

중저온급 열원을 이용한 고온제조 히트펌프 기술

김민성, 백영진, 장기창
한국에너지기술연구원 지열에너지연구센터

1. 서론

현재 세계 각국은 날로 고갈되어 가고 있는 지구 에너지원의 다원화, 석유 비중의 경감과 원자력과 같은 대체에너지의 개발 촉진 등 보다 적극적이고 합리적인 에너지 정책을 추구하고 있으며, 화석연료의 사용을 절감하여 대기오염물질 및 온실가스의 방출을 억제하는 것을 주요 관심사로 하고 있다. 이에 히트펌프의 경제성 및 환경친화성이 부각되기 시작하였다. 히트펌프는 고온의 열원과 저온의 열원간의 이동을 도모하기 위한 기기로 냉열과 온열을 동시에 제작할 수 있는 장점이 있다. 고온의 잉여열은 구조가 간단한 열회수 열교환기로 응용이 가능하나 30 ~ 50℃의 중저온급 열원은 그 이용가치가 많이 떨어지고 있다. 이러한 중저온급 열원은 지열이나 온천수, 혹은 산업폐열 등에서 흔히 존재하지만, 실제 열공급을 위하여는 고온으로 변환시키는 기술이 절실하다. 최근의 중저온급 열원을 이용하여 고온제조를 구현하는 히트펌프에 대한 연구가 진행되고 있으며 본 원고에서는 고온제조 히트펌프 기술에 대한 소개를 하고자 한다.

2. 하이브리드 히트펌프 기술

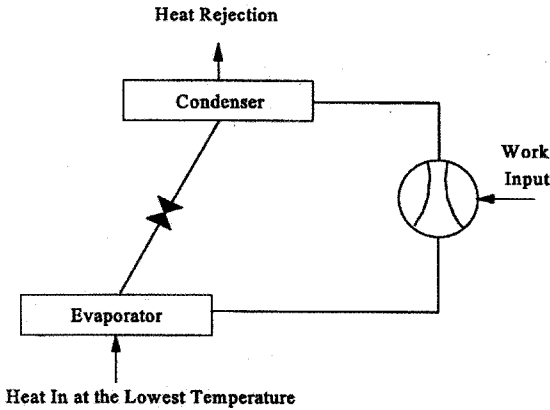
열펌프 시스템은 그 작동원리에 따라 크게 전기

사용 증기압축식(EHP, Electric Heat Pump), 가스엔진구동(GHP, Gas-driven Heat Pump), 흡수식, 흡착식 등이 있으며, 가장 널리 상용화된 것은 전기사용 증기압축식 및 흡수식, 그리고 가스사용 증기압축식이다. 본 연구에서는 고온생산을 위해 전기사용 증기압축식과 흡수식의 원리를 조합한 하이브리드 방식의 히트펌프를 응용한 기술들을 소개하겠다.

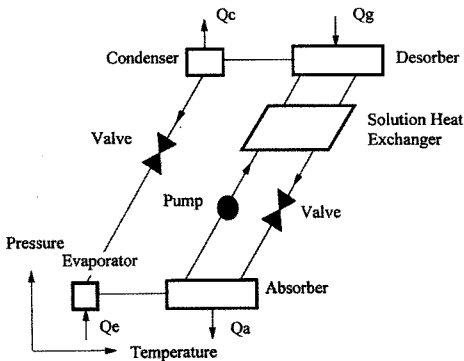
2.1 전기사용 증기압축식 히트펌프(EHP, Electric Heat Pump)

일반적인 EHP는 전기로 열펌프를 구동시켜 열 에너지를 생산하는 시스템이다. 압축기, 응축기, 교축장치(팽창밸브), 증발기의 중요한 기기에 의해 냉동사이클이 구성된다. 다만, 냉각 시와는 달리, 냉매의 흐름을 역으로 하여 증발기로 열원(Heat Source)에서 열을 흡수하고, 응축기로 열침(Heat Sink)에 열을 가하여 가열을 한다. 전기사용 증기압축 방식 히트펌프는 공조용으로 사용되는 대표적인 사이클로서, 냉매의 흐름을 바꾸는 기구에는 4방향 밸브를 이용하고 있다. 또한 일반적으로 실내, 실외 코일이 증발기 작동을 하는 입구측에 교축장치와 체크밸브를 각각 병렬로 설치하여, 액체냉매가 교축 장치를 통하여 증발기를 작동하는 코일에 들어가도록 하고, 응축기 작동을 하는 코일에서 나온 액체냉매가 체크 밸브를 통과하도록 하여 각 사이클의 냉매를 최적 유량을 흐

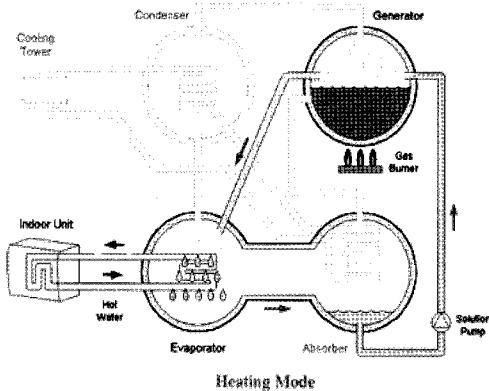
르도록 조정한다. 대표적인 전기사용 증기압축식 가열사이클을 그림 1에 나타내었다.



[그림 1] 압축식 히트펌프



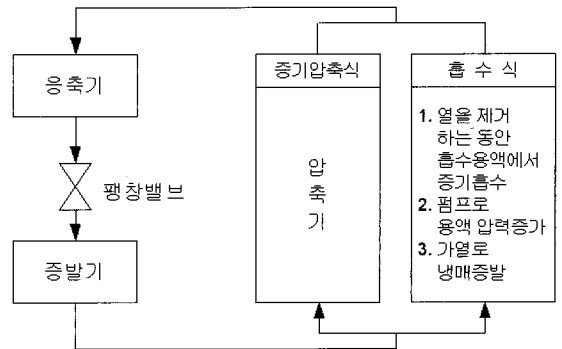
[그림 2] 단일 효용 흡수식 시스템



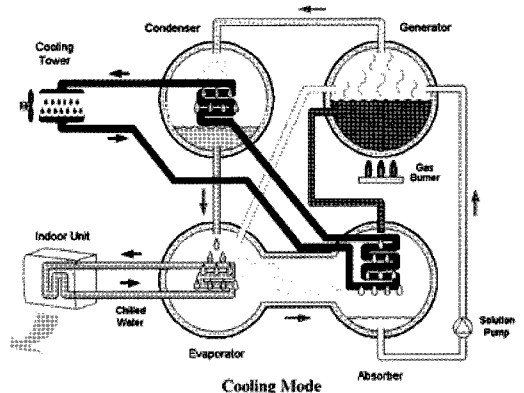
2.2 흡수식 히트펌프 (Absorption Heat Pump)

가장 기본적인 형태의 흡수식 사이클은 그림 2의 단일효용 흡수식 시스템이며, 물/리튬브로마이드(H₂O/LiBr) 혼합액을 사용하는 시스템이 보편적이다. 작동 원리상으로 볼 때에 증기 압축식 사이클과 비교하면 저온저압의 냉매증기를 고온고압으로 전환시켜 주는 과정의 차이라고 볼 수 있다. 그림 3에서처럼 증기압축식 시스템은 증발기에서 발생한 저온저압의 냉매증기를 다시 응축시켜 냉매로써 재사용하기 위해 압축기를 이용하여 기계적인 일을 공급하여 고온고압의 증기로 바꾸어 준다. 이에 반해 흡수식에서는 기계적인 일 대신 열에너지를 사용한다.

그림 4는 흡수식 히트펌프 시스템의 가열 및 냉



[그림 3] 흡수식과 증기압축식의 차이점



[그림 4] 흡수식 히트펌프 시스템의 Heating 및 Cooling 사이클

각사이클을 나타내는 개념도이다. H₂O/LiBr 시스템에서 냉매로는 물, 흡수제로는 리튬브로마이드가 사용된다. 증발기에서 증발한 냉매증기(수증기)는 흡수기(absorber)로 유입되고 물/리튬브로마이드 희용액에 흡수된다. 펌프에 의해 용액열교환기(solution heat exchanger)를 거쳐 재생기(generator)로 유입된 농용액(strong solution)은 열을 공급받아 냉매가 용액으로부터 분리된다. 발생된 냉매증기는 응축기에서 응축된 후 팽창밸브를 거쳐 다시 증발기에서 열원으로부터 열을 빼앗아 증발한다.

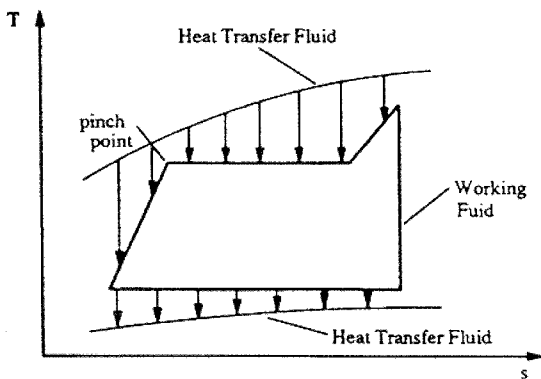
2.3 압축-흡수식 하이브리드 히트펌프 (Compression/Absorption Hybrid Heat Pump)

기존의 히트펌프 기술 중 가장 널리 활용되는 순수 냉매 이용 증기압축식 사이클은 온도구배를 지닌 열원과 냉매가 열교환을 하여 응축이나 증발이 일어날 때 냉매와 열원의 온도구배가 잘 맞지 않음으로 인해 필연적으로 성능이 저하되며 흡수식 사이클에 비해 용량조절이 수월하지 않다는 단점이 있다. 또한, 흡수식 사이클은 증기압축식 사이클에 비해 성능계수가 낮다는 단점이 있다.

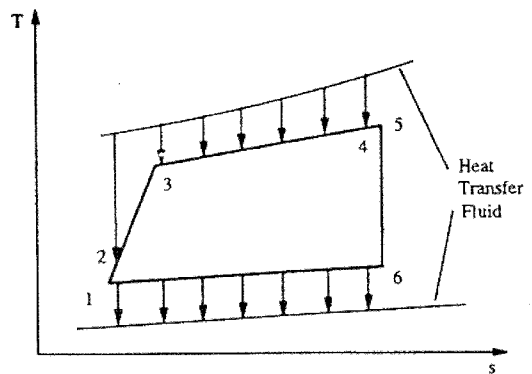
하이브리드 사이클은 증기압축식과 흡수식 사이클의 단점들을 보완하고자 개발된 사이클로, 이 사이클은 보통 용액순환부를 가진 증기압축식 사이클

(vapor compression cycle with solution circuit) 또는 압축/흡수(compression/absorption) 사이클이라고 불리며 두 개념을 혼합하였다고 하여 하이브리드(hybrid) 사이클로 불리기도 한다. 작동유체로는 비등점 차이가 큰 냉매와 흡수제의 혼합물을 사용한다. 이 사이클을 구동하는 데 필요한 에너지는 증기 압축식 사이클에서와 같이 냉매증기를 기계적으로 압축시키는 일의 형태로 제공되는 반면 냉·난방효과는 업소버(Absorber)나 디소버(Desorber)에서 냉매증기와 흡수제의 혼합물로부터 얻을 수 있다. 이러한 하이브리드 사이클은 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- (1) 낮은 압력비로 넓은 온도 구간에 걸쳐 사용 가능(예를 들어 암모니아는 58.2℃에서 포화압력이 2500 kPa이지만 물과 혼합할 경우 비슷한 압력에서 사용 가능한 온도 구간이 150 ~ 160℃ 까지 늘어남)
 - (2) 업소버와 디소버에서 작동유체의 온도구배를 이용함으로써 성능계수(COP) 향상
 - (3) 작동유체의 농도변화를 통한 용량조절 가능
- 이러한 특징들로 인해 하이브리드 사이클을 이용하면 에너지를 많이 절약할 수 있는 가능성이 있는 것으로 밝혀졌다. 그러나 하이브리드 사이클은 작동유체의 취급이 까다롭고 고난도의 기술이 요구되어 지난 반세기 동안에는 부품이 간단함



a) 순수 냉매의 상변화를 이용한 열전달 과정



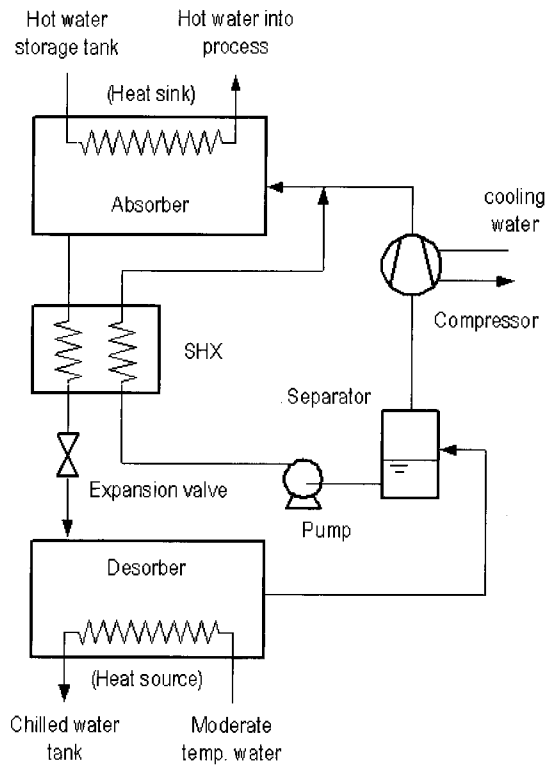
b) 혼합물의 상변화를 이용한 열전달 과정

[그림 5] 순수 냉매 및 혼합물의 상변화를 이용한 열전달 과정 비교

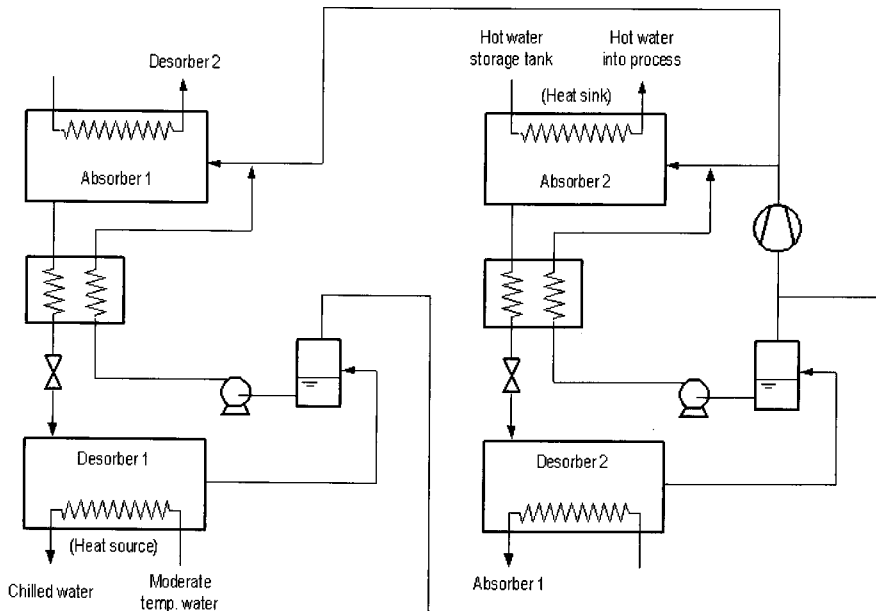
EHP에 대한 연구 및 기술개발이 중점적으로 이루어져 왔다. 그러나 최근에 히트펌프로 고온열원 생산 가능성이 부각되면서 하이브리드 사이클에 대한 연구가 유럽을 중심으로 진행되고 있다.

압축/흡수 하이브리드 열펌프는 원리적으로 열원(Heat Source) 및 열침(Heat Sink)의 온도구배(Temperature Glide)가 큰 경우에 응용하면 좋다. 이는 일반적인 현열 열원 및 열침과 냉매가 열교환을 수행하는 Process에서의 비가역성과 관계되며, 이를 그림 5에 나타내었다.

그림 6에 압축/흡수 하이브리드 열펌프의 개념도를 나타내었으며, 작동원리는 다음과 같다. 우선, 발생기(Desorber)에서는 팽창밸브(Expansion Valve)를 통과하여 저온, 저압이 된 암모니아-물 혼합물 중 주로 증기압(Vapor Pressure)이 높은 암모니아가 30 ~ 50℃의 중저온 열원으로부터 증발하게 되며, 기액 분리기(Separator) 내에서 용액과 증기로 분리된다. 이렇게 분리된 용액은 펌프를 통해 압축되어 고압의 용액이 되며, 증기는 압축기를 통해 압축된다. 다음, 압축된 증기와



[그림 6] 압축/흡수 하이브리드 열펌프의 개념도

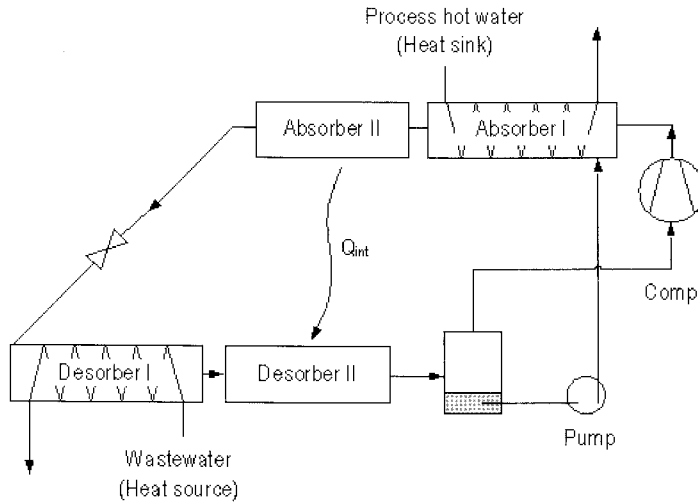


[그림 7] 2개의 용액회로를 갖는 압축/흡수 하이브리드 열펌프의 개념도

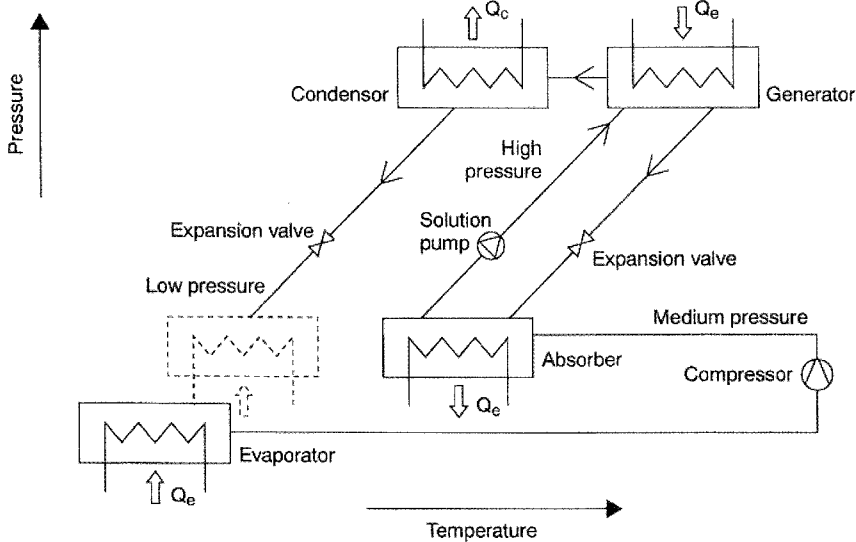
고압 용액이 흡수기(Absorber) 입구에서 만나고 흡수과정이 발생한다. 흡수기(Absorber)에서 증기의 흡수가 일어나는 동안 발생하는 흡수열은 90 ~ 100℃의 고온을 생산하게 된다. 다음, 농용액은 팽창밸브를 통해 압력이 낮아지고 발생기로 다시 돌아가는 과정을 이루게 된다. 또한 용액 열교환기에서는 온도가 높은 농용액과 온도가 낮은

희용액 사이에 열교환이 이루어진다.

그림 7은 그림 6의 압축/흡수 하이브리드 열펌프에 용액회로(Solution Circuit)를 하나 더 추가하여 저온 흡수기에서의 발열을 저온 발생기에 사용토록 함으로써, 승온폭을 높일 수 있도록 한 것이다. 같은 원리로, 3개의 용액회로를 갖도록 시스템을 구성할 수도 있다.



[그림 8] DAHX(Desorber-Absorber Heat eXchange) 사이클의 개념도



[그림 9] 저온 획득형 흡수/압축 하이브리드 사이클

그림 8은 발생기-흡수기 사이의 온도중첩 구간에 내부열교환을 시킴으로서, 하나의 용액펌프를 사용하면서도 그림 7과 같은 2단 사이클의 효과를 갖도록 한 것으로서 DAHX(Desorber-Absorber Heat eXchange) 사이클이라 부른다. 이 사이클이 구현되면 시스템의 압력비가 감소하여 성능향상의 요인도 있으나, 내부 열교환에 따른 유량 증가가 수반되므로 응용분야에 맞는 최적 설계가 필요하다.

한편, 흡수/압축 하이브리드 사이클을 구성할 수도 있다. 그림 9는 저온 획득형 흡수/압축 하이브리드 사이클의 개략도를 나타낸다. 이는 흡수식 사이클을 기본으로 하여 보다 저온을 얻을 수 있도록 압축기를 추가하여 구성한 것이 특징이다.

3. 맺음말

본 원고에서는 중저온의 열원을 이용하여 90℃ 이상을 생산할 수 있는 고온제조 히트펌프 기술에 대해 알아보았다. 압축-흡수식 기술을 접목하여 고안된 하이브리드 기술은 이론적으로 고온은 200℃ 까지 생산이 가능하며, 저온은 -70℃ 까지 구현이 가능하다. 산업공정이나 병원 등 많

은 열수요처에서 90℃ 이상의 고온을 요구하고 있으며 기존에는 가스 및 석유 보일러로 이러한 열수요를 충족시켜 왔다. 그러나 화석에너지의 경제성이 나빠지면서 효율적으로 고온을 생산할 수 있는 히트펌프 기술이 재조명 받고 있으며, 이에 고온수 생산을 위한 보일러를 대체할 기술로 하이브리드 히트펌프가 주목받고 있다. 하이브리드 히트펌프 기술은 압축기술, 펌핑기술 등이 매우 까다로와 고난도의 기술수준이 요구되지만 높은 성능과 공급온도 범위가 매우 넓어 이에 대한 연구는 앞으로도 계속될 전망이다.

참고문헌

1. IEA Heat Pump Programme, "Absorption Machines for Heating and Cooling in Future Energy Systems", Annex 24, October 2000.
2. Zhou, Q., 1994, "Vapor Compression Cycle with a Solution Circuit and Desorber/Absorber Heat Exchanger", Ph.D Thesis, University of Maryland.