

산업폐수열원 이용 증기압축식/흡수식 하이브리드 히트펌프 시스템의 시뮬레이션

백 영 진, 박 성 룡[†], 장 기 창, 라 호 상
한국에너지기술연구원 미활용에너지연구센터

Simulation of Compression/Absorption Hybrid Heat Pump System using Industrial Wastewater Heat Source

Young-Jin Baik, Seong-Ryong Park[†], Ki-Chang Chang, Ho-Sang Ra
Unutilized Energy Research Center, Korea Institute of Energy Research (KIER),
Yoosung P.O Box 103, Taejon 305-600, Korea

(Received July 2, 2004; revision received September 18, 2004)

ABSTRACT: In this study, in order to utilize the waste heat of industrial wastewater in the range of the relatively low temperature of 40~50°C as a heat source, a hybrid heat pump system was considered by computer simulation method. In the simulation, an absorber, desorber and solution heat exchanger were modelled by UA values while a compressor and pump performance were specified by an isentropic efficiency. Simulation results show that the performance of hybrid heat pump can be up to 80% higher than that of conventional R134a heat pump when it makes a process hot water of 90°C while the wastewater is cooled down to 20°C. As the absorber pressure increases, the system performance and desorber pressure increase with a favorable effect of a compressor discharge gas temperature drop.

Key words: Hybrid heat pump(하이브리드 히트펌프), Waste heat recovery(폐열회수), Ammonia(암모니아), Water(물), Temperature gradient(온도구배)

기 호 설 명

COP_H : 성능계수, 식(1)

m : 질량유량 [kg/s]

P : 압력 [kPa]

Q : 열량 [kW]

T : 온도 [°C]

UA : 총괄열전달계수 [kW/K]

W : 일량 [kW]

x : 암모니아의 농도

그리스 문자

ΔT_{abs} : 흡수기내 온도구배 [°C]

η : 효율

하첨자

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-860-3224; fax: +82-42-860-3133

E-mail address: srpark@kier.re.kr

1 : 용액펌프 입구

2 : 용액펌프 출구

4	: 흡수기 출구
7	: 압축기 입구
8	: 압축기 출구
abs	: 흡수기(absorber)
des	: 발생기(desorber)
sat	: 흡수기 입구 포화상태
shx	: 용액열교환기
sink	: 열침(heat sink), 공정수
src	: 열원(heat source), 염색폐수

1. 서 론

우리나라의 에너지소비량은 연간 240억불(2000년 기준) 이상으로 이중 약 97%를 수입에너지에 의존하고 있는 실정이며, 산업화의 확산에 의한 에너지 고갈 및 온실가스 규제 등 국제적인 환경보호 노력으로 인하여 에너지절약에 대한 관심이 날로 증가하고 있다.

에너지는 주택의 냉난방으로부터 교통 및 모든 산업 분야에서 사용되고 있으며, 이중에서도 염색산업은 공정특성상 다량의 증기와 고온수가 필요한 에너지 다소비 산업으로서, 에너지절약을 위한 노력이 절실히 요구되는 산업이다. 특히, 국내 최대 규모의 염색단지인 대구염색산업단지 내에는 약 115개 업체가 입주해 있으며, 이중 2차단지 입주업체에서는 자체 보일러에서 생산한 증기를 이용하여 직염, 날염, 사염 등을 생산하고 있는데, 제조원가 중 에너지비용이 매우 크므로 에너지절감 방안에 대한 관심이 매우 높은 실정이다.

한편, 염색가공은 정련, 감량 등의 처리공정을 통해 조염, 생산되는데, 이 과정에서 다량의 폐수가 발생된다. 염색가공공정은 각 업종에 따라 다르기 때문에 폐수의 양, 수질 및 수온이 공장마다 다르게 배출되고 있으나, 폐수의 평균 배출온도는 하계 약 50℃, 동계 약 35℃로 연평균 약 40℃이며, 폐수배출량도 연간 2.9×10^7 톤에 이른다. 이는 대구광역시의 공업용수의 평균 온도인 약 18℃를 기준으로 하여 에너지량으로 환산할 경우 약 64,540 TOE/년에 해당하는 막대한 양이다.

이상과 같이 염색가공공정은 에너지 다소비형이며, 염색조업을 수행하는 과정에서 저온의 폐수가 다량으로 발생하고 있지만, 대부분의 업체에서 폐수의 열에너지는 미활용되고 있을 뿐더러, 방류시 폐수온도가 40℃를 초과할 때에는 업

체에서 부과금을 지불해야 하므로, 공동폐수처리장으로 방류하기 전에 강제 냉각시키고 있는 실정이다.

따라서, 염색업체 별로 열회수 장치를 설치하여 발생하는 저온폐수열을 회수하여 공정용 온수나 급수가열 등으로 활용하면, 연료사용량을 절약함과 동시에 강제 냉각비용 또는 고온부과금 부담도 없애고 이산화탄소 배출량 감소로 환경보전에도 기여할 수 있다.

이러한 점에 착안하여, 본 연구에서는 염색폐수의 저온열을 활용하여 염색공정에 이용 가능한 고온의 공정수를 제조할 수 있는 시스템으로서, 하이브리드 히트펌프 시스템을 적용하는 경우를 고려하였다. 이와 관련하여 본 연구에서는 이러한 하이브리드 시스템이 실제 염색폐수 및 공정수의 사용온도 조건하에서 어떠한 성능을 나타낼 것인지를 살피기 위하여 시스템 모델링 및 시뮬레이션을 수행하였으며, 이를 통하여 여러 인자들의 변화에 따라 시스템 성능계수 및 각 구성요소의 운전조건이 어떻게 변화하는지를 조사하였으며, 하이브리드 히트펌프 시스템이 기존 히트펌프 시스템에 비하여 어느 정도의 성능 향상을 갖는지를 살펴보았다.

2. 시스템 개요

순수냉매를 사용하는 증기압축식 히트펌프 사이클의 경우, 냉매의 응축이나 증발시 온도구배를 지닌 열원과 열교환을 할 경우 작동유체간의 온도구배가 잘 맞지 않음으로 인한 필연적 성능저하요인이 발생하며, 흡수식 히트펌프 사이클에 비해 용량조절이 수월하지 않다는 단점이 있다. 흡수식 히트펌프 사이클은 동일작동 온도범위에서 증기압축식 히트펌프 사이클에 비해 성능계수가 낮다는 단점이 있다.

하이브리드 히트펌프 사이클은 일반적으로 용액순환부를 가진 증기압축식 사이클(Vapor Compression Cycle with Solution Circuit, VCCSC) 또는 압축식/흡수식(Compression/Absorption) 사이클이라고도 불리며, 증기압축식과 흡수식 사이클의 단점들을 보완하고자 개발된 사이클이다.

하이브리드 히트펌프 사이클의 작동유체로는 비등점 차이가 큰 냉매와 흡수제의 혼합물이 사용된다. 이 사이클을 구동하는 데 필요한 에너지는

증기압축식 사이클에서와 같이 냉매증기를 기계적으로 압축시키는 일의 형태로 제공되어야 한다. 냉·난방 효과는 흡수기(absorber)나 발생기(desorber)에서 냉매증기와 흡수제의 혼합물로부터 얻을 수 있다. 이러한 하이브리드 히트펌프 사이클은 낮은 압력비로 넓은 온도구간에 걸쳐 사용 가능하며, 흡수기와 발생기에서 작동유체의 온도구배를 이용함으로써 성능계수를 크게 향상시킬 수 있다.⁽¹⁾

이와 관련하여, Åhlby et al.⁽¹⁾ 및 Jeon et al.⁽²⁾은 하이브리드 사이클에 대한 시뮬레이션을 실행하여 최적의 성능계수를 얻을 수 있는 흡수기의 온도구배를 찾고자 노력하였고, 기존의 순수냉매를 이용한 증기압축식 사이클과의 성능비교도 수행하였다. 스위스에서는 이미 하이브리드 히트펌프 사이클을 이용한 실험장치를 만들어 실험한 결과 기존의 증기압축식 사이클에 비해 23%의 에너지절약 효과를 얻었으며, 4.3이라는 높은 성능계수를 얻은 바 있다.⁽³⁾

본 연구에서는 암모니아-물 혼합물을 작동유체로서 고려하였는데, 이는 독성과 폭발성이 있어 실제 시스템에 적용할 경우 해결해야 할 문제를 안고 있기는 하지만, CFC와 HCFC의 사용규제로 인해 사용할 수 있는 냉매가 제한되어 있는 상황에서, 우수한 열적 성능과 넓은 사용범위 등의 장점을 고려할 때 향후에도 사용 가능한 유망한 물질로써 생각된다.⁽²⁾ 이러한 이유로 암모니아-물 혼합물을 작동유체로 하는 시스템들에 관한 많은 연구가 진행되었다.

Yoon et al.⁽⁴⁾과 Jeong⁽⁵⁾은 암모니아-물 GAX 흡수식 냉동사이클의 해석 모델을 제시하였으며, Kang et al.⁽⁶⁾은 응용목적에 따라 시스템을 성능 향상모드 또는 저온획득모드로 운전할 수 있는 차세대 하이브리드 GAX 사이클에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, Chang et al.⁽⁷⁾은 자신이 제시한 revised VX 사이클에 대하여 정상상태의 사이클 해석을 수행하여 5 RT의 냉동용량을 갖는 사이클을 설계하고, 내부열교환기(용액열교환기, 냉매열교환기, 그리고 정류기)의 UA의 변화와 열원과 냉각수의 온도가 냉동기의 성능에 미치는 영향을 고찰하였으며, Kim et al.⁽⁸⁾은 확산형 흡수식 냉장고에 대한 사이클 해석을 수행하여 암모니아 수용액의 증진농도, 흡수기 입출구에서의 농도차 및 보조가스의 봉입압력을 변수

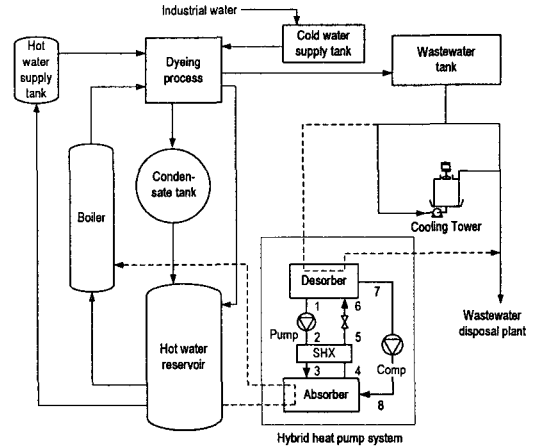


Fig. 1 Hybrid heat pump system.

로 하여 시스템의 운전 특성을 살폈다. 이외에도, 시스템의 성능 향상을 위한 연구로서, Jeong et al.⁽⁹⁾은 암모니아-물 흡수식 시스템에 이젝터를 적용함으로써 저온에서의 성능 향상 가능성을 제시하기도 하였다.

Fig. 1에 염색공정의 온, 폐수 흐름의 개념도 및 암모니아-물 하이브리드 히트펌프 사이클의 개념도를 나타내었다. 기존 시스템의 경우, 염색공정에서 사용된 증기는 응축수가 되어 온수조(약 30~50℃)로 이송되며, 공업용수와 함께 보일러를 지나면서 가열되어 다시 염색공정으로 공급된다. 한편, 각 공정에서 사용되고 버려지는 폐수는 폐수조(약 35~50℃)에 모이게 되고, 폐수조에 모인 폐수는 냉각탑으로 보내어 냉각시켜서 배출한다.

이와 연계하여 본 연구에서 고려하고 있는 하이브리드 히트펌프 시스템의 작동원리는 다음과 같다. 우선, 발생기에서는 팽창밸브를 통과하여 저온, 저압이 된 암모니아-물 혼합물 중 주로 증기압이 높은 암모니아가 저온의 염색폐수를 열원으로써 6→1까지의 구간에 걸쳐 증발하게 되며 이 과정에서 물도 소량 증발한다. 이렇게 생성된 증기는 압축기를 통해 압축되며(7→8) 남아 있는 회용액은 펌프를 통해 압축되어 고압의 용액이 된다(1→2). 이렇게 압축된 증기와 고압 용액이 흡수기에서 만나고 흡수과정이 발생한다(3→4). 흡수기에서 증기의 흡수가 일어나는 동안 발생하는 흡수열은 고온의 염색 공정수(약 90℃)를 제조하는 데 사용된다. 다음, 농용액은 팽창밸브를 통해 압력이 낮아지고 발생기로 다시 돌아가는

과정을 이루게 된다. 또한 용액 열교환기에서는 온도가 높은 농용액(4→5)과 온도가 낮은 희용액(2→3) 사이에 열교환이 이루어진다.

3. 시스템 시뮬레이션

전술한 바와 같이 본 연구의 주 목적은 하이브리드 히트펌프 시스템이 여러 열매개변수 및 공정수의 온도조건하에서 어떠한 성능계수 및 운전조건을 갖는지를 조사하여, 하이브리드 히트펌프의 적용 가능성을 살피는 것에 있다. 즉, 본 연구의 시뮬레이션을 통하여 얻을 수 있는 것은 주요 변수의 변화에 대한 시스템의 특성변화이며, 실제 구성요소의 물리적인 형상 및 크기를 결정하기 위해서는 별도의 해석이 수반되어야만 한다.

시스템 시뮬레이션을 위하여 우선 시스템을 이루는 각 구성요소를 모델링하였다. 흡수기와 발생기의 경우 주어진 UA 및 질량보존식(mass balance), 에너지보존식(energy balance), 그리고 물질보존식(species balance)을 사용하여 모델링하였다. 이때 흡수기와 발생기 출구는 포화상태이며, 흡수기의 처음 부분에서 용액과 증기가 서로 만나 평형상태에 도달할 때까지의 과정을 단열과정으로 가정하였다.⁽¹⁾

용액 열교환기의 경우, 농용액과 희용액 양측에 대하여 핀치점까지의 전열량을 각각 계산하여 이중 더 적은 값을 최대 열교환량으로 정의한 다음, 주어진 UA 와 ϵ -NTU 관계식을 이용하여 해석하였다. 팽창밸브는 등엔탈피 과정으로 생각하였으며, 압축기와 펌프는 일정 단열효율을 갖는 것으로 가정하였다. 이상에서, 열교환기 내의 압

Table 1 Input parameters

Q_{des} [kW]	100
P_{abs} [kPa]	1500~2100
UA_{abs} [kW/K]	15
UA_{des} [kW/K]	10
UA_{shx} [kW/K]	0.1
$T_{sink,in}$ [°C]	50
$T_{sink,out}$ [°C]	90~60
$T_{src,in}$ [°C]	50
$T_{src,out}$ [°C]	20~40
η_{comp} [%]	70
η_{pump} [%]	65

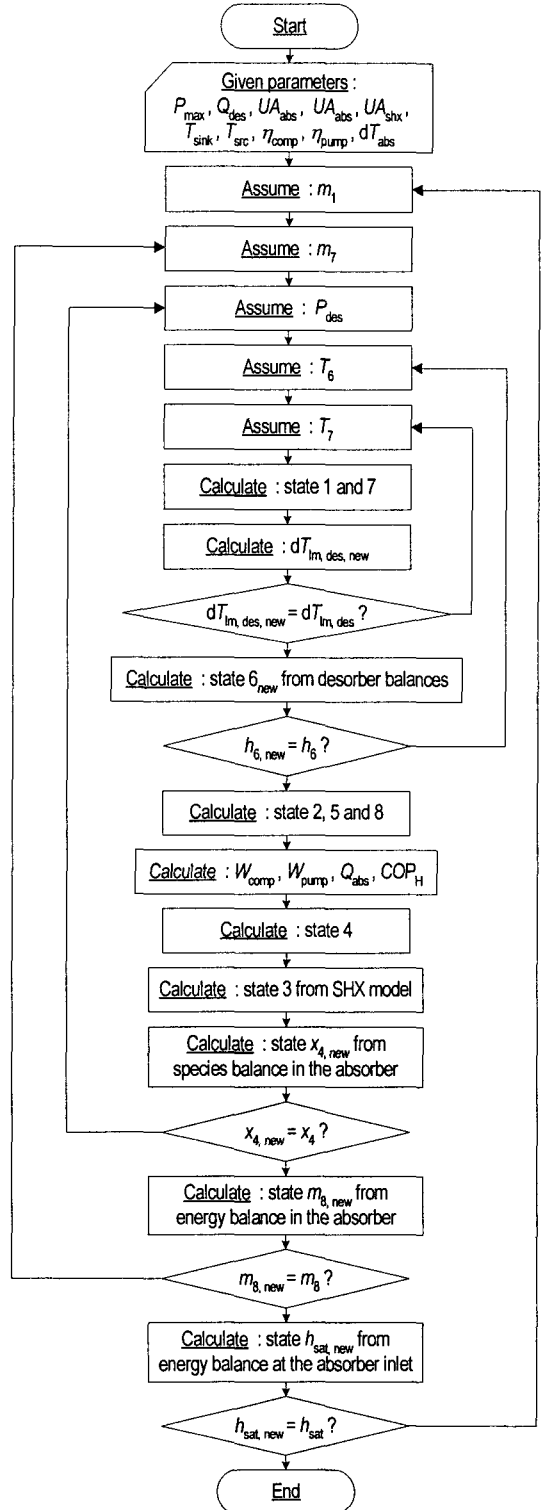


Fig. 2 Simulation flowchart for hybrid system.

력강하와 배관에서의 열량손실 및 압력강하는 무시하였다. 본 연구에서는 EES(Engineering Equation Solver) V6.646을 이용하여 이상의 모델링을 수식화하였으며, 이를 연계하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 수행을 위한 기본 입력변수들의 값은 Table 1과 같다.

기본 입력변수들의 값이 주어지면, 흡수기 내에서 냉매증기와 회용액이 만나 평형상태에 도달한 후의 온도($T_{abs,in}$)와 흡수기 출구온도(T_4)의 차로 정의되는 ΔT_{abs} (흡수기내 온도구배= $T_{abs,in} - T_4$)를 바꾸어 가며 시스템 시뮬레이션을 수행할 수 있다. ΔT_{abs} 를 바꾸어 가며 시뮬레이션을 수행하는 이유는 ΔT_{abs} 가 흡수기 압력과 더불어 하이브리드 히트펌프의 성능을 결정하는 가장 중요한 인자로 평가되고 있기 때문이다.⁽¹⁾ 실제 시스템에 있어서 ΔT_{abs} 는 각 구성요소의 물리적인 크기, 압축기 및 펌프의 회전수, 암모니아 농도 및 주입량 등에 따라 결정된다. 즉, 시스템 하드웨어 및 외부 열전달 유체의 작동조건이 고정되어 있다면 암모니아 농도와 주입량에 따라 ΔT_{abs} 를 결정할 수 있다.

기존의 연구자들^(1,2)은 흡수기의 열량을 고정하고 계산을 시도하였으나, 본 연구에서는 실제 염색공정의 폐수온도와 유량이 거의 일정함을 고려하여, 폐수로부터 얻을 수 있는 에너지량인 발생기의 열량을 일정한 조건으로 하여 계산을 수행하였다. 또한, 고려 대상 공정의 실제 하계 운전 조건을 감안하여 폐수조의 온도와 온수조의 온도를 시뮬레이션에 그대로 반영하였으며, 시뮬레이션 과정을 Fig. 2에 나타내었다.

시스템 시뮬레이션 수행 결과로서, 각점의 상태(온도, 농도, 압력, 엔탈피, 유량), 흡수기 열량, 압축기 및 펌프 일량, 그리고 식(1)로 표현되는 시스템 성능계수를 얻을 수 있다.

$$COP_H = \frac{Q_{abs}}{W_{comp} + W_{pump}} \quad (1)$$

4. 시뮬레이션 결과

하계의 일반적인 운전 패턴이 될 것으로 예상되는 온수조의 온도($T_{sink,in}$) 50℃, 생산공정수의 온도($T_{sink,out}$) 90℃, 폐수조의 온도($T_{src,in}$) 50℃ 및 폐수 출구의 온도($T_{src,out}$) 20℃의 조건에 대하여,

흡수기의 압력이 1,700 kPa인 경우 ΔT_{abs} 변화에 따른 하이브리드 히트펌프의 성능계수를 동일 열원 온도에서 작동하는 카르노 히트펌프 사이클, 로렌츠 히트펌프 사이클 및 기존 R134a 적용 히트펌프 사이클의 성능계수와 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 이때 카르노 사이클 저온부 및 고온부의 온도가 각 열원 출구의 온도와 핀치(pinch)되는 것으로 계산하였으며, 로렌츠 사이클의 경우 이론 최대효율을 상정하여 열원의 온도와 사이클의 온도가 일치하는 것으로 계산하였다. 기존 R134a 사이클의 경우, 응축 및 증발기 출구는 포화된 것으로 가정하였으며, 응축 및 증발온도와 각 열원 출구 온도차를 3℃로 가정하였다. 또한, 압축기 효율은 하이브리드 시스템의 압축기 효율과 동일한 것으로 생각하였다.

열원들의 온도구배가 30~40℃에 이르므로, 로렌츠 사이클의 성능계수가 카르노 사이클의 성능계수에 비하여 매우 높으며, 로렌츠 사이클의 원리를 구현하기 위한 하이브리드 사이클은 흡수기내 온도구배(ΔT_{abs})의 변화에 따라 변화하나 상기 조건에서 약 3~4수준의 성능계수를 갖는다. 한편, R134a 히트펌프 시스템의 성능계수는 약 2.2수준으로 하이브리드 사이클의 50~60% 수준이다. 더욱이, 상기 조건에서의 응축압력은 3,452 kPa로서, 사실상 거의 불가능한 운전조건이라 할 수 있다. 하이브리드 히트펌프의 성능계수는 ΔT_{abs} 의 영향을 많이 받는데, 이는 주로 공정수 온도구배와의 상호관계에 기인한다.⁽¹⁾ 즉, 하이브리드 히트펌프는 혼합매체를 작동유체로 사용하므로 이론적으로는 ΔT_{abs} 값이 외부 열전달 유체의 온도

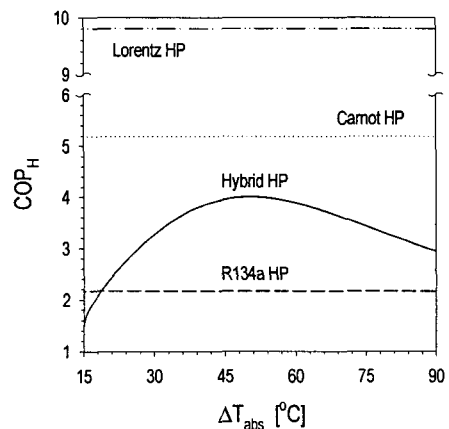


Fig. 3 COP_H comparison.

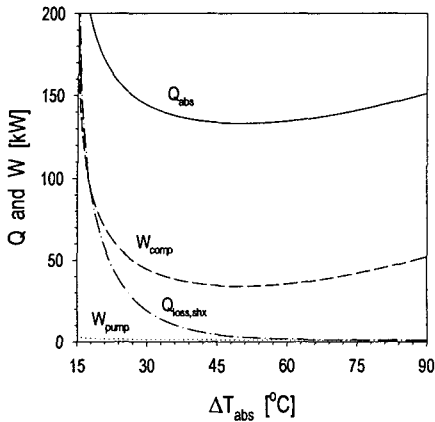


Fig. 4 Heat and work variations.

구배와 같을 때 성능이 가장 좋게 된다. 따라서, 실제의 경우에 있어서도 최적의 ΔT_{abc} 값은 외부 열전달 유체의 온도구배에 영향을 받게 된다. 최고의 COP_H 값이 존재하는 직접적인 이유는 ΔT_{abc} 에 따라 시스템의 일량과 열량이 변화하기 때문이며, 이러한 관계를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4는 동일 조건에서 ΔT_{abc} 의 변화에 따른 흡수기 열량 변화, 용액 열교환기에서의 손실열량 변화, 압축기일 변화, 그리고 펌프일 변화를 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 공정수의 온도구배 및 기타 운전조건에 의하여 약 47°C의 최적 온도구배에서 최소의 압축기일과 흡수기 열량을 나타내며, 최적점을 기준으로 온도구배가 증가할 경우 압축기일 및 흡수기 열량이 완만한 증가세를 나타낸다. 이는 공정수의 온도구배가 일정한 상황에서, 흡수기의 온도구배가 점차 증가함에 따

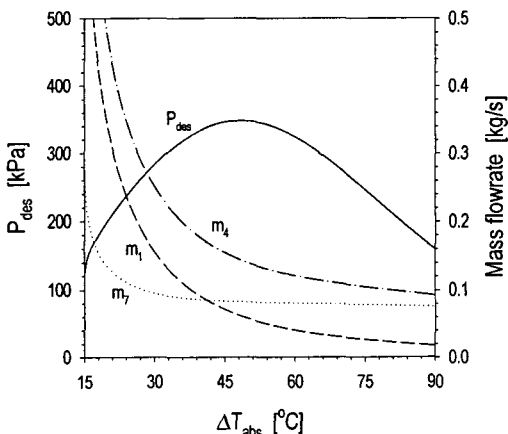


Fig. 5 P_{des} and mass flowrate variations.

라 열교환 과정에서의 비가역성이 증가하기 때문이다. 반면 최적점을 기준으로 온도구배가 감소할 경우 압축기일 및 흡수기 열량은 급격한 증가세를 보인다. 이는 크기가 무한대인 용액 열교환기에서 얻을 수 있는 전열량과 이상에서 계산된 용액 열교환기 전열량의 차로 정의되는 용액 열교환기에서의 손실열량이 급격히 증가하기 때문이다. 펌프일도 압축기일과 유사한 경향을 보이거나, 압축기일에 비하여 정량적인 크기가 작아 시스템 효율에 미치는 영향은 그리 크지 않다.

Fig. 5는 용액 열교환기 내부를 통과하는 각 용액의 유량(m_1 , m_4), 압축기 유량(m_7) 및 발생기의 압력을 나타낸 것이다. ΔT_{abc} 가 작아질수록 용액 열교환기 내에 많은 용액이 흐른다. 즉, 유한한 전열면적에 대하여 ΔT_{abc} 가 작아질수록 용액 열교환기 내부를 통과하는 용액의 양이 증가하여 열교환기의 유용도가 감소함에 따라 손실열량이 증가한다. 따라서, ΔT_{abc} 가 작은 경우에는 용액 열교환기의 크기를 늘려야만 시스템의 성능 저하를 막을 수 있다. 압축기 유량의 경우에도 ΔT_{abc} 가 작은 영역에서 급격히 증가하는 경향을 보인다. Fig. 6에 시스템 각 부의 온도를 나타내었는데, ΔT_{abc} 가 증가할수록 ΔT_{des} 도 함께 증가하는 경향을 보인다. ΔT_{abc} 가 작은 영역에서는 펌프 출구온도($\approx T_1$)와 흡수기 출구온도(T_4)의 온도차가 ΔT_{abc} 가 큰 영역에 비하여 매우 큼에도 불구하고, 용액의 유량이 많아 각 용액의 열교환 전후 온도차($T_4 - T_5$ 및 $T_3 - T_1$)가 ΔT_{abc} 가 큰 영역과 거의 비슷하다.

Fig. 7은 흡수기 압력 변화에 따른 시스템의 성

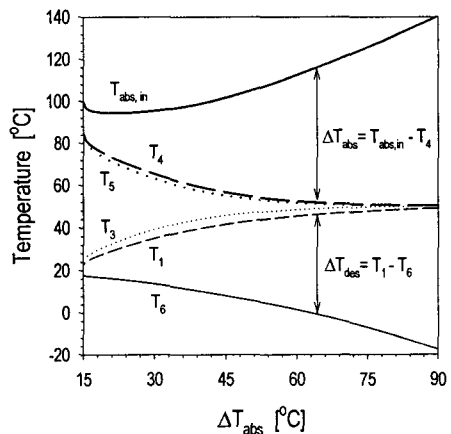


Fig. 6 Temperature variations.

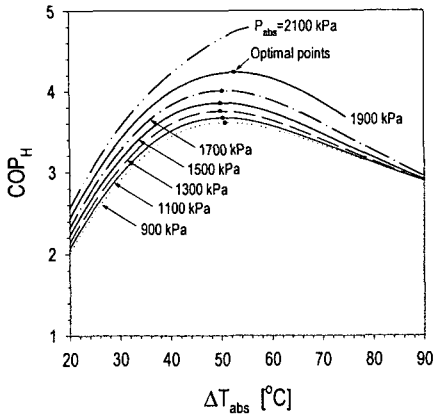


Fig. 7 COP_H variations.

능계수 변화를 나타낸다. 흡수기의 압력이 증가함에 따라 최대 성능계수는 증가한다. 이는 공정수와 폐수의 입출구 온도가 고정된 상황에서, 흡수기의 압력이 증가할수록 용액에서의 암모니아의 농도가 증가하여 단위냉매 증기당 회용액의 양, 즉 같은 양의 증기를 발생시키기 위해 필요한 회용액의 유량이 감소하여 손실열량이 줄어든기 때문이다.

또한, 주어진 흡수기 압력에 대하여 최적 성능계수를 얻을 수 있는 ΔT_{abs} 값이 서로 다른데, 이러한 현상에 관하여 Åhlby et al.⁽¹⁾은 외부 유체의 온도구배가 작은 경우만에 대한 계산 결과를 이용하여 흡수기 압력이 변화해도 최소 압력비를 갖는 ΔT_{abs} 값은 거의 일정하며, 압력이 낮아질수록 최소 압력비의 위치에 의한 영향에 비하여 손실열량과 펌프 동력의 영향이 증가하여 최적 성능

계수를 얻을 수 있는 ΔT_{abs} 값이 상승한다고 설명하였다. 즉, 흡수기의 압력이 낮아지면 최적 ΔT_{abs} 점이 오른쪽으로 이동하는 현상을 관찰하였다. 그러나, 본 연구에서는 흡수기의 압력이 1,500 kPa 이하에서만 그러한 현상이 나타났고, 그 이상에서는 반대의 경향을 나타내었다. 이는 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 흡수기의 압력이 증가하면 발생기의 압력도 증가하는데, 각각의 흡수기 압력에 대하여 최소의 압력비를 갖는 ΔT_{abs} 점이 1,500 kPa 이하에서는 약간씩 증가하긴 하나 거의 일정한 수준인데 비하여, 1500 kPa 이상에서는 점차 상승하기 때문이다. 즉, 고압에서는 손실열량과 펌프동력에 의한 영향이 미미하여 최적 성능계수를 갖는 ΔT_{abs} 의 위치가 주로 최소의 압력비를 갖는 ΔT_{abs} 의 위치에 의해 결정되며, 반면 저압으로 내려갈수록 손실열량과 펌프동력에 의한 영향이 매우 지배적이어서 최적 ΔT_{abs} 의 위치가 최소의 압력비를 갖는 ΔT_{abs} 의 위치에 비해 점점 더 높은 값으로 이동하게 된다.

Fig. 8에는 흡수기 압력변화에 따른 발생기의 압력변화뿐만 아니라, 압축기 토출가스의 온도(T_8) 변화를 함께 나타내었는데, T_8 의 경향을 살펴보면 흡수기의 압력 상승에 따른 발생기의 압력 증가는 압축기일을 줄일 뿐 아니라, 압축기 토출가스의 온도도 낮추는 긍정적인 효과를 가져올 수 있다. 그러나, 흡수기의 압력이 2,100 kPa에 이르러서도 압축기 토출가스의 온도가 약 170°C 이상되어 일반적으로 널리 사용되는 상용 오일을 적용하는 데 어려움이 있으리라 예상되므로, 가스 압축 부분을 중간냉각기 등을 적용한 2단 압

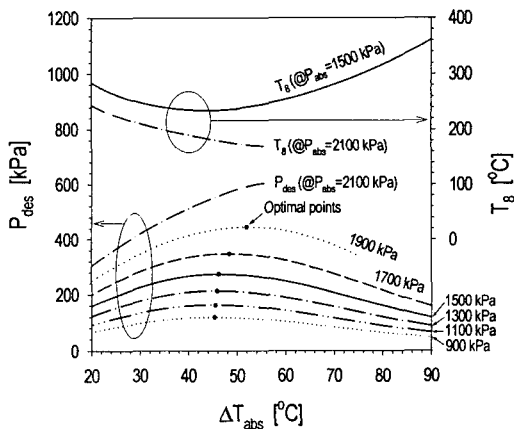


Fig. 8 Influence of P_{abs} variations.

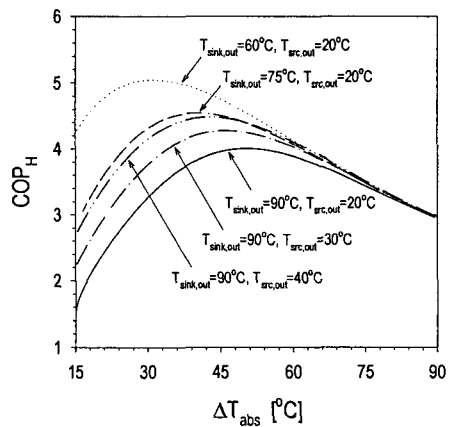


Fig. 9 Influence of $T_{sink(src),out}$ variations.

축 시스템으로 구성하는 등 대책이 마련되어야 할 것으로 사료된다.

Fig. 9에 공정수 및 폐수 입구온도가 50°C인 경우, 공정수 및 폐수 출구온도 변화에 따른 시스템의 성능계수 변화를 나타내었다. 동일 폐수 출구온도에 대하여 저온의 공정수를 생산할수록 성능계수가 높으며, 최적 ΔT_{abs} 가 작아진다. 이는 전술한 바와 같이 저온의 공정수를 생산할수록 외부 유체의 온도구배가 작아지기 때문이다. 60°C의 공정수를 생산할 경우, 성능계수는 최적점에서 약 5에 이르러, 90°C 공정수 생산시의 성능계수인 약 4에 비하여 20% 높으나, 이 경우에는 전술한 R134a 적용 히트펌프를 사용한다 하더라도 성능계수가 4.4에 이르므로, 기존 시스템에 비하여 큰 성능 향상을 기대할 수 없다. 즉, 하이브리드 시스템은 고온의 공정수를 생산할 시, 그 고유의 장점이 부각된다. 또한, 폐수 출구온도 변화에 대해서도 공정수 출구온도 변화에서와 동일한 경향을 관찰할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 염색폐수의 저온열을 활용하여 염색공정에 이용 가능한 고온의 공정수를 제조할 수 있는 하이브리드 히트펌프 시스템을 모사하여, 여러 인자들의 변화에 대한 시스템 성능계수 및 각 구성요소의 운전조건을 계산하였으며, 계산 결과를 분석하여 시스템의 적용 가능성을 살폈다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 50°C의 폐수를 20°C까지 냉각하면서 50°C의 공정수를 90°C까지 가열하는 히트펌프 시스템을 생각할 경우, 하이브리드 시스템을 적용하면 흡수기의 압력에 따라 변화하긴 하나 약 3.5~4.0 이상의 성능계수를 얻을 수 있다.

(2) 하이브리드 시스템은 외부조건에 따라 최적의 흡수기 온도구배가 존재하며, 이를 기준으로 온도구배가 증가할 경우 압축기일 및 흡수기 열량이 완만한 증가세를 나타내고, 온도구배가 감소할 경우 급격한 증가세를 보인다. 또한, 온도구배가 작은 영역에서는 용액 열교환기의 크기를 증가시키면 성능 향상을 기대할 수 있다.

(3) 흡수기 압력을 높일수록 시스템의 성능계수가 증가한다. 또한, 발생기의 압력도 흡수기 압력과 함께 증가하는 경향을 보이는데, 이는 압축

기일을 줄일 뿐 아니라, 압축기 토출가스의 온도도 낮추는 긍정적인 효과를 가져온다.

(4) 동일 폐수 출구온도에 대하여 저온의 공정수를 생산할수록 성능계수가 상승한다. 그러나, 저온의 공정수를 생산하는 경우에는 하이브리드 시스템의 고유 특성인 온도구배를 이용할 수 없어 기존 시스템에 비하여 큰 성능 향상을 기대할 수 없다.

참고문헌

1. Åhlby, L., Hodgett, D. and Berntsson, T., 1991, Optimization study of the compression/absorption cycle, *Int. J. Refrig.*, Vol. 14, pp. 16-23.
2. Jeon, K., Park, C. and Jung, D., 2001, Optimization study of the compression/absorption hybrid heat pump cycle, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 48-58.
3. Stokar, M. and Trepp, Ch., 1987, Compression heat pump with solution circuit-Part 1: Design and experimental results, *Int. J. Refrig.*, Vol. 10, pp. 87-96.
4. Yoon, J., Chae, J., Park, K., Kwon, O. and Oh, H., 1994, Computer simulation of the absorption cycle using ammonia as a refrigerant, *Proceedings of the SAREK*, pp. 126-130.
5. Jeong, S., 1995, A numerical simulation of air-cooled ammonia/water GAX absorption cooling cycle, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 488-500.
6. Kang, Y., Cho, H. and Hong, H., 2001, Hybrid GAX cycle: Performance improvement and low temperature applications, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 13, No. 10, pp. 923-929.
7. Chang, Y., Jeong, E. and Kim, B., 2001, A numerical analysis of a revised VX absorption cooling cycle, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 505-513.

8. Kim, S., Kim, Y., Peck, J. and Park, S., 2002, Cycle analysis of diffusion absorption refrigerator, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 10, pp. 817-824.
9. Jeong, J., Hwang, K., Hyun, S., Yoshikawa, C., Saito, K. and Kawai, S., 2003, Performance enhancement of absorption chiller using $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ with ejector, Proceedings of the SAREK, pp. 208-213.