대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 D pp. 304~310 KSME 01S443

암모니아/물 흡수식 냉동기의 판형 재생기의 수치해석

지 제 환* · 정 은 수** · 정 시 영***

Numerical Analysis of a Plate Type Generator for Ammonia/Water Absorption Refrigerators

Je Hwan Ji, Eun Soo Jeong and Si-Young Jeong

Key Words: Plate type generator(판형 재생기), Counter-current(대향류), Ammonia/water(암모니아/물), Absorption refrigerator(흡수식 냉동기), Numerical analysis(수치해석)

Abstract

A numerical model which simulates the heat and mass transfer processes within a counter-current plate type generator for ammonia/water absorption refrigerators was developed. Ammonia/water solution flows downward under gravity and ammonia/water vapor generated by flow boiling flows upward. The flow pattern within the generator was assumed to be a bubbly flow, and the liquid and vapor phase were assumed to be saturated. It was shown that the boiling of ammonia occurred mainly in the upper part of the generator. The effects of the generator length, the wall temperature and the mass flow rate of ammonia/water solution into the generator on the generation of ammonia/water vapor were investigated.

기호설명

A_c : 단면적 $[m^2]$
C : 암모니아의 질량분율
$d\dot{m}$: 물질전달량 $[kg/s]$
D_h : 수력지름 $[m]$
f_i : Fanning의 마찰계수
g : 중력가속도 $[m/s^2]$
h : 비엔탈피 $[J/kg]$
h_{tp} : 유동비등 열전달계수 $[W/m^2 \cdot K]$
j : 겉보기 속도 $[m/s]$
L : 재생기의 길이 $[m]$
$\dot{m}$: 질량유량 $[kg/s]$
p : 압력 $[Pa]$
P : 접수길이 $[m]$
$\dot{Q}$: 열전달율 $[W/s]$
q'' : 열유속 $[W/m^2]$
T : 온도 $[K]$
u : z-방향 속도 $[m/s]$
z : 재생기의 길이 방향 좌표
$\triangle z$: 검사체적의 z-방향 길이 $[m]$

그리스 문자

α : 기공률
μ : 점성계수 $[Pa \cdot s]$
ρ : 밀도 $[kg/m^3]$
σ : 표면장력 $[N/m]$

하첨자

* 홍익대학교 대학원
** 홍익대학교 기계 · 시스템디자인공학과
*** 서강대학교 기계공학과

g : 기체
i : 검사체적의 번호
l : 액체
NH_3 : 암모니아
$total$: 암모니아+물
w : 재생기 벽면

1. 서 론

흡수식 열펌프는 하절기의 전력 수요를 경감시킬 수 있고, 오존층 파괴의 주요인인 CFC계 냉매를 사용하지 않으며, 시스템의 효율이 높다는 장점들을 갖고 있어서 중·대형 건물의 냉난방에 널리 사용되고 있다. 최근에는 가정용 및 소형 상업용으로 암모니아/물을 사용하는 흡수식 열펌프를 개발하려는 연구들이 활발히 진행되고 있다.[1]

암모니아/물 흡수식 시스템에서 재생 과정을 통하여 생성되는 암모니아/물 혼합 증기의 암모니아 농도는 시스템의 냉동 능력과 성능계수를 결정하는 주요 인자이므로[2], 재생기의 성능은 시스템의 성능에 큰 영향을 미친다. 재생기에서 생성되는 혼합 증기의 암모니아 농도를 높이기 위해서는 대향류 재생 과정을 채택하는 것이 유리하다. 암모니아 수용액의 비등을 통하여 발생되는 암모니아/물의 혼합 증기가 재생기로 공급되는 상대적으로 온도가 낮은 암모니아 수용액에 의하여 정류될 수 있기 때문이다. 또한, 열 및 물질 전달을 향상시키고 시스템의 소형화를 위하여 판형 열교환기를 재생기로 사용하려는 연구들이 진행되고 있다.[1,2] 100°C 이하의 저온 열원을 이용하는 흡수식 시스템의 경우 미소 온도차를 이용하여 저온 열원의 에너지를 최대한 회수하고 암모니아/물 혼합 증기를 발생시켜야 하므로, 채택할 수 있는 재생기의 구조는 열 및 물질 전달 특성이 우수한 대향류 판형 열교환기로 제한된다.

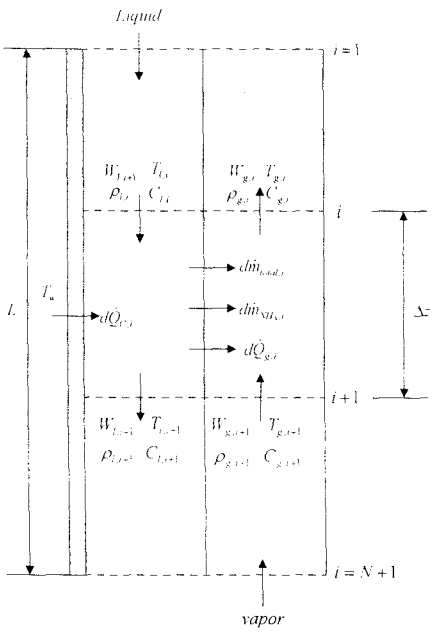

Fig. 1 Schematic of a plate type generator.

재생기의 열 및 물질 전달 특성에 대한 연구는 예상외로 그다지 많지 않다.[3] 리튬브로마이드/물 흡수식 시스템의 경우 재생기는 소용량을 중심으로 발생 증기의 상승 효과를 이용하는 기포 제트(bubble jet)형이 사용되었으며, 비등 특성에 대한 실험적 연구가 수행되었다.[3,4] Furukawa 등[5]은 재생기 내부의 유동비등 열전달 과정에 대한 실험에서 기포 유동을 기공률을 측정하여 해석하였다. Shailesh 등[6]은 유동비등형 동향류(concurrent) 재생기와 유하액막식 흡수기로 이루어진 GAX(Generator Absorber heat eXchange) 성분을 해석할 수 있는 해석 프로그램을 제시하였다.

본 연구에서는 암모니아/물을 작동 유체로 사용하는 흡수식 시스템의 대향류 판형 재생기에서 일어나는 열 및 물질 전달 현상을 수치적으로 해석하였다. 액상과 기상에 분리유동 모델(separated flow model)을 적용하였으며, 드리프트-플럭스 모델(drift-flux model)을 사용하여 기공률(void fraction)을 구하였다. 이 모델을 이용하여 재생기 내부의 온도, 암모니아의 질량분율, 그리고 기공률의 분포를 구하였다. 또한, 재생기 벽의 온도, 재생기의 길이, 그리고 재생기로 들어오는 암모니아 수용액의 질량유량이 재생기의 성능에 미치는 영향을 알아보았다.

2. 해석 모델

Fig. 1은 대향류 판형 재생기의 개략도를 나타낸다. 재생기의 상부로 공급되는 암모니아 수용액은 중력에 의하여 하부로 유동하면서 외부 열

원에 의하여 가열되고, 비등과정에 의하여 생성되는 기포는 상향 유동하므로 기/액 2상 대향류 유동이 형성된다. 혼합 증기는 상향 유동하면서 상대적으로 온도가 낮은 암모니아 수용액에 의하여 냉각되므로 온도가 낮아지고 혼합 증기의 암모니아 농도는 높아진다.

본 연구에서 사용한 주요 가정들은 다음과 같다.

(1) 재생기 벽의 온도는 일정하다.

(2) 암모니아 수용액과 암모니아/물 혼합 증기는 포화 상태이다.

(3) 액상에서 기상으로의 물질 전달은 액체의 비등에 의하여 일어나므로 암모니아 수용액과 기포 사이의 열 및 물질 전달의 저항들은 무시할 수 있다.[6]

(4) 재생기 내부의 유동 양식은 기포류(bubbly flow)이다.

(5) 재생기에서 생성된 기포는 모두 상향 유동한다. 즉, 재생기의 하단으로 나가는 기포는 없다.

2.1 지배방정식

Fig. 1에 나타낸 검사체적 내부의 액상과 기상에 각각 질량보존, 암모니아의 질량보존, 그리고 에너지보존 법칙들을 적용하면 다음과 같다.

$$\rho_{l,i}\, j_{l,i}\, A_c - \rho_{l,i+1}\, j_{l,i+1}\, A_c = d\,\dot{m}_{total,i} \tag{1}$$

$$\rho_{g,i}\, j_{g,i}\, A_c - \rho_{g,i+1}\, j_{g,i+1}\, A_c = d\,\dot{m}_{total,i} \tag{2}$$

$$\rho_{l,i}\, j_{l,i} C_{l,i}\, A_c - \rho_{l,i+1}\, j_{l,i+1} C_{l,i+1}\, A_c = d\,\dot{m}_{NH_3,i} \tag{3}$$

$$\rho_{g,i}\, j_{g,i} C_{g,i}\, A_c - \rho_{g,i+1}\, j_{g,i+1} C_{g,i+1}\, A_c = d\,\dot{m}_{NH_3,i} \tag{4}$$

$$\rho_{l,i}\, j_{l,i} h_{l,i}\, A_c - \rho_{l,i+1}\, j_{l,i+1} C_{l,i+1}\, A_c + d\,\dot{Q}_{c,i} - d\,\dot{Q}_{g,i} = 0 \tag{5}$$

$$\rho_{g,i}\, j_{g,i} h_{g,i}\, A_c - \rho_{g,i+1}\, j_{g,i+1} h_{g,i+1}\, A_c - d\,\dot{Q}_g = 0 \tag{6}$$

여기서 암모니아 수용액의 겉보기 속도 j_l의 양의 방향은 하향 유동이고, 기체의 겉보기 속도 j_g의 양의 방향은 상향 유동이다.

기포류에 대한 압력 강하는 다음과 같이 표현된다.[7]

$$p_{i+1} - p_i = [(1-\alpha_i)\rho_{l,i} + \alpha_i \rho_{g,i}] g \triangle z - \frac{2 f_i \triangle z}{D_h} \rho_{l,i} u_{l,i}^2 \tag{7}$$

식 (7)의 우변의 첫 번째 항은 중력에 의한 압력 상승, 두 번째 항은 마찰에 의한 압력 강하를 각각 나타낸다.

식 (1)과 (2), 식 (3)과 (4), 그리고 식 (5)와 (6)에서 다음의 관계들을 각각 구할 수 있다.

$$\rho_{l,i+1} j_{l,i+1} - \rho_{g,i+1} j_{g,i+1} = \rho_{l,i} j_{l,i} - \rho_{g,i} j_{g,i} \tag{8}$$

$$\rho_{l,i+1} j_{l,i+1} C_{l,i+1} - \rho_{g,i+1} j_{g,i+1} C_{g,i+1} = \rho_{l,i} j_{l,i} C_{l,i} - \rho_{g,i} j_{g,i} C_{g,i} \tag{9}$$

$$\rho_{l,i+1} j_{l,i+1} h_{l,i+1} - \rho_{g,i+1} j_{g,i+1} h_{g,i+1} = \rho_{l,i} j_{l,i} h_{l,i} - \rho_{g,i} j_{g,i} h_{g,i} + \frac{d\,\dot{Q}_c}{A_c} \tag{10}$$

식 (8)과 (9)에서 액상과 기상의 겉보기 속도(superficial velocity)를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$j_{l,i+1} = [\rho_{l,i} j_{l,i} (C_{g,i+1} - C_{l,i}) - \rho_{g,i} j_{g,i} (C_{g,i+1} - C_{g,i})] / [\rho_{l,i+1} (C_{g,i+1} - C_{l,i+1})] \tag{11}$$

$$j_{g,i+1} = [\rho_{l,i} j_{l,i} (C_{l,i+1} - C_{l,i}) + \rho_{g,i} j_{g,i} (C_{g,i} - C_{l,i+1})] / [\rho_{g,i+1} (C_{g,i+1} - C_{l,i+1})] \tag{12}$$

드리프트-플럭스 모델에서 기공률 α는 다음과 같이 표현된다.[8]

$$\alpha = \frac{j_g}{C_0(j_g - j_l) + u_{gj}} \tag{13}$$

대향류 기/액 2상 유동에서 기포류는 기공률이 0.3이하일 경우에만 존재할 수 있다.[8] 기포류에 대하여 C_0=1.0이고, 기포와 주위 액체의 상대속도 u_{gj}는 다음과 같이 표현된다.[9]

$$u_{gj} = 1.53\left[\frac{\sigma g(\rho_f - \rho_g)}{\rho_f^2}\right]^{1/4} \tag{14}$$

2.2 열전달 관계식과 마찰계수

재생기 벽과 암모니아 수용액 사이의 열전달율은 Jung 등[10]이 제시한 혼합 냉매의 2상 강제대류 비등 열전달계수를 사용하여 구하였다. 재생기 내부의 압력강하를 구하기 위해 Fanning의 마찰계수[11]를 사용하였다

3. 수치해석 방법

암모니아 수용액의 입구에서 출구 방향으로 계산을 수행하였다. 입구($z=0$)의 기공률 α_1을 가정하여 출구($z=L$)에서의 기상의 겉보기 속도 $j_{g,N+1}$가 0이 될 때까지 반복 계산하였다. 계산 순서는 다음과 같다.

(1) 입구의 기공률 α_1을 가정한다($i=1$).

(2) 식 (13)에서 $j_{g,1}$을 구한다.

(3) 식 (7)에서 p_{i+1}을 계산한다.

(4) T_{i+1}을 가정하여 $\rho_{l,i+1}$, $\rho_{g,i+1}$, $C_{l,i+1}$, $C_{g,i+1}$, $h_{l,i+1}$, $h_{g,i+1}$를 구한다.

(5) 식 (11)과 (12)에서 $j_{l,i+1}$과 $j_{g,i+1}$를 구하고, 식 (13)을 이용하여 α_{i+1}을 계산한다.

(6) 재생기 벽에서 액상으로의 열전달율 $d\dot{Q}_c$를 계산한다.

$$d\dot{Q}_c = P \cdot \Delta z \cdot q'' \tag{15}$$

$$q'' = h_{tp}\left(T_w - \frac{T_i + T_{i+1}}{2}\right) \tag{16}$$

(7) 에너지 보존식 (10)이 만족되는지 확인한다. 만약 식(10)이 만족되지 않으면 T_{i+1}을 새로 가정하여 (4)-(7)의 과정을 반복한다.

(8) $i=2,3,\ldots,N$에 대하여 (3)-(7)의 과정을 반복한다.

(9) $j_{g,N+1}=0$이 되는지 확인한다. 만약 $j_{g,N+1}$이 0이 아니면 α_1을 다시 가정하여 (2)-(8)의 과정을 반복한다.

4. 결과 및 고찰

Table 1은 본 연구에서 사용된 판형 재생기의 제원과 기준 작동조건들을 보여준다. 암모니아/물 혼합물의 물성치는 Ziegler 등[12]이 제시한 관계식을 사용하여 구하였다.

Fig 2는 온도의 길이 방향 변화를 보여준다. 재생기 내부의 상태를 포화상태로 가정하였기 때문에 액상과 기상의 온도는 같다. 벽면의 온도가 일정하므로 재생기의 상부에서 온도가 급격하게 상승하고, 하부로 갈수록 온도의 변화가 작아지는 것을 볼 수 있다.

벽면에서 액상으로의 열유속과 액상에서 기상으로의 열유속, 그리고 액상에서 기상으로 비등하는 암모니아의 질량유속을 Fig 3에 나타내었

표 1 Geometry and operating condition of generator.

Parameter	
Length (m)	0.76
Gap (m)	0.003
Width (m)	0.1
System pressure (bar)	15.0
Solution inlet temperature (K)	348.15
Solution inlet flow rate (kg/s)	0.003
Wall temperature (K)	368.15

다. 액상에서 기상으로 전달되는 열유속과 암모니아의 질량유속은 재생기 벽과 액체의 접촉면적을 기준으로 환산된 값이다. Fig. 2에서 볼 수 있는 것과 같이 재생기 하류로 갈수록 재생기 벽과 암모니아 수용액의 온도차가 급격하게 감소하므로 열유속과 암모니아의 질량유속도 하류로 갈수록 급격하게 감소한다. 재생기 벽에서 액상으로 전달된 열의 대부분은 암모니아를 비등시키는데 사용되고, 나머지가 액체의 온도를 상승시키는데 사용되는 것을 볼 수 있다.

Fig 4는 액상과 기상의 암모니아 질량분율의 변화를 보여준다. 재생기 상부에서 액상에서 기상으로 비등하는 암모니아의 질량유속이 크므로 암모니아 수용액의 질량분율이 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 재생기를 나가는 기상의 질량분율이 약 0.99로 상당히 높은데, 이것은 기포가 상승하며 암모니아 수용액과 접촉하여 정류되기 때문으로 생각된다. 대향류 재생기에서는 발생된 기포가 암모니아 수용액과 열 및 물질 전달을 할 수 있는 기회가 제공되는데, 이 과정은 정류기에서 일어나는 정류과정과 유사하다.[13]

Fig. 5는 액상과 기상의 겉보기 속도와 기공률의 변화를 보여준다. 액상의 밀도가 기상의 밀도보다 매우 크므로 기상의 겉보기 속도의 변화에

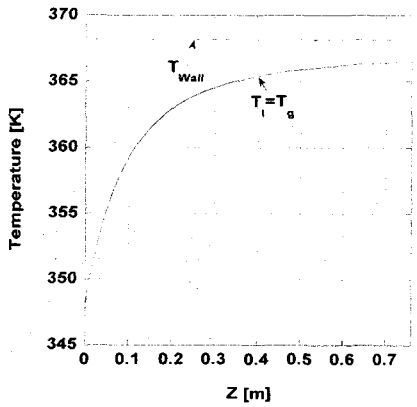

Fig. 2 Temperature profile.

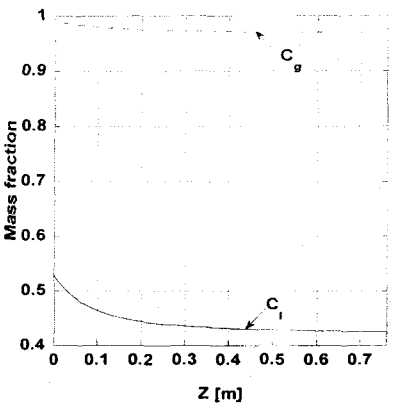

Fig. 4 Mass fraction profile.

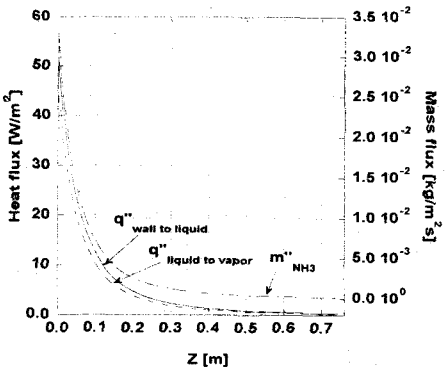

Fig. 3 Variation of heat flux and mass flux.

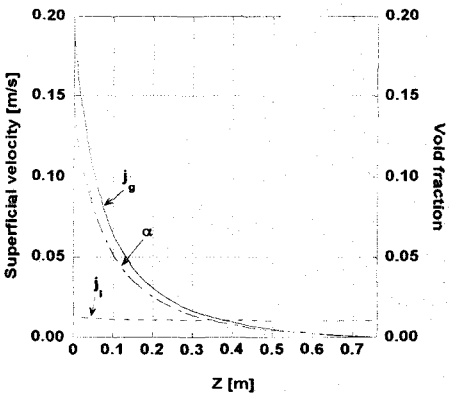

Fig. 5 Superficial velocities and void fraction.

비하여 액상의 겉보기 속도의 변화는 매우 작다. 재생기 상부에서 비등이 많이 일어나므로 재생기 상부로 갈수록 기공률과 기상의 겉보기 속도가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다.

벽면의 온도가 재생기를 나가는 기상의 질량유량 $\dot{m}_{g,out}$과 기공률 α_{out}에 미치는 영향을 Fig. 6에 나타내었다. 벽면의 온도가 높아지면 비등하는 암모니아의 양이 증가하므로 $\dot{m}_{g,out}$과 α_{out}이

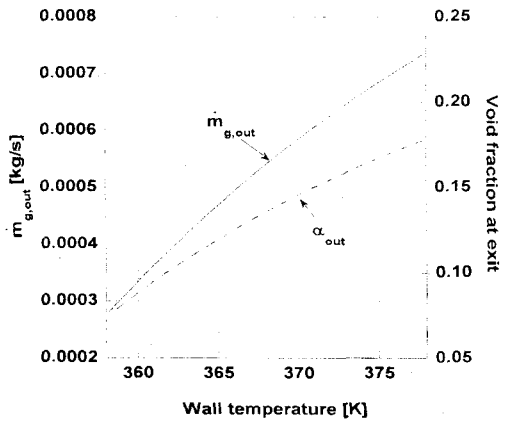

Fig. 6 Effect of wall temperature on $\dot{m}_{g,out}$ and α_{out}.

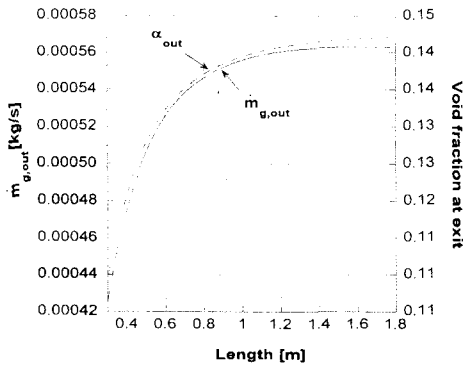

Fig. 7 Effect of generator length on $\dot{m}_{g,out}$ and α_{out}.

모두 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 재생기의 길이가 $\dot{m}_{g,out}$과 α_{out}에 미치는 영향을 보여준다. 재생기의 길이가 증가함에 따라 $\dot{m}_{g,out}$과 α_{out}은 빠르게 증가하다가 약 1 m 이후에는 그 증가율이 작아지는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 Fig. 2와 3에서 볼 수 있는 것과 같이 액상에서 기상으로의 열유속과 암모니아의 질량유속이 재생기 상부에서 대부분 일어나고, 하부로 갈수록 감소하기 때문이다.

Fig. 8은 재생기로 들어오는 암모니아 수용액의 질량유량 $\dot{m}_{l,in}$이 재생기를 나가는 기상의 질량유량 $\dot{m}_{g,out}$과 기공률 α_{out}에 미치는 영향을 보여준다. $\dot{m}_{l,in}$이 증가함에 따라 $\dot{m}_{g,out}$과 α_{out}이 모두 증가하나, $\dot{m}_{g,out}/\dot{m}_{l,in}$은 근소하게 감소하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 암모니아/물을 작동 유체로 사용하는 흡수식 시스템의 대향류 판형 재생기에서 일어나는 열 및 물질 전달 현상을 수치적으로 해석할 수 있는 수치 모델을 제시하였다. 암모니아 수용액과 암모니아/물 혼합 증기는 포화 상태로 가정하였으며, 재생기 내부의 유동 양식은 기포

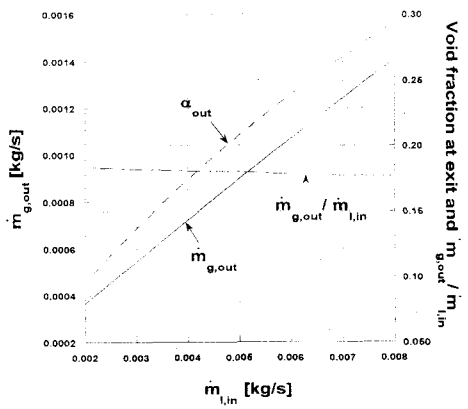

Fig. 8 Effect of $\dot{m}_{l,in}$ on $\dot{m}_{g,out}$ and α_{out}.

류로 가정하였다.

재생기 상부에서 암모니아/물 혼합물의 온도가 급격히 상승하여 재생기 벽과의 온도차가 감소하므로 재생기 하부로 갈수록 재생기 벽에서 암모니아 수용액으로 전달되는 열유속과 비등하는 암모니아의 질량유속은 급격히 감소한다. 따라서, 재생기를 길게 하는 것보다는 재생기의 길이를 짧게 하면서 여러 개를 사용하는 것이 효율적이다. 또한, 본 연구의 계산 조건에서는 재생기 벽의 온도와 재생기로 들어오는 암모니아 수용액의 질량유량이 증가할수록 재생기에서 발생되는 암모니아/물 혼합 증기의 질량유량이 증가한다.

후기

이 연구는 1999년도 한국과학재단 연구비(과제번호: 1999-2-304-007-3) 지원에 의한 결과입니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) 강용태, 1998, "미국 및 일본의 암모니아-물 흡수식 열펌프 기술(1)", 공기조화 냉동공학, 제27권, 제1호, pp. 53-74.

(2) 김병주, 정은수, 손병후, 2001, "협소 사각유로에서 대향류 2상유동의 기공률과 압력구배", 설비공학논문집, 제13권, 제4호, pp. 304-311.

(3) 박찬우, 정종수, 진성민, 정봉철, 류법상, 1998, "150RT급 흡수식 열펌프용 고온재생기의 열전달 특성 해석", 공기조화냉동공학회 '98 하계학술발표회 논문집, pp. 1512-1517.

(4) Park, C. W. and Nam, P. W., 1996, "Experiments on a regenerator with thermosyphon for absorption heat pumps," Proceedings of the 3rd KSME-JSME Thermal Engineering Conference, Oct. 20-23, Kyongju, Korea, Vol. 2, pp. 559-564.

(5) Furukawa, M., Enomoto, E. and Segokuchi, K., 1993, "Boiling heat transfer in high temperature generation of absorption chiller/heater," AES-Vol. 31, International Absorption Heat Pump Conference, pp. 518-523.

(6) Shailesh, V. P., Gomezplata, A., Papar, R. A., Anand, G. and Erickson, D. C., 1997, "GAX component simulation and validation," ASHRAE Trans., Vol. 103, Part 1.

(7) Taitel, Y. and Barnea, D., 1983, "Counter current gas-liquid vertical flow model for flow pattern and pressure drop," Int. J. Multiphase Flow, Vol. 9, No. 6, pp. 637-647.

(8) Zuber. N. and Findlay. J., 1965, "Average volumetric concentration in two-phase flow systems," Trans. ASME J. Heat Transfer, 87,453

(9) Harmathy, T. Z., 1960, "Velocity of large drops and bubbles in media of infinite or restricted extent," AIChE J., Vol. 6, pp. 281-288.

(10) Jung, D. S., McLinden, M., Radermacher, R. and Didion, D., 1989, "A study of flow boiling heat transfer with refrigerant mixture," Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 32, No. 9, pp. 1751-1764.

(11) Chen, S. J., Reed, J. G. and Tien, C. L., 1984, "Reflux condensation in a two-phase closed thermosypon," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 27, No. 9, pp. 1587-1594.

(12) Ziegler, B. and Trepp, Ch, 1984, "Equation of state for ammonia-water mixtures," International Journal of Refrigeration, Vol. 7, No. 2, pp. 101-106.

(13) Herold, K. E., Rademacher, R. and Klein, S. A., 1996, *Absorption Chillers and Heat Pumps*, CRC Press.