

중온 지열수를 이용한 고온제조 열펌프 시스템 해석 및 설계

*김 민성¹⁾, **백 영진²⁾, 박 성룡³⁾, 장 기창⁴⁾, 이 영수⁵⁾, 나 호상⁶⁾

Design of a High Temperature Production Heat Pump System Using Geothermal Water at Moderate Temperature

*Minsung Kim, **Young-Jin Baik, Seong-Ryong Park, Ki-Chang Chang,
Young-Soo Lee, Ho-Sang Ra

Key words : Geothermal water(지열수), High temperature generation(고온제조), NH3/H2O mixture (암모니아/물 혼합냉매), Compression/absorption hybrid heat pump(압축/흡수식 하이브리드 열펌프)

Abstract : Geothermal water at moderate temperature in a range between 30 to 50°C exists sparse in surroundings. Mostly they are utilized as heat or water source at spar zones in Korea. However, a large portion of used water is discarded due to its poor recovery quality and inferior application technologies. In this research, an innovative heat pump system based on the hybrid concept that combinates compression cycle and absorption cycle was investigated mathematically. The hybrid heat pump aims to recycle various kind of the heat sources at moderate temperature including geothermal water effectively. The prime objective of the simulation is to design a compression/absorption hybrid heat pump system which can make high temperature above the level of 90°C and low temperature of 20°C as well at the same using 50°C geothermal heat water. As a result, primitive data was provided as a basis to design a prototype 3 RT class hybrid heat pump.

Nomenclature

COP	: coefficient of performance [-]
h	: enthalpy [kJ/kg]
\dot{m}	: mass flow rate [kg/s]
Q	: heat transfer [kW]
s	: entropy [kJ/kg°C]
S_{gen}	: entropy generation [kJ/s°C]
T_{avg}	: system average temperature [°C]
W	: work [kW]
x	: mass composition [-]

Subscripts

comp	: compressor
in, out	: flow entering and leaving a component
pump	: pump

1. 서 론

최근 원유공급가가 급격히 상승하고 CO₂ 배출권 문제가 부각되면서 열펌프의 경제성 및 환경친화성이 부각되기 시작하였다. 열펌프는 고온의 열원

와 저온의 열원간의 이동을 도모하기 위한 기기로 냉열과 온열을 동시에 제작할 수 있는 장점이 있다. 고온의 임여열은 구조가 간단한 열회수 열교환기로 응용이 가능하나 30 ~ 50°C의 중저온급 열원은 그 이용가치가 많이 떨어지는 것이 사실이다. 최근의 에너지절약 노력과 맞물려 이러한 중저온급 열원을 이용하여 고온제조를 구현하는 열펌프에 대한 연구가 진행되고 있으며, 이는 지열,

-
- 1) 한국에너지기술연구원 지열에너지연구센터
E-mail : minsungk@kier.re.kr
Tel : (042)860-3062 Fax : (042)860-3133
 - 2) 한국에너지기술연구원 지열에너지연구센터
E-mail : twinjin@kier.re.kr
Tel : (042)860-3226 Fax : (042)860-3133
 - 3) 한국에너지기술연구원 지열에너지연구센터
E-mail : srspark@kier.re.kr
Tel : (042)860-3224 Fax : (042)860-3133
 - 4) 한국에너지기술연구원 지열에너지연구센터
E-mail : kcchang@kier.re.kr
Tel : (042)860-3163 Fax : (042)860-3133
 - 5) 한국에너지기술연구원 지열에너지연구센터
E-mail : yslee@kier.re.kr
Tel : (042)860-3161 Fax : (042)860-3133
 - 6) 한국에너지기술연구원 지열에너지연구센터
E-mail : hsra@kier.re.kr
Tel : (042)860-3167 Fax : (042)860-3133

산업폐열 등의 다양한 열원을 사용할 수 있다는 장점이 있다. 또한 중저온 열원의 열회수가 경제성을 가지기 위하여 열펌프 시스템이 적용되어야 하기 때문이다.

이러한 고온제조 열펌프는 생산된 고온의 수준에 따라 지열열공급 및 산업용 등 다양한 열공급원으로 응용될 수 있는데, 단순히 에너지절약 때문만이 아니라, 공정의 제어를 좋게 할 수 있고, 공장 폐열의 온도저감 및 냉각수이용의 절감 등과 같은 가능성 때문에 부가적인 경제적 이득이 명백히 발생하게 된다.

기존에 나와 있는 열펌프의 이론을 토대로 하였을 때 생산가능한 최고수준은 150°C 정도의 스텝이며, 현재 열펌프 기술수준으로는 70°C의 온수 생산이 가능한 것으로 알려져 있다. 일반적으로 산업체 수요의 20~30%는 150°C 이하의 열원이며 지역난방의 공급온도는 110°C 정도임을 고려할 때, 고온제조 열펌프의 개발은 다양한 용처를 찾기가 매우 유리하다. 특히 국내에 다량으로 존재하는 온천수의 경우 온수 수준이 대부분 30°C 전후에 머무르고 있는 수준이여 고온제조 열펌프의 적용은 그 용도가 대단히 유용하다고 하겠다. 많은 온천에서 실질적으로 보조적인 버너 등의 열공급기를 사용하고 있음을 고려할 때, 고효율 열펌프의 적용은 에너지효율 향상에 도움이 될 것으로 판단된다.

본 연구에서는 이와 같이 지열, 산업체열 등 다양으로 분포하고 있는 중저온열을 효과적으로 회수, 이용하기 위한 방안으로서, 증기 압축식과 흡수식 사이클의 단점을 보완한 하이브리드 사이클을 응용한 열펌프를 개발하고자 한다.

2. 하이브리드 열펌프 시스템

하이브리드 사이클은 증기압축식과 흡수식 사이클의 단점을 보완하고자 개발된 사이클로, 이 사이클은 보통 용액순환부를 가진 압축/흡수(Compression/Absorption) 사이클이라고 불리며 작동유체로는 비등집 차이가 큰 냉매와 흡수제의 혼합물을 사용한다. 이 사이클을 구동하는 데 필요한 에너지는 증기 압축식 사이클에서와 같이 냉매증기를 기계적으로 압축시키는 일의 형태로 제공되는 반면 냉난방효과는 흡수기(Absorber)나 재생기(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°C에서 포화압력이 2500 kPa이지만 물과 혼합할 경우 비슷한 압력에서 사용 가능한 온도 구간이 150~160°C까지 늘어남)

- (2) 흡수기와 재생기에서 작동유체의 온도구배를 이용함으로써 성능계수(COP) 향상

- (3) 작동유체의 농도변화를 통한 용량조절 가능

Fig. 1에 하이브리드 열펌프의 개념도를 나타내었으며, 작동원리는 다음과 같다. 우선, 재생기에서는 팽창밸브를 통하여 저온, 저압이 된 암모니아-물 혼합물 중 주로 증기압이 높은 암모니

아가 증발하게 되며, 기액분리기 내에서 용액과 증기로 분리된다. 이렇게 분리된 용액은 펌프를 통해 압축되어 고압의 용액이 되며, 증기는 압축기를 통해 압축된다. 다음, 압축된 증기와 고압 용액이 흡수기 입구에서 만나고 흡수과정이 발생한다. 흡수기에서 증기의 흡수가 일어나는 동안 발생하는 흡수열은 고온수(90~100°C)를 제조하는데 사용된다. 이 후 농용액은 팽창밸브를 통해 압력이 낮아지고 발생기로 다시 돌아가는 과정을 이루게 된다.

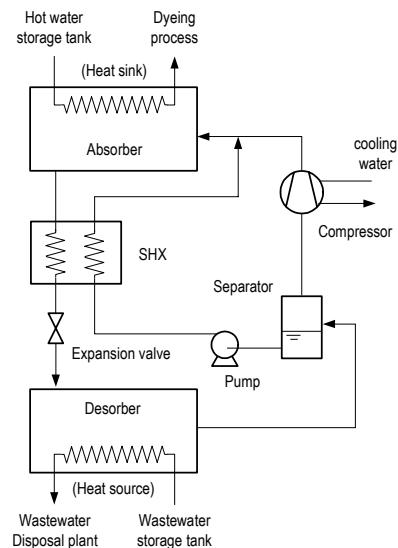


Fig. 1 Schematic diagram of $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ compression absorption hybrid heat pump

하이브리드 사이클은 암모니아-물 혼합냉매의 상변화시 크게 나타나는 온도구배를 이용한 사이클로 기존의 증기압축사이클에 비해 온도구배가 있는 열교환시에 매우 높은 성능을 보인다. 실제 순수냉매는 Fig. 2(a)에서와 같이 카르노 사이클에 기반한 사이클 구조로서 냉각 및 가열과정에서 열매체간의 온도편차가 크게 나타나므로 압축일에 소요되는 동력차이가 크다. 그러나 Fig. 2(b)의 로렌츠 사이클에서와 같이 열매체간의 온도편차를 최대한 줄일 수 있는 시스템에서는 최소의 압축일로도 최대의 성능을 얻을 수 있기 때문에 고온제조시에 기존 증기압축사이클보다 훨씬 뛰어난 성능을 보인다. 실제로 Table 1의 운전조건일 때, 카르노 사이클의 효율은 최대 5정도이나 로렌츠 사이클의 효율은 10정도로 두 배 가량 높은 성능을 구현할 수 있다. 그러나 실제로 구현가능한 성능 수준은 이보다 낮으며 이에 대해서는 다음 절에서 둘하도록 한다.

Table 1 Simulation condition

Simulation parameters	Conditions
Hot water temperature	$50^\circ\text{C} \rightarrow 90^\circ\text{C}$
Cold water temperature	$50^\circ\text{C} \rightarrow 20^\circ\text{C}$
Absorber pressure	1700 kPa

3. 시스템 해석 및 설계

압축/흡수 하이브리드 열펌프를 해석하기 위하여 각 구성요소를 질량, 총 질량, 에너지보존식, 엔트로피 관계식을 사용하여 다음과 같이 모델링 하였다.

Working Fluid Mass Balance :

$$\sum(\dot{m})_{in} - \sum(\dot{m})_{out} = 0 \quad (1)$$

Overall Mass Balance :

$$\sum m_{in} - \sum m_{out} = 0 \quad (2)$$

Energy Balance :

$$\sum(\dot{mh})_{in} - \sum(\dot{mh})_{out} + W - Q = 0 \quad (3)$$

Entropy Generation Rate :

$$S_{gen} = \sum(\dot{ms})_{out} - \sum(\dot{ms})_{in} - \sum \frac{Q}{T_{avg}} = 0 \quad (4)$$

이 때, 하이브리드 열펌프의 성능계수 (COP, Coefficient of Performance)는 다음과 같이 정의 될 수 있다.

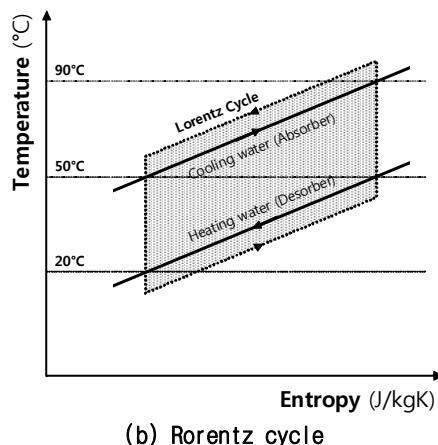
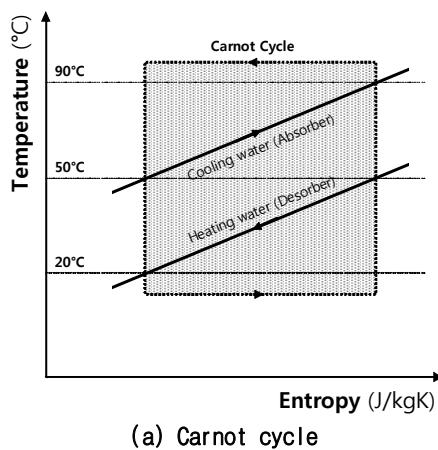


Fig. 2 Comparison of ideal cycles with high temperature gradient heat source and heat sink

$$COP = \frac{Q_{abs}}{W_{comp} + W_{pump}} \quad (5)$$

압축기의 모델링에 있어서, 열원으로부터 얻을 수 있는 열량과 가격대 성능비를 고려하여, 현재 상업적으로 널리 이용되고 있는 암모니아 압축기로서, 수냉 오일 윤활을 적용하도록 설계하였다. 기액분리기 내의 기액평형조건에 의하면 토출 기체에 1% 내외의 수분이 포함되어 있으나, 이를 무시하고 순수 암모니아를 넣었을 때와 같은 효율을 갖는다고 가정하여, 단열효율을 압축기 선도로부터 흡입압력과 토출압력의 다향식으로 구하였다. 또한, 윤활유의 소손 방지를 위하여 압축기 토출 가스 온도를 일정값 이내로 제한할 수 있도록 하였다. 아울러 열침과 열원의 온도차(Temperature Lift)가 클수록 시스템의 압력차가 커지고 비가역 손실이 증가하여 압축기 토출가스 온도가 높아지므로 안전 사용범위에 각별히 주의할 필요가 있다.

흡수기는 UA-LMTD법을 사용하여 해석하였다. 이 때, 흡수기와 재생기 내의 전열량을 10으로 나눈 후, 각각에 대하여 UA-LMTD법을 적용하였다. 이는 NH3/H2O 혼합냉매의 온도구배가 구배를 이루고 있기 때문에 이차 유체와의 온도차 계산 오차를 줄일 수 있도록 하였다. 특히, 흡수기에서는

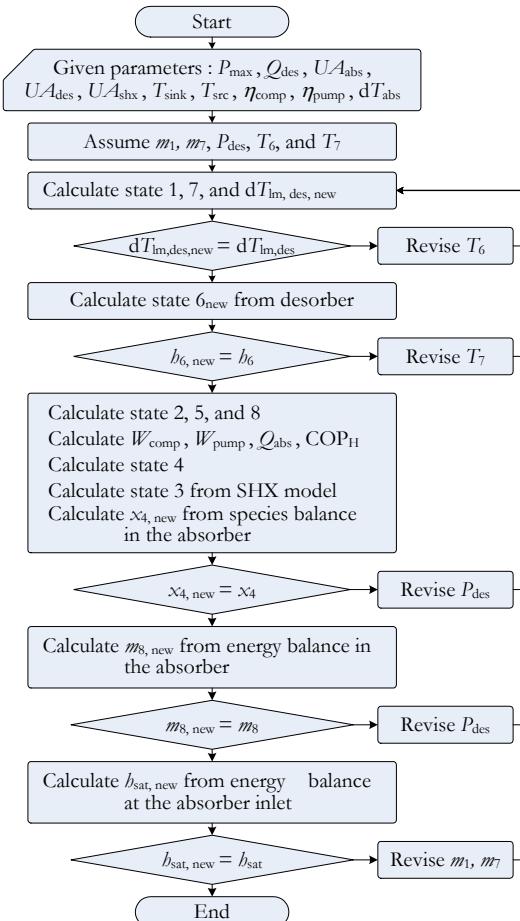


Fig. 2 Solution algorithm of hybrid heat pump

온도구배의 비선형성으로 인해 핀치점(pinch point)이 열교환기 중앙에서 발생하게 되는데, 이로 인한 불합리한 온도 프로파일 발생을 막기 위함이다. 용액열교환기(SHX; Solution Heat Exchanger)는 농용액과 회용액 양측에 대하여 핀치점까지의 전열량을 각각 계산하여 이중 더 적은 값을 최대 열교환량으로 정의한 다음, 주어진 UA와 ϵ -NTU 관계식을 이용하여 해석하였다. 팽창밸브는 등엔탈피 과정으로 생각하였으며, 용액펌프(solution pump)는 일정 단열효율을 갖는 것으로 가정하였다.

이상의 모델링을 Ibrahim and Klein(1993)의 암모니아-물 물성치를 제공하는 계산 툴인 EES를 사용하여 Programming한 후, 시뮬레이션을 수행하였으며 이의 알고리즘은 Fig. 3에 나타내었다.

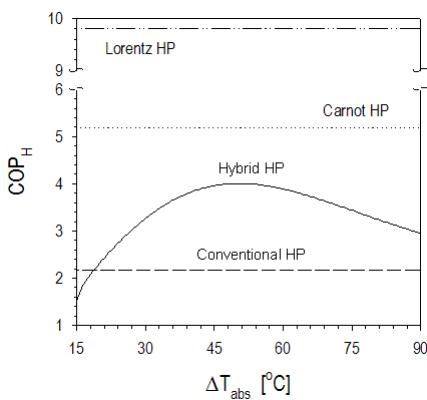


Fig. 4 Performance comparison of hybrid and conventional heat pump at the variation of hot water from 50°C to 90°C and cold water from 50°C to 20°C

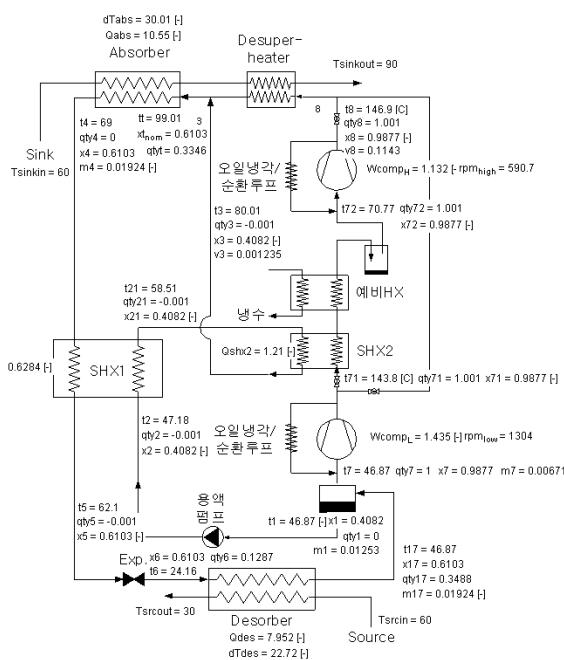


Fig. 5 Simulation for a 2-stage compression/absorption NH₃/H₂O hybrid heat pump design

Fig. 4은 Table 1의 해석조건을 기준으로 기존 사이클에 대한 하이브리드 열펌프의 성능이 흡수기의 온도구배에 따라 영향을 받는 정도를 나타낸 것이다. 흡수기의 온도구배에 따라 열펌프 성능변화가 뚜렷하며, COP가 최대 4에 근접하는 값을 가진다. Fig. 5에는 상기의 시뮬레이션 프로그램의 실제 실행 화면 예제를 나타내었다. 시스템 시뮬레이션 수행 결과로서, 각점의 상태(온도, 농도, 압력, 엔탈피, 유량), 흡수기 열량, 압축기 및 펌프 일량, 그리고, 시스템 성능계수를 얻을 수 있다. Fig. 3의 알고리즘에 대한 인덱스는 Fig. 5에 나타나 있다.

시스템 최대 허용압력 1700 kPa으로 설정하였을 때의 해석결과로는 온수가열량 10.55 kW, 열침온도($T_{sink,in}$) = 60°C, 고온수 온도($T_{sink,out}$) = 90°C, 열원온도($T_{src,in}$) = 60°C, 그리고 열원수 출구온도($T_{src,out}$) = 30°C의 조건하에서 약 4.06의 난방성능계수를 얻을 수 있을 것으로 계산되었다. 이 조건하에서 계산된 각 구성요소의 값은 Fig. 3의 실시결과와 같다.

4. 결 론

본 연구에서는 중온수를 열원으로 이용하기 위한 하이브리드 열펌프 기술을 시뮬레이션 방법을 통하여 해석하였다. 결과로 기존의 R134a 열펌프에 비하여 작동 범위가 넓으며, 고온수 생산시 성능이 최소 10~20% 이상 향상되는 것으로 나타났다. 그러나 하이브리드 열펌프는 압축기 토출가스의 온도가 매우 높아, 실제 구현에는 이에 대한 수정설계가 중요할 것으로 판단된다.

본 연구의 하이브리드 열펌프의 주 작동유체는 암모니아-물 혼합물이므로, 모든 구성요소는 암모니아와 함께 사용할 수 있는 내식성 소재를 적용하는 것이 중요하다. 또한 압축기와 펌프의 내구성 향상을 위해 기액분리기에서 액체와 기체의 분리가 원활하도록 설계하는 것이 중요하다.

후 기

본 과제는 산업자원부의 에너지자원기술개발사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드린다.

References

- [1] Åhlby, L., Hodgett, D. and Berntsson, T., 1991, Optimization study of the compression/absorption cycle, *Int. J. Refrig.* 14, 16–23.
- [2] Nordtvedt, S. R., 2005, Experimental and theoretical study of a compression/absorption heat pump with ammonia/water as working fluid, Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Kjeller, Norway.
- [3] Ibrahim, O. M. and Klein, S. A., 1993, Thermodynamic properties of ammonia-water mixtures, *ASHRAE Trans.: Symposia*, Vol. 21, No. 2, pp. 1495–1502.