

# 고온수 제조용 압축/흡수 하이브리드 히트펌프용 판형 흡수기 열전달 성능 특성 연구

안승선  
 (주)대유위니아 R&D Center 연구원  
 (SeungSun\_An@winiamando.com)

## 서론

Altenkirch는 하이브리드 히트펌프 사이클을 이용하면 에너지를 크게 절약할 수 있음을 보여 주었다. 증기 압축식 사이클은 온도구배를 지닌 열원과 냉매가 잘 맞지 않음으로 인해 성능이 저하되며 흡수식 사이클에 비해 용량 조절이 힘들다. 그러나 흡수식 사이클은 증기 압축식 사이클에 비해 성능계수가 낮다는 단점이 있다. 두 가지 사이클의 단점을

보완하고자 증기 압축식 사이클과 흡수식 사이클을 결합한 하이브리드 히트펌프 사이클이 개발되었다. 이에 따라 낮은 압력비로 넓은 온도 구간에 걸쳐 사용이 가능하게 되었고, 작동유체의 온도구배를 이용함으로써 성능계수 향상 및 작동유체의 농도변화를 통한 용량 조절이 가능하게 되었다. 본 연구에서는 암모니아/물 혼합냉매를 적용한 하이브리드 히트펌프를 이용하여 50℃ 이하의 저온 폐수로부터 80℃ 이상의 고온수를 생산하는 하이브리드

〈표 1〉 실험 조건

Process water	
Inlet temp(℃)	50
$\dot{m}$ (kg/s)	0.05623
Heat source water	
Inlet temp(℃)	50
$\dot{m}$ (kg/s)	0.05623
Compressor	
$P_{abs}(kPa)$	1200~1800
Pump	
$\dot{m}$ (kg/s)	0.145
$x(wt\%)$	46~55

〈표 2〉 판형 흡수기 형상조건

	Type 1	Type 2	Type 3
Heat transfer area (m <sup>2</sup> )	0.8		
Number of plate	32	16	10
Length(m)	0.31	0.53	0.57
Width(m)	0.11	0.11	0.19
Gap distance(m)	$0.24 \times 10^{-2}$	$0.24 \times 10^{-2}$	$0.28 \times 10^{-2}$
Aspect ratio L/D	129.17	220.83	203.57
Aspect ratio W/D	45.83	45.83	67.86

압축/흡수식 사이클에 대한 특성을 연구한다.

### 사이클 개요

그림 1은 고온수 제조용 하이브리드 압축/흡수식 사이클의 개략도이다. 재생기에서 재생된 저온저압의 암모니아 증기는 정류기를 통과하여 수분이 제거된 후 압축기를 통해 고온 고압의 증기가 된다. 암모니아 희용액은 펌프를 통해 고압의 용액이 되고 용액열교환기를 통과하여 1차적으로 온도가 상승하며, 다시 오일열교환기를 통과하여 온도가 상승하게 된다. 압축된 고온고압의 증기와 고압의 암모니아 희용액은 합류되어 믹서를 통과한 후 플레이트 흡수기로 들어가 흡수과정을 거친다. 이때 플레이트 흡수기에서는 암모니아 증기가 용액에 흡수되면서 흡수열이 발생하고 공정수와 열교환을 하게 된다. 이후 암모니아 강용액은 팽창밸브를 통해 저온저압 상태로 재생기로 들어가게 된다. 재생기로 들어온 암모니아 강용액은 열수에 의해 재생과정을 거

쳐 암모니아 증기와 용액으로 나누어지게 된다.

표 1과 표 2는 각각 본 연구에서의 실험 조건과 판형 흡수기 형상조건을 나타낸다.

### 데이터 처리 방법

판형 열교환기에서 냉각수, 암모니아 용액, 암모니아 증기의 Reynolds 수는 다음과 같이 정의된다.

$$Re_{vap} = \frac{\rho_{sol} V_{vap} d_{vap}}{\mu_{sol}} \tag{1}$$

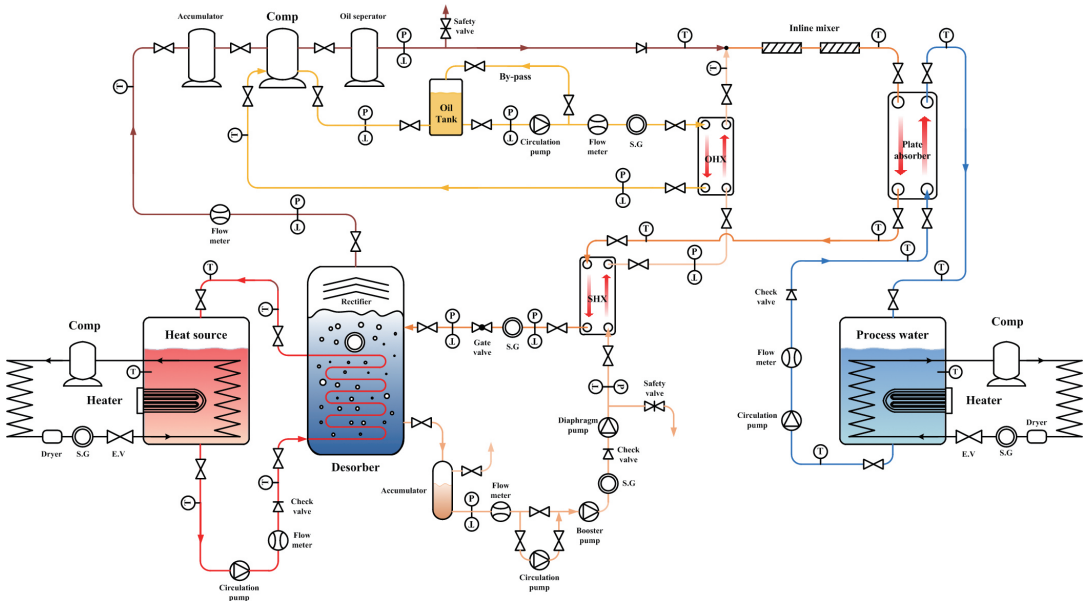
$$Re_{sol} = \frac{\rho_{sol} V_{sol} D_e}{\mu_{sol}} \tag{2}$$

$$Re_c = \frac{\rho_c V_c D_e}{\mu_c} \tag{3}$$

여기서

$$D_e = \frac{4WD}{(2W+2D)} \tag{4}$$

판형 열교환기에서 냉각수 열전달계수는 Boun-



[그림 1] 하이브리드 히트펌프 실험장치 개략도

pane et al, and Jackson and Troupe에 의해 제안된 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$Re_c \leq 400 \text{ 일 때} \\ h_c = 0.742 C_{p,c} G_c Re_c^{-0.62} Pr_c^{-0.667} \left( \frac{\mu_{c,bulk}}{\mu_{wall}} \right)^{0.14} \quad (5)$$

$Re_c > 400$  일 때

$$h_c = 0.2536 Re_c^{0.65} Pr_c^{0.4} \left( \frac{k_c}{D_c} \right) \quad (6)$$

열전달 관계식으로부터

$$Q_{abs} = U_{abs} A_{abs} \Delta T_{LMTD} \quad (7)$$

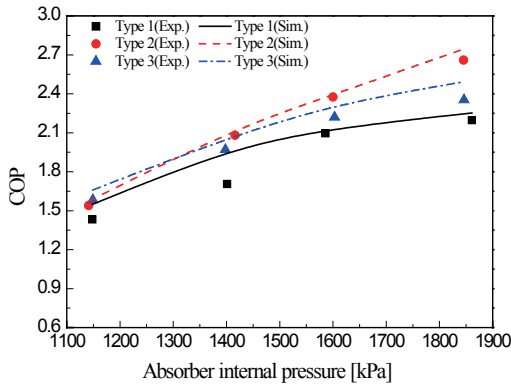
$$Q_{abs} = \dot{m}_c C_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (8)$$

여기서

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{sol,i} - T_{c,o}) - (T_{sol,o} - T_{c,i})}{\ln \left( \frac{T_{sol,i} - T_{c,o}}{T_{sol,o} - T_{c,i}} \right)} \quad (9)$$

위 식으로부터 총괄 열전달계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{abs} = \frac{Q_{abs}}{A_{abs} \Delta T_{LMTD}} \quad (10)$$



[그림 2] 흡수기 내부 압력에 따른 COP 변화(49 wt%)

$$\frac{1}{U_{abs}} = \frac{1}{h_{sol}} + \frac{t}{k_w} + \frac{1}{h_c} \quad (11)$$

성능계수(COP)는 다음과 같이 정의된다.

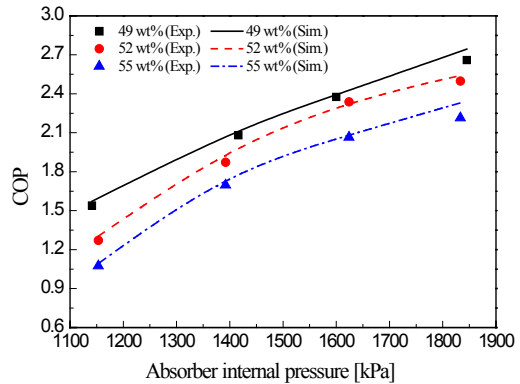
$$COP = \frac{Q_{abs}}{w_{comp} + w_{pump}} \quad (12)$$

### 실험결과

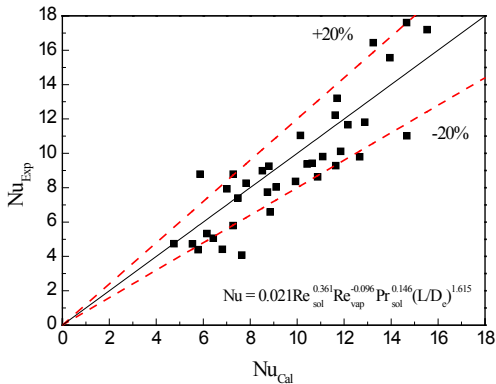
그림 2, 그림 3은 각각의 농도에서 흡수기 내부 압력과 형상에 따른 성능계수(COP)의 변화를 나타낸 그래프이다. 흡수기 내부 압력이 증가함에 따라 성능계수가 증가하는 경향을 보였다. 또한, 암모니아 수용액의 농도가 감소할수록 성능계수는 증가하였으며, type 2, 3, 1 순서대로 높은 성능계수를 나타냈다.

성능계수는 흡수기 용량과 비슷한 경향을 나타내며, 이는 성능계수는 흡수기 용량과 압축기와 펌프의 소비동력에 의해 구해지는데, 흡수기 내부 압력이 증가함에 따라 흡수기 용량은 크게 증가하지만, 압축기와 펌프의 소비동력은 약간 증가하기 때문이다.

시뮬레이션 결과와 실험결과의 차이는 대체로 0.2 이내로 나타났고, 흡수기 type 2, 흡수기 내부 압력 1850 kPa, 암모니아 희용액 농도 49 wt%에서 최



[그림 3] 희용액 농도에 따른 COP 변화(type 2)



[그림 4] 열전달 계수 상관식

대 성능계수는 2.66으로 나타났다.

본 연구에서는 암모니아/물을 이용한 압축/흡수 하이브리드 히트펌프의 흡수기로 판형 열교환기를 사용하여 실험을 진행하였으며, 이를 통해 암모니아 기포타입 흡수방식에서 판형 열교환기의 열전달계수 상관식을 도출하였으며, 판형 열교환기의 형상을 고려하기 위해 형상 조건을 무차원화 시켜 비교하였다.

$$Nu = 0.021 Re_{sol}^{0.361} Re_{vap}^{-0.096} Pr_{sol}^{0.146} \left(\frac{L}{D_c}\right)^{1.615} \quad (4-1)$$

그림 4는 계산된 누셀 수와 실험을 통해 계산된 누셀 수를 비교한 결과이다. 그래프에 나타난 바와 같이 실험적 상관식이 ±20% 내에서 대체로 만족하는 결과를 얻을 수 있었다.

## 결론

본 연구에서는 하이브리드 히트펌프 시스템의 가장 중요한 요소인 흡수기의 성능을 향상시키기 위해 열교환 효율이 높은 브레이징 타입의 판형 열교환기를 사용하였으며 최적의 성능을 갖는 열교환기의 형상을 선정하기 위해 동일한 전열면적을 가지면서 형상조건이 다른 3가지 종류의 판형 열교환기의 성능을 비교하였다.

- 1) 흡수기 내부 압력이 증가하고 암모니아 수용액의 농도가 감소할수록 흡수기 용량이 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 흡수기 내부 압력이 증가함에 따라 암모니아 수용액의 엔탈피가 증가하고, 암모니아 증기의 흡수율이 증가하기 때문이며, 암모니아 수용액의 엔탈피는 농도가 감소할수록 증가하여 흡수기 용량은 증가하였다.
- 2) 흡수기 내부 압력이 증가하고 암모니아 수용액의 농도가 감소할수록 성능계수가 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 성능계수는 흡수기 용량과 압축기와 펌프의 소비동력에 의해 구해지는데, 흡수기 내부 압력이 증가함에 따라 흡수기 용량은 크게 증가하지만, 압축기와 펌프의 소비동력은 약간 증가하기 때문이다.
- 3) 본 연구에서는 흡수기 내부압력 1850 kPa, 암모니아 희용액 농도 49 wt%에서 최대 흡수기 용량 7.3 kW, 성능계수 2.66, 냉각수 온도차 30.7°C, 암모니아 수용액 온도차 28.8°C, 냉각수 열전달계수 1.15 kW/m<sup>2</sup>K, 암모니아 수용액 열전달계수 1.91 kW/m<sup>2</sup>K로 나타났다.
- 4) 하이브리드 히트펌프의 기포타입 판형 열교환기에서 흡수기 용량, 성능계수, 냉각수와 암모니아 수용액의 온도차, 열전달계수는 흡수기의 aspect ratio(L/D)이 클수록, aspect ratio(W/D)이 작을수록 좋은 성능을 나타낸다.
- 5) 오차 범위 ±20% 내에서 만족하는 암모니아 기포타입 흡수방식에서 판형 열교환기의 열전달계수 상관식을 도출하였다.

## 참고문헌

1. Altenkirch, E., 1951, Der Einfluß endlicher Temperaturdifferenzen auf die Betriebskosten von Kompressionskälteanlagen mit und ohne

- Lösungskreislauf, Kältetechnik, Vol. 3, No. 8, pp. 201-205.
2. Åhlby, L. and Hodgett, D., 1987, Compression/absorption systems-Simulation of two cycles for different applications, Proceedings of XIIth ICR, Vienna, pp. 785-792.
  3. Groll, E.A., 1997, Current Status of Absorption/Compression Cycle Technology, ASHRAE Trans., Vol. 103, No. 1, pp. 361-375, Amrane, K., Rane, M.V. and Radermacher, R., 1991, Performance Curves for single stage vapor compression cycles with solution circuit, J. Eng. for Gas Turbines and Power, Vol. 113, No. 2, pp. 221-227.
  4. Åhlby, L., Hodgett, D.L. and Berntsson, T., 1991, Optimization study of the compression/absorption cycle, Int. J. Refrig, Vol. 14, pp. 16-23.
  5. Kang, Y.T., Christensen, R.N. and Kashiwagi, T., 1998, Ammonia-water bubble absorber with a plate heat exchanger, ASHRAE Transactions, Vol. 104, pp. 1565-1576.
  6. Buonopane, R.A., Troupe, R.A., and Morgan J.C., 1963, Heat transfer design method of plate heat exchanger, Chemical Engineering Progress, Vol. 59, p. 5.
  7. Conde, M.R., 2004, Thermophysical properties of  $\text{NH}_3+\text{H}_2\text{O}$  solutions for the industrial design of absorption refrigeration equipment, M. Conde Engineering. 