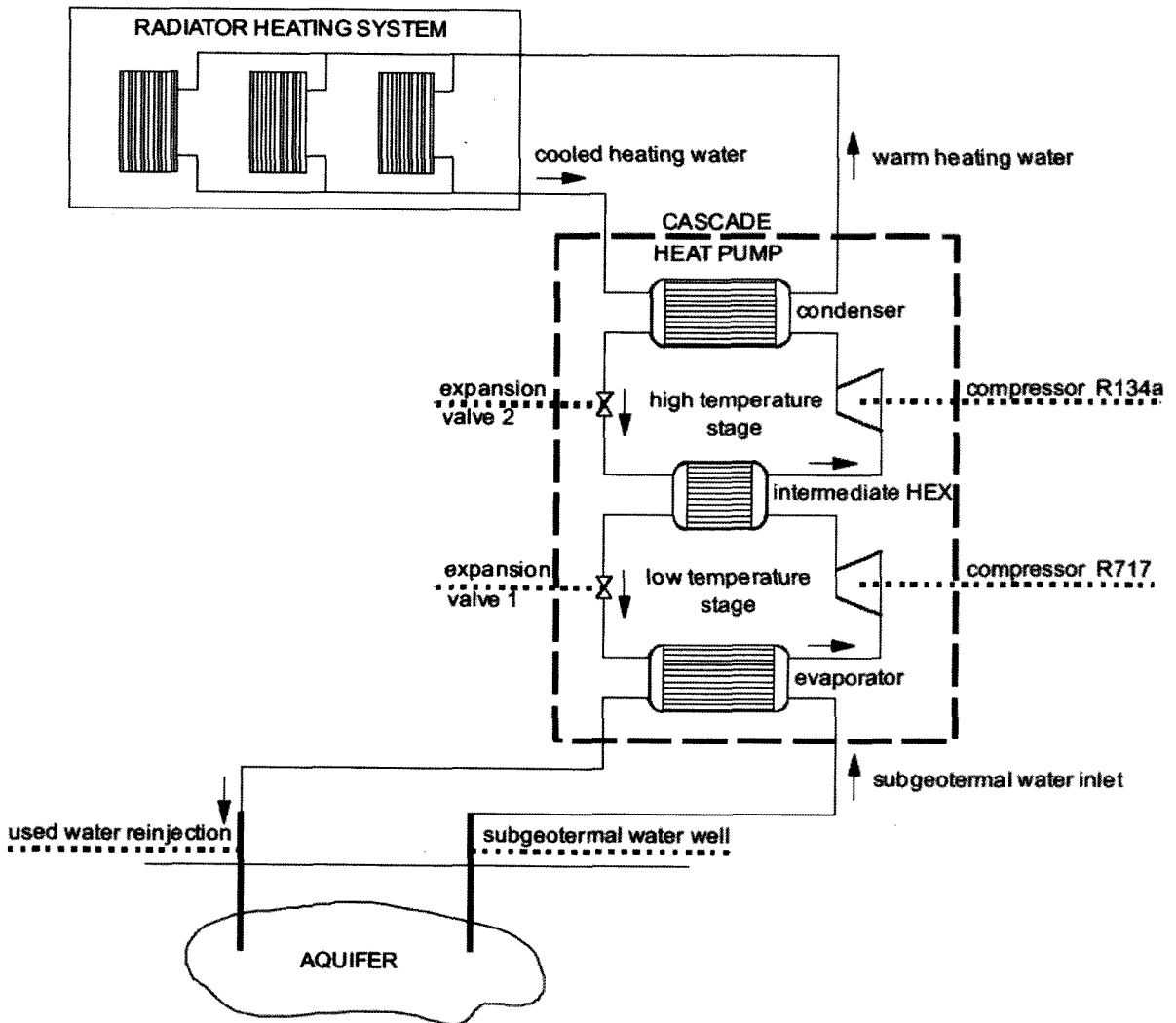
[그림 4] 2차유체 질량 유량에 따른 열펌프와 시스템의 냉·난방 성능 변화

진행하였으며 설계된 실험장치의 개략도를 그림 5에 나타내었다.

본 연구에서 지중 대수층(16℃)과 온수난방(75℃)의 높은 온도차를 효율적으로 이용하기 위한 방안으로 2단 캐스케이드 지열 열펌프 시스템을 선정하였으며, 특히 R717+R134a, R717+R290, R717+R407C의 냉매 조합을 해석적 연구를 통하여 성능계수를 비교하였다. 이때 복사 난방 면적은 약 2000 m²이며, 대수층은 16℃, 200 kW의 난방 요구량을 만족시킬 수 있는 충분한 양의 지하수가 존재하는 것으로 가정

하였다.

그림 6은 본 시뮬레이션 결과로써 대수층의 온도가 16℃, 고단 측(high-temperature stage)의 응축온도가 75℃일 때 가장 좋은 성능계수를 보인 조합은 저단-R717(ammonia), 고단-R134a를 가지는 사이클로 나타났다. 여기서 저단측의 응축온도(intermediate HEX)가 55℃일 때 COP가 최대 3.4로 가장 큰 값을 가지는 것으로 나타났다. 또한 추가적으로 R717+R134a 냉매를 사용하는 캐스케이드 2단 지열 열펌프 시스템의 대수층의 온도와 고단측 응축온도를 변화시

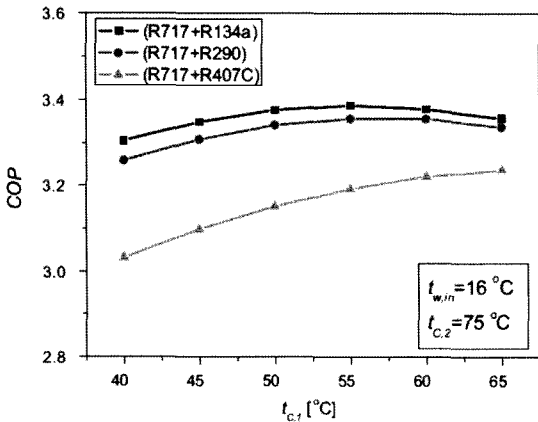


[그림 5] 2단 캐스케이드(cascade) 지열 열펌프 시스템 개략도

켜가면서 성능해석을 수행하였다. 그 결과, 대수층의 온도가 증가함에 따라 성능계수는 증가하는 경향을 보였으며, 고단축 응축온도가 증가함에 따라 성능계수는 감소하는 경향을 보였다. 경제성 평가를 통하여 제안된 열펌프의 개발 기간은 15년으로 예측하였으며, 제안된 대수층 열펌프 난방시스템의 원금회수 기간은 약 7년으로 경제적인 사용이 가능할 것으로 보고하였다.

2.3 SA-GCHP(solar-assisted ground coupled heat pump) 시스템

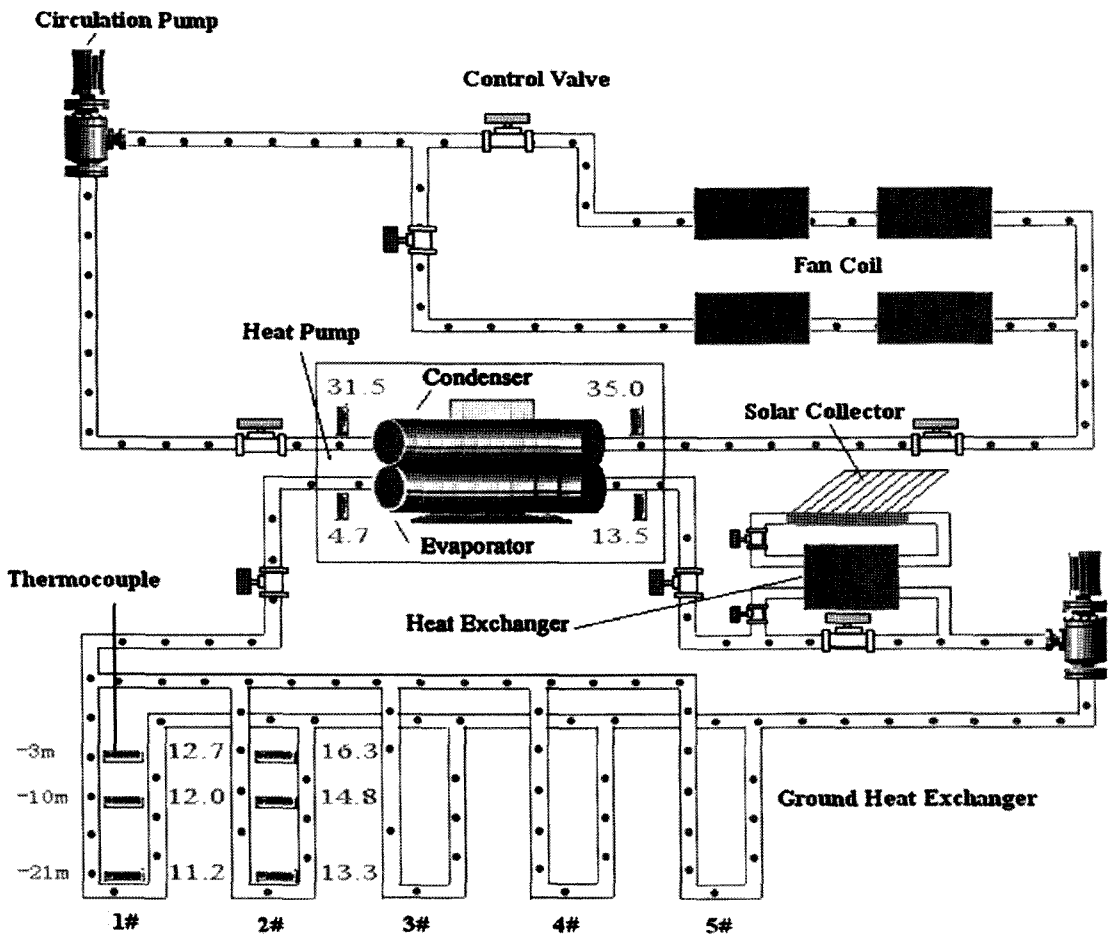
Xi et al.(2011)은 공간 난방을 위해 지열과 태양열 열원을 열펌프의 증발열원으로 이용하는 SA-GCHP(solar-assisted ground coupled heat pump) 시스템에 대하여 연구하였으며 연구를 위하여 제안된 시스템의 개략도를 그림 7에 나타내었다. 시스템은 지중열교환기(GHE), 물-물 열펌프 유닛, 펜 코일 유닛(FCU), 물 순환펌



[그림 6] 저단측 응축온도에 따른 각 시스템 성능 변화

프, 그리고 진공관형 태양열 집열기 (evacuated-tube solar collectors)로 크게 5개의 주요 요소로 구성 되어있다. 시스템 실내측 부하는 열펌프의 응축기 (condenser) 부분과 실내난방을 위한 난방수의 열교환을 통해 실내측에 필요한 열원을 공급하며, 실외측의 경우에는 증발기에서 열을 밖으로 배출하기 위하여 지열과 태양열 시스템으로 구성된 배관에 흐르는 순환수와 열교환을 통해 증발열원을 확보하게 된다.

특히, 4가지 운전모드 (태양열 시스템 적용 유무, 운전 시간)에 따라 시스템 성능변화를 분석하였다. 이를 통하여 열펌프 운전시간에 따른 보어 홀의 열회복 시간을 측정하였으며 보어 홀의 열



[그림 7] SA-GCHP 시스템 개략도

<표 1> 운전 모드 A와 B의 평균값 비교

항목	단위	Mode A	Mode B
실내온도	°C	27.34	29.49
응축기 출구 물 온도	°C	38.93	41.59
증발기 입구 물 온도	°C	8.82	11.91
보어 홀 온도	°C	7.13	8.55
응축기 공급 열량	W	4165.01	4509.42
증발기 흡수 열량	W	3473.57	3788.70
시스템 전력 소비	W	939.44	985.67
COP _{sys}	-	4.43	4.57
COP _{hp}	-	6.02	6.26

회복 속도 차이가 시스템에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 그 결과 난방성능은 보어 홀의 온도와 직접적인 관련이 있음을 확인하였으며 하루 10시간만 운전(Mode A)할 경우 24시간 연속 운전(Mode B)하는 시스템보다 보어 홀의 온도 회복이 더 빠르게 일어났으며 24시간 연속 운전할 경우 시스템의 성능 계수는 10시간만 운전하는 시스템에 비해 약 7.88% 감소한다고 밝혔다. 또한 두 가지 대표적인 운전 모드에 따른 세부적인 운전 요소들을 표 1에 자세히 비교하여 나타내었으며 전반적으로 운전 모드 B의 성능이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

난방을 위해 열펌프의 보조열원으로 지열과 태양열 시스템을 모두 사용한 경우 전체시스템의 COP는 4.57을 나타냈으며 지열원만을 적용한 경우에는 시스템 COP가 4.43으로 다소 감소하였다. 이는 태양열 시스템을 사용하면서 추가적인 순환펌프 동력이 소비되기 때문이라고 밝혔다. 추가적으로 태양열 시스템을 사용한 경우 열펌프의 흡수 및 방출 열량은 8 ~ 9% 증가하고, 소비동력은 약 5% 증가하며, 열펌프의 COP는 6.02에서 6.26으로 증가 한다고 보고하였다.

2.4 GC-SEHP(ground coupled-steam ejector heat pump) 시스템

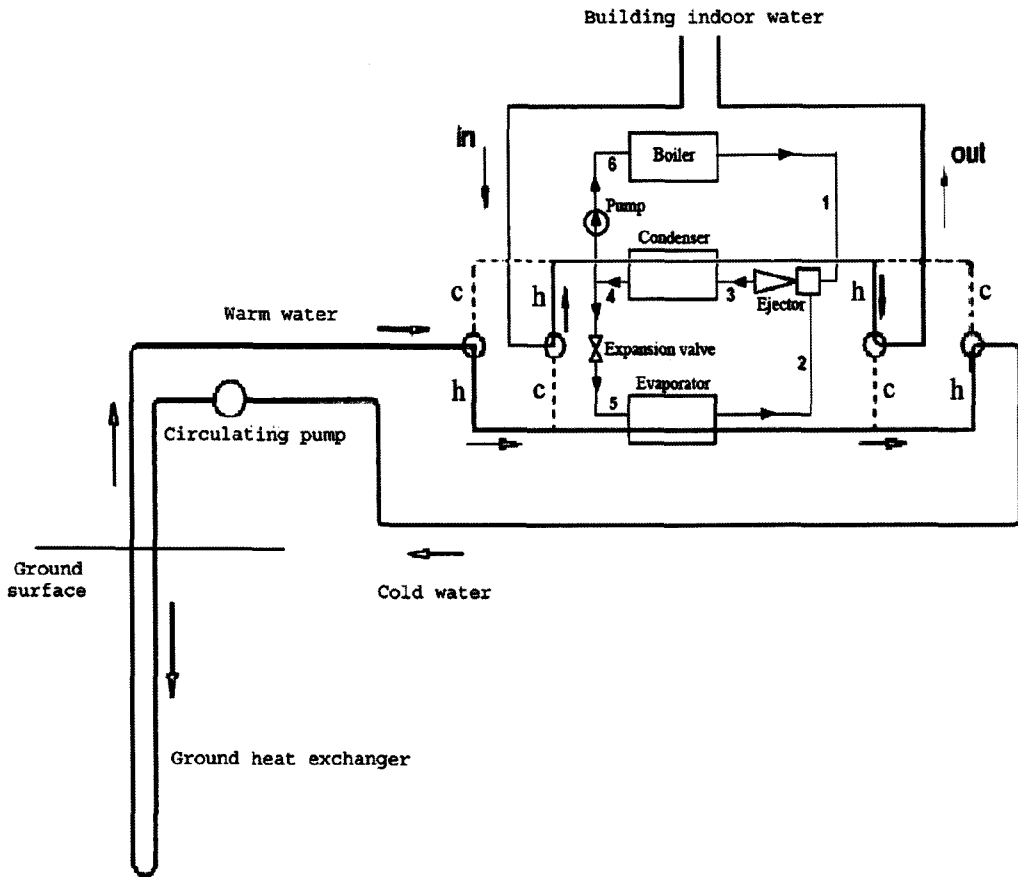
Sanaye and Nirroomand(2011)는 그림 8에서 보여주고 있는 지열원 스팀 이젝터 열펌프(GC-SEHP: ground coupled-steam ejector heat pump) 시스템에 대하여 기존에 수행된 실험 및 해석적 연구 기반으로 하여 시스템 최적화와 경제성 평가를 실시하였다. GC-SEHP 시스템은 기존의 압축기 냉동시스템에서의 압축기 대신 펌프, 보일러 그리고 이젝터를 적용한 시스템으로써 지면아래 지중열교환기의 따뜻한 물을 끌어올려 증발기에서 냉매와 열전달하고 이후 차가워진 물을 다시 지면 아래로 흘러 보내 순환시키는 시스템이다.

GC-SEHP은 크게 수직형 지중 열교환기(VGHX)와 스팀 이젝터 열펌프(SEHP)로 구성되어 있다. 지중열교환기는 U-형 폴리에틸렌(polyethylene) 파이프를 사용하였으며 스팀 이젝터 열펌프 시스템은 2개의 이중관식 열교환기(응축/증발기), 펌프, 이젝터 그리고 보일러로 구성되어 있다. 먼저 펌프와 보일러를 통과한 냉매

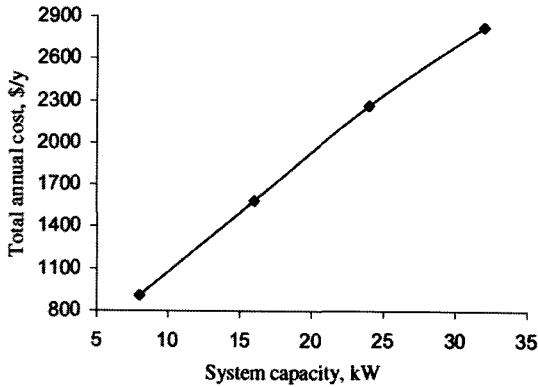
는 고온과 고압의 상태로 구동부를 통하여 이젝터 내부로 들어가게 되고 이 때 스팀이 가지고 있는 열에너지는 운동에너지로 전환된다. 이는 증발기 측의 낮은 압력의 스팀을 이젝터 내부로 유인하게 되고 믹싱탱크에서 혼합되어 디퓨저를 통해 토출된다. 디퓨저에서 토출된 냉매는 응축기로 들어가며 토출된 기상과 액상의 냉매는 각각 펌프와 팽창장치로 들어가게 구성되었다.

그림 9는 지열원 스팀 이젝터 열펌프(GC-SEHP) 시스템에 대하여 시스템 용량에 따른 최적 운전경비의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 운전경비는 시스템의 용량에 비례하는 모습을 보여주고 있는데 이는 수직형 지열열교환기의 길이가 시스템의 용량과 일치하기 때문이다. 그림 10

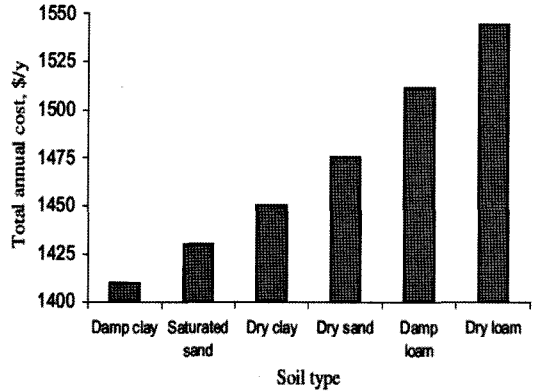
은 토양의 종류에 따른 운전경비를 비교하여 보여주고 있다. 해석 결과 건조한 양질토에서 가장 높은 운전경비를 보였으며 수분이 많은 점토질에서 가장 낮은 운전 경비를 나타나는 것으로 해석하였다. 이는 총괄열전달계수가 양질토보다 점토에서 더 크기 때문이다. 이는 이전의 연구에서 수분이 많은 흙일수록 좋은 열전달 성능을 가짐과 동일한 결과를 보여준다. 또한 여러 가지 운전 조건에서의 시스템의 운전경비와 이젝터로 들어가는 질량유량의 최적값은 시스템의 냉방용량에 비례하는 것으로 나타났으며 또한 보어홀의 개수가 증가할수록 지중열교환기의 길이가 증가함고 이는 운전비용을 증가시킨다고 발표하였다.



[그림 8] GC-SEHP 시스템 개략도



[그림 9] 시스템 용량에 따른 최적 운전경비의 변화



[그림 10] 토양의 종류에 따른 운전경비의 변화

3. 맺음말

일반적으로 지열원 열펌프 시스템은 지중열교환기 설치를 위한 부지와 설치비용 면에서 제약을 받으며, 건물이 커질수록 지중열교환기 설치비용은 더욱 상승하게 된다. 따라서 이러한 점을 보완하기 위해서 다양한 형태의 지열원 열펌프 시스템이 제안되고 있는 실정이다. 이에 본 논문에서 현재 연구 수행중에 있는 다양한 지열원 열펌프 시스템 중 4가지(GCHP, SA-GCHP, 2단 캐스케이드 GCHP, GC-SEHP) 시스템의 구성 원리와 성능에 대하여 고찰해 보았다.

굳이 최근의 고유가 정세가 아니더라도 대표적 화석 에너지인 원유의 수입가격은 앞으로도 지속적으로 상승할 것으로 예상된다. 또한 기후변화 협약 시행에 따라 화석 에너지의 사용 양상은 과거와는 크게 다를 것이다. 이러한 상황을 볼 때, 앞으로 지속적으로 다양한 형태의 지열은 이용한 열펌프 시스템이 개발 및 연구가 진행될 것으로 예상하며 아울러 지열 열펌프 시스템을 비롯하여 각종 지열 에너지 활용 기술을 적극적으로 보급하고 아울러 보급 활성화에 필요한 기술 개발에 많은 투자가 있어야 할 것이다.

4. 참고문헌

1. Antonijevic, D. and Komatina, M., 2011, "Sustainable sub-geothermal heat pump heating in Serbia", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15(8), pp. 3534-3538.
2. Chung, J.T. and Choi, J.M., 2011, "Design and performance study of the ground-coupled heat pump with an operating parameter", *Renewable Energy*, In Press.
3. Sanaye, S. and Niroomand, B., 2011, "Vertical ground coupled steam ejector heat pump; thermal-economic modeling and optimization", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 34(7), pp. 1562-1576.
4. Xi, C., Hongxing, Y., Lin, L., Jinggang, W., and Wei, L., 2011, "Experimental studies on a ground coupled heat pump with solar thermal collectors for space heating", *Energy*, Vol. 36(8), pp. 5292-5300.
5. 에너지관리공단 신·재생에너지센터, 2008, 신재생에너지 RD&D 전략 2030 시리즈-지열