

계면활성제 첨가시 수평 냉각관 외부를 흘러내리는 LiBr 수용액의 열 및 물질전달 특성에 관한 연구

김 경 희, 설 신 수, 이 상 용[†]

한국과학기술원 기계공학과

A Study on Heat and Mass Transfer Characteristics of LiBr-H₂O Solution with a Surfactant Flowing over a Cooled Horizontal Tube

Kyoung Hee Kim, Sin Su Seol, Sang Yong Lee[†]

Department of Mechanical Eng., Korea Advanced Institute of Science & Technology, Taejon 305-701, Korea

(Received May 18, 2001; revision received March 19, 2002)

ABSTRACT: Heat and mass transfer characteristics of a surfactant-added LiBr-H₂O solution flowing over a single horizontal tube were examined experimentally. The parameters considered were surfactant (2-ethyl-1-hexanol) concentration, solution temperature at the top of the tube and absorber pressure. Even with an amount of the surfactant below the solubility limit, heat and mass transfer performances were enhanced tremendously. The Nusselt and Sherwood numbers increased by about 70% and 340%, respectively, when 10 ppm of the surfactant was added. However, an excess amount of the surfactant in the solution did not bring a further enhancement. The absorption performance deteriorated when the non-condensable gases were extracted from the system (by a vacuum pump) since the vaporized surfactant was also extracted during the process. Therefore, it is desirable to add a sufficient amount of the surfactant (more than 10 ppm) to maintain high performance of absorption.

Key words: Surfactant(계면활성제), Absorption(흡수), LiBr-H₂O solution(LiBr 수용액), Cooled horizontal tube(수평 냉각관)

기 호 설 명

<hr style="border: 0.5px solid black; margin-bottom: 5px;"/> <p>A : 표면적 [m²] c_p : 비열 [J/kg °C] D : 확산계수 [m²/s] d : 관 지름 [m] h : 열전달계수 [W/m²°C] k : 열전도도 [W/m °C]</p> <hr style="border: 0.5px solid black; margin-top: 5px;"/> <p>[†] Corresponding author Tel.: +82-42-869-3026; Fax: +82-42-869-8207 E-mail address: e_hyunny@cais.kaist.ac.kr</p>	<p>L : 관 길이 [m] Nu : Nusselt 수 [-] Re : Reynold 수 [-] p : 압력 [torr] Q : 체적유량 [m³/s] q'' : 열유속 [W/m²] Sh : Sherwood 수 [-] T : 온도 [°C] U : 총괄 열전달계수 [W/m²°C] W : 질량유량 [kg/s] X_s : LiBr 수용액의 농도 [wt%] X_{2E1H} : 2-ethyl-1-hexanol 농도 [ppm]</p>
--	---

x : 밀도 [kg/m^3]

그리스 문자

β : 물질전달계수 [m/s]

μ : 점성계수 [Ns/m^2]

Γ : 액막 질량유량 [kg/m s]

하첨자

2E1H : 2-ethyl-1-hexanol

A : 흡수기

c : 냉각수

i : 내부, 입구

lm : 로그 평균값

0 : 첨가제가 없는 경우

o : 외부, 출구

R : 냉매

s : LiBr 수용액

sat : 포화

t : 튜브

1. 서 론

흡수식 냉동 시스템의 전체 성능에 큰 영향을 주는 흡수기의 성능은 냉매 증기의 흡수량에 의해 결정된다. 따라서 흡수기 내부의 열 및 물질 전달 특성을 파악하고, 각 작동조건에 따른 정량적인 흡수성능을 제시함으로써 흡수기 최적설계에 유용한 자료를 제시할 수 있다. 흡수기의 열 및 물질전달을 향상시키는 방법으로 흡수제에 계면활성제를 첨가하는 방법이 널리 사용되고 있다.⁽¹⁾ 흡수제에 계면활성제를 첨가하면 표면장력이 감소하기 때문에 냉각관 적심이 향상되고, 흡수시 흡수제의 표면에 파동이 발생하기 때문에 열 및 물질전달 특성이 향상된다. 기존의 연구자들은 이러한 표면파동의 원인으로 표면장력의 변화에 의한 Marangoni 대류를 제시하였지만,⁽²⁻⁵⁾ 정확한 열 및 물질전달 촉진기구에 대해서는 아직 많은 논란이 제기되고 있다.

대용량 흡수식 냉동 시스템에서 주로 사용하고 있는 원통다관형(shell-and-tube type) 흡수기와

같이 수평 냉각관을 사용한 경우 계면활성제를 첨가했을 때의 열 및 물질전달 특성에 관한 연구가 Hoffmann et al.⁽⁶⁾과 Kyung and Herold⁽⁷⁾에 의해 수행되었다. Hoffmann et al.⁽⁶⁾은 24단의 수평 냉각관군 실험을 통하여 2-ethyl-1-hexanol의 농도 40 ppm 이상에서 열전달계수가 60~140% 향상된다고 보고하였고, Kyung and Herold⁽⁷⁾는 8단과 4단의 수평 냉각관군 실험을 통해 2-ethyl-1-hexanol의 농도 20 ppm 이상에서 열전달계수가 60% 향상된다고 보고하였다. 이러한 기존의 결과들은 수평 냉각관군 전체에 대한 흡수성능 향상에 초점을 두었고, 관군을 구성하는 수평 단일 냉각관에 대한 상세정보가 없는 관계로 흡수기 개량설계를 위한 정량적인 자료를 제시하기에는 어려움이 있다. 그러므로 단일 수평 냉각관에 대한 열 및 물질전달 특성을 연구할 필요가 있다. 단일 냉각관에서 각 변수에 대해 흡수 특성을 파악하고, 이를 관군 전체에 대해 적용한다면 흡수기 전체의 성능을 예측할 수 있으므로 단일 냉각관에 대한 연구결과는 냉각관군 최적설계의 기본자료로 활용할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 계면활성제를 첨가하였을 경우에 단일 수평 냉각관 외부를 흐르는 LiBr 수용액의 열 및 물질전달 특성을 계면활성제의 농도, 분사용액의 온도 및 흡수기 내부의 압력 등에 따라 독립적으로 파악하고, 흡수성능의 정량적인 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

실험장치는 Fig. 1과 같이 구성되었고, 냉매 흡수율은 Seol and Lee⁽⁸⁾의 방법에 따라 Fig. 2와 같이 흡수기 입/출구에서 측정된 온도와 냉각 열 유속, 흡수기 내부압력 등을 이용하여 수평 단일 냉각관 외부를 흘러내리는 LiBr 수용액 액막의 열 및 물질전달 수치균형(heat and mass balance) 관계로부터 결정되었다. Fig. 2는 점선 사이의 부분을 검사체적으로 하여 수평 단일 냉각관 외부를 흘러내리는 LiBr 수용액의 열/물질전달 수치균형관계를 나타낸 것이다. 이때 수치균형관계식과 LiBr 수용액의 상태방정식은 다음과 같다.

$$W_i + W_R = W_o \quad (1)$$

$$X_{s,i} W_i = X_{s,o} W_o \quad (2)$$

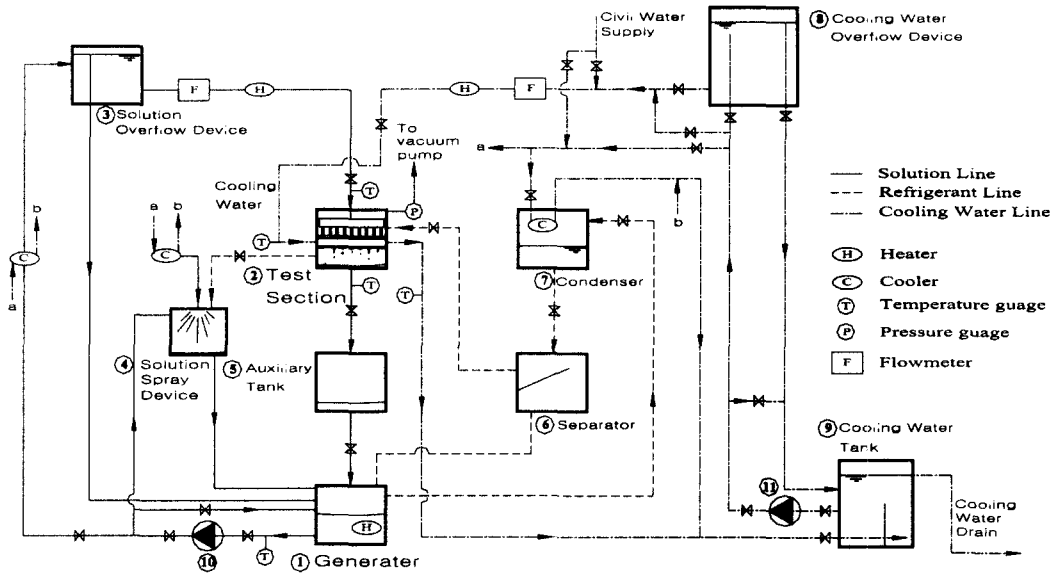


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup.

$$i_i W_i + i_R W_R = i_o W_o + q_c'' A_o \quad (3)$$

$$i_o = i_o(T_{s,o}, X_{s,o}) \quad (4)$$

식(1)은 LiBr 수용액의 질량보존식이고, 식(2)는 LiBr의 질량보존식이다. 식(3)은 에너지보존식이며 여기서 I 는 엔탈피이다. 식(4)는 상태방정식이며 용액의 엔탈피는 온도와 농도의 함수임을 의미한다. 식(1)~(4)에서 미지수는 $X_{s,o}$, W_o , i_o , W_R 의 4개이며, 냉각수로의 전열량과 출구용액의 온도는 실험에 의하여 측정된다. 나머지 값들은 입

구조조건과 주위조건에 의하여 결정되므로, 이 4개의 식을 연립하여 반복법으로 풀면 냉매증기의 흡수율을 결정할 수 있다.

열 및 물질전달계수도 Seol and Lee⁽⁸⁾의 방법에 따라 다음과 같이 결정하였다. 우선, 시험관을 통한 총괄 열전달계수 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{UA_o} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{1}{h_o A_o} + \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi k_i L} \quad (5)$$

이때 시험관 외부를 흘러내리는 흡수제의 열전달계수를 파악하기 위해서는 시험관을 통한 총괄 열전달계수 (U) 및 시험관 내부의 열전달계수 (h_i)를 알아야 한다. 시험관 내부의 열전달계수는 흡수실험과 동일한 냉각수 공급조건에서 응축실험을 통하여 구하였으며, 냉각관 내부에 전열촉진기를 사용한 경우 냉각 유속이 0.031 m/s일 때 $2970 \pm 300 \text{ W/m}^2\text{C}$ 이다. 이때 계산에 사용된 물성치는 포화온도조건에서 구하였다.

총괄 열전달계수는 시험관의 입/출구에서 냉각수의 온도와 유량으로부터 계산된 냉각 열유속으로부터 다음과 같이 구하였다.

$$\begin{aligned} q_c'' &= W_c c_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) / A_o \\ &= U \cdot \Delta T_{lm} \end{aligned} \quad (6)$$

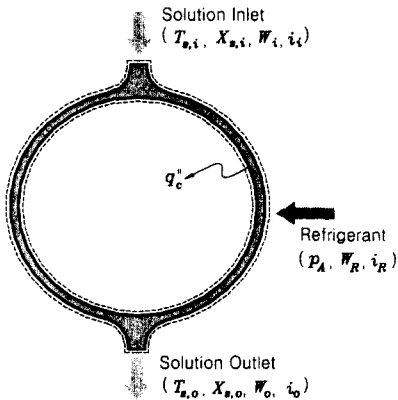


Fig. 2 Control volume of the film flow around a cooling tube.

여기서 대수평균온도차 ΔT_{lm} 은 다음과 같다.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{s,i,sat} - T_{c,o}) - (T_{s,o,sat} - T_{c,i})}{\ln \frac{(T_{s,i,sat} - T_{c,o})}{(T_{s,o,sat} - T_{c,i})}} \quad (7)$$

$T_{s,i,sat}$ 와 $T_{s,o,sat}$ 는 각각 흡수기 입/출구에서의 용액의 농도와 흡수기 압력으로부터 결정되는 포화온도($T_{s,sat} = f(p_A, X_s)$)이며 듀링(Dühring) 선도에서 구할 수 있다.

액막의 열전달 특성을 나타내는 Nusselt 수는 다음과 같다.

$$Nu = \frac{h_o d_o}{k_s} \quad (8)$$

물질전달에 사용된 식들은 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$\Delta x_{lm} = \frac{(x_{i,sat} - x_i) - (x_{o,sat} - x_o)}{\ln \frac{(x_{i,sat} - x_i)}{(x_{o,sat} - x_o)}} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{W_R}{\Delta x_{lm} A_o} \quad (10)$$

$$Sh = \frac{\beta d_o}{D} \quad (11)$$

여기서 x 는 냉매의 밀도이며 β 는 물질전달계수이다. 또한 $x_{i,sat}$ 와 $x_{o,sat}$ 는 각각 흡수기 입/출구에서 용액의 온도와 흡수기 압력으로부터 결정되는 포화밀도($x_{sat} = f(p_A, T_s)$)이다.

실험조건 및 그 범위는 Table 1에 나타낸 것과 같다.

Table 1 Experimental conditions

Parameters	Range
LiBr-H ₂ O inlet flow rate, Q_s ($\times 10^{-6}$ m ³ /s)	5.0 \pm 0.3
LiBr-H ₂ O inlet concentration, $X_{s,i}$ (wt%)	60.0 \pm 0.5
LiBr-H ₂ O inlet temperature, $T_{s,i}$ (°C)	35~47
Test chamber pressure, p_A (torr)	6~10
Cooling water temperature, $T_{c,i}$ (°C)	32.0 \pm 0.2
Concentration of 2E1H, X_{2E1H} (ppm by mole base)	0~80

3. 실험결과 및 고찰

3.1 불응축 기체 및 추기의 영향

흡수식 냉동 시스템에서 흡수제에 의한 구조물의 부식과정에서 발생하는 수소나 외부공기의 유입 등에 의해 발생하는 불응축 기체는 냉매의 흡수율을 크게 저하시킨다. 실제 흡수식 냉동 시스템에서는 시스템 내의 불응축 기체를 제거하기 위해서 진공펌프를 이용해 정기적으로 추기를 하고 있는데, 이 과정에서 냉매증기와 함께 섞여 있는 계면활성제가 시스템의 외부로 방출되어 점차 줄어들게 되기 때문에 계면활성제를 재보충해야 한다.⁽⁹⁾

본 연구에서도 계면활성제를 첨가하여 실험하던 중 시스템 내의 불응축 기체를 제거하기 위해 진공펌프로 추기를 하였고, 이렇게 추기하는 동안 계면활성제가 시스템의 외부로 방출되어 냉매 흡수율이 저하되는 현상이 관찰되었다. Fig. 3은 2-ethyl-1-hexanol을 30 ppm만큼 첨가하였을 경우 진공펌프를 사용하여 추기시간에 따른 단위면적당 냉매 흡수율의 변화를 나타낸 것으로 추기시간이 늘어남에 따라서 냉매 흡수율이 감소함을 볼 수 있다. 본 연구는 계면활성제의 농도에 따른 열 및 물질전달 특성을 파악하고 흡수성능을 정량적으로 제시하는 것을 목표로 하고 있으므로 불응축 기체의 영향으로 흡수성능이 저하되거나 추기로 인해 계면활성제의 농도가 변하는 것을 방지하는 실험방법이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 계면활성제의 첨가실험 중에 진공펌프로 강제적인 추기를 하지 않고, 시

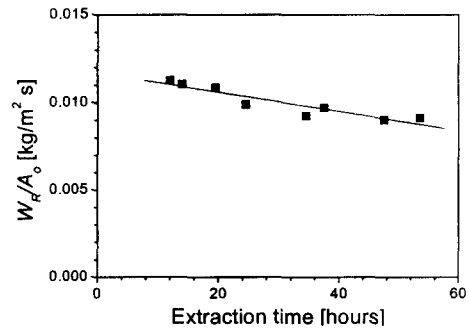


Fig. 3 Decrease of absorption rate due to distraction of non-condensable gases ($X_{2E1H}=30$ ppm, $T_{s,i}=35^\circ\text{C}$, $p_A=8$ torr).

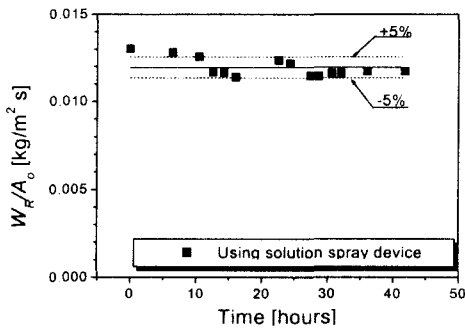
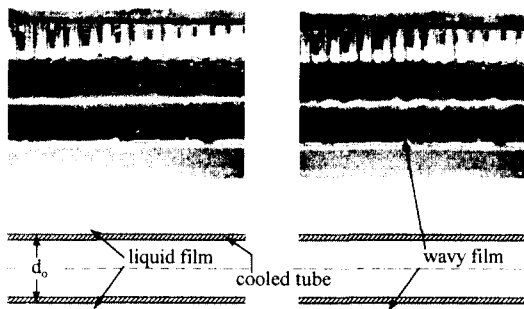


Fig. 4 Absorption rate using the solution spray device ($X_{2E1H}=30$ ppm, $T_{s,i}=35^\circ\text{C}$, $p_A=8$ torr).

협부의 불응축 기체를 저압부인 용액 분사장치 쪽으로 모이게 함으로써 계면활성제의 시스템의 부방출을 방지하고 동시에 불응축 기체의 영향도 받지 않는 실험방법을 채택하였다. Fig. 4는 용액 분사장치를 사용해 48시간 동안 냉매 흡수율을 측정된 결과로 $\pm 5\%$ 이내에서 냉매 흡수율이 대체로 일정함을 알 수 있다. 따라서 이후의 모든 실험은 계면활성제를 첨가한 후 시험부 내의 불응축 기체를 저압의 용액 분사장치로 유도하면서 각 조건별로 48시간 이내에 수행되었다.

3.2 유동현상

본 실험에서는 가시화를 통해 시험관 외부 표면에 형성된 LiBr 수용액 액막의 유동상태를 Fig. 5와 같이 관찰하였다. Fig. 5(a)는 냉매증기를 공



(a) Without absorption ($T_{s,i}=38^\circ\text{C}$, $p_A=4.5$ torr) (b) With absorption ($T_{s,i}=38^\circ\text{C}$, $p_A=5$ torr)

Fig. 5 Photographs of the solution film flowing over a cooled horizontal tube.

급하지 않은 경우로 단공노즐을 통하여 분사된 용액이 수평관 외부를 따라 흘러내려 가면서 냉각수와 열 교환을 통해 냉각되고, 냉각관 표면에서는 액막 레이놀즈수 ($Re_f=4\Gamma/\mu$)는 55 정도로서 층류 액막을 이루며, 관 하부에서도 액막의 형태로 배출됨을 알 수 있었다. 계면활성제를 첨가한 경우에 냉매증기를 공급하면 흡수가 일어나는 전 영역에서 Fig. 5(b)와 같이 수평관 축 방향으로 활발한 파동이 발생함을 관찰하였다.

3.3 계면활성제 첨가시 열 및 물질전달 특성

3.3.1 분사용액온도의 영향

Fig. 6은 분사용액온도 ($T_{s,i}$)에 따른 흡수기 출구에서의 용액온도 ($T_{s,o}$)와 냉각수에 의한 열제거량 (q_c'') 및 단위면적당 냉매의 흡수율 (W_R/A_o)을 분사용액의 온도에 따라 나타낸 것이다. 또한 Fig. 6(c)에서는 계면활성제를 첨가하지 않은 경우 분사유량 $4.5\sim 5.5\times 10^{-6}$ m³/s, 흡수기 내부압력 8 torr에서 Seol and Lee⁽⁸⁾의 결과를 같이 도시하였고, 본 연구의 실험결과와 비교적 잘 맞음을 확인하였다.

분사용액의 온도가 낮으면 용액은 냉매증기를 흡수하게 된다. 흡수가 일어날 때 분사용액온도가 증가하면 Fig. 6의 (a)와 (b)에서 볼 수 있듯이 용액의 출구온도와 냉각수에 의한 열제거량이 모두 증가한다. 냉각수의 입구온도 ($T_{c,i}$)가 일정하게 유지된 상태에서 분사용액의 온도가 증가하면 용액과 냉각수와의 온도차가 커지므로 냉각열량이 증가하게 되는 것이다. 그러나 분사용액의 온도를 더 높이면 분사용액의 온도와 농도로부터 결정되는 분사용액의 포화압력 ($p_{s,i,sat}$)이 흡수기 내부압력 (p_A)보다 커지게 되고, 따라서 분사된 용액은 바로 증발을 하게 된다. Fig. 4에서 빗금친 부분은 증발과 흡수의 경계에 해당하는 부분이다. 본 연구에서는 LiBr 수용액의 흡수 특성을 살펴보고자 했기 때문에 증발이 일어나는 부분에 대한 특별한 해석은 시도하지 않았다.

분사용액의 온도가 낮아지면 용액의 포화압력이 감소해 흡수기 내부압력과 차이가 커지므로 Fig. 6(c)에서 볼 수 있듯이 냉매 흡수율이 증가함을 알 수 있다.

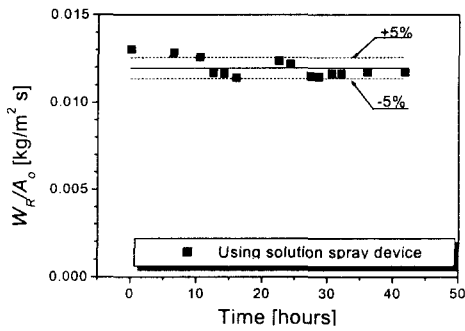
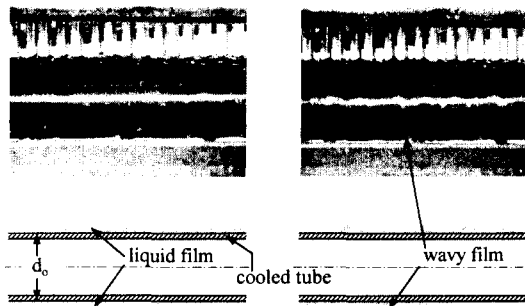


Fig. 4 Absorption rate using the solution spray device ($X_{2E1H}=30$ ppm, $T_{s,i}=35^\circ\text{C}$, $p_A=8$ torr).

힘부의 불응축 기체를 저압부인 용액 분사장치 쪽으로 모이게 함으로써 계면활성제의 시스템 외 부방출을 방지하고 동시에 불응축 기체의 영향도 받지 않는 실험방법을 채택하였다. Fig. 4는 용액 분사장치를 사용해 48시간 동안 냉매 흡수율을 측정 한 결과로 $\pm 5\%$ 이내에서 냉매 흡수율이 대체로 일정함을 알 수 있다. 따라서 이후의 모든 실험은 계면활성제를 첨가한 후 시험부 내의 불응축 기체를 저압의 용액 분사장치로 유도하면서 각 조건별로 48시간 이내에 수행되었다.

3.2 유동현상

본 실험에서는 가시화를 통해 시험관 외부 표면에 형성된 LiBr 수용액 액막의 유동상태를 Fig. 5와 같이 관찰하였다. Fig. 5(a)는 냉매증기를 공



(a) Without absorption ($T_{s,i}=38^\circ\text{C}$, $p_A=4.5$ torr) (b) With absorption ($T_{s,i}=38^\circ\text{C}$, $p_A=5$ torr)

Fig. 5 Photographs of the solution film flowing over a cooled horizontal tube.

급하지 않은 경우로 단공노즐을 통하여 분사된 용액이 수평관 외부를 따라 흘러내려 가면서 냉각수와 열 교환을 통해 냉각되고, 냉각관 표면에서는 액막 레이놀즈수 ($Re_f=4\Gamma/\mu$)는 55 정도로서 층류 액막을 이루며, 관 하부에서도 액막의 형태로 배출됨을 알 수 있었다. 계면활성제를 첨가한 경우에 냉매증기를 공급하면 흡수가 일어나는 전 영역에서 Fig. 5(b)와 같이 수평관 축 방향으로 활발한 파동이 발생함을 관찰하였다.

3.3 계면활성제 첨가시 열 및 물질전달 특성

3.3.1 분사용액온도의 영향

Fig. 6은 분사용액온도 ($T_{s,i}$)에 따른 흡수기 출구에서의 용액온도 ($T_{s,o}$)와 냉각수에 의한 열제거량 (q_c'') 및 단위면적당 냉매의 흡수율 (W_R/A_0)을 분사용액의 온도에 따라 나타낸 것이다. 또한 Fig. 6(c)에서는 계면활성제를 첨가하지 않은 경우 분사유량 $4.5\sim 5.5\times 10^{-6}$ m³/s, 흡수기 내부압력 8 torr에서 Seol and Lee⁽⁸⁾의 결과를 같이 도시하였고, 본 연구의 실험결과와 비교적 잘 맞음을 확인하였다.

분사용액의 온도가 낮으면 용액은 냉매증기를 흡수하게 된다. 흡수가 일어날 때 분사용액온도가 증가하면 Fig. 6의 (a)와 (b)에서 볼 수 있듯이 용액의 출구온도와 냉각수에 의한 열제거량이 모두 증가한다. 냉각수의 입구온도 ($T_{c,i}$)가 일정하게 유지된 상태에서 분사용액의 온도가 증가하면 용액과 냉각수와의 온도차가 커지므로 냉각열량이 증가하게 되는 것이다. 그러나 분사용액의 온도를 더 높이면 분사용액의 온도와 농도로부터 결정되는 분사용액의 포화압력 ($p_{s,i,sat}$)이 흡수기 내부압력 (p_A)보다 커지게 되고, 따라서 분사된 용액은 바로 증발을 하게 된다. Fig. 4에서 빗금친 부분은 증발과 흡수의 경계에 해당하는 부분이다. 본 연구에서는 LiBr 수용액의 흡수 특성을 살펴보고자 했기 때문에 증발이 일어나는 부분에 대한 특별한 해석은 시도하지 않았다.

분사용액의 온도가 낮아지면 용액의 포화압력이 감소해 흡수기 내부압력과 차이가 커지므로 Fig. 6(c)에서 볼 수 있듯이 냉매 흡수율이 증가함을 알 수 있다.

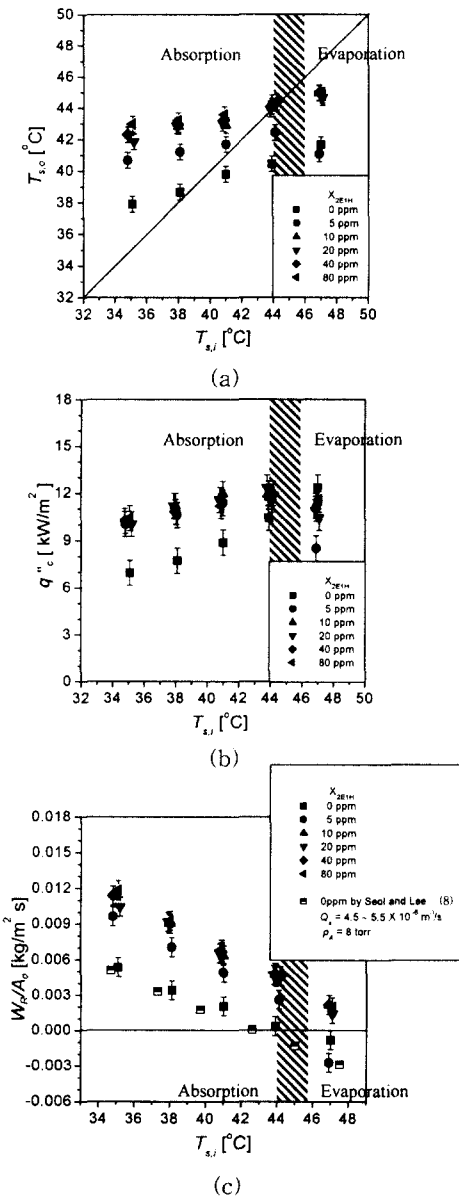


Fig. 6 Variation of the solution outlet temp., the cooling load and the absorption rate with the solution inlet temp ($p_A = 8 \text{ torr}$).

3.3.2 계면활성제 농도의 영향

계면활성제를 첨가한 경우 냉각관 외부의 액막에서 매우 활발한 파동이 일어나면서 열 및 물질전달 특성이 향상된다. 2-ethyl-1-hexanol의 60 wt%

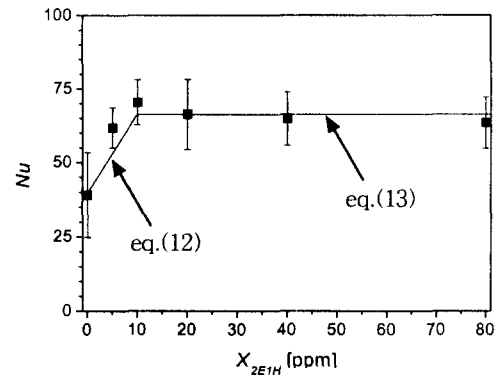


Fig. 7 Nusselt number as a function of surfactant concentration.

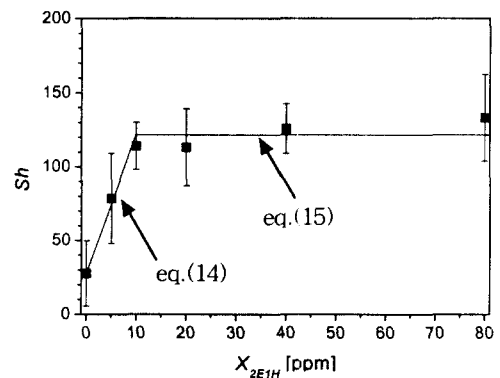


Fig. 8 Sherwood number as a function of surfactant concentration.

LiBr 수용액에 대한 용해도는 24°C에서 13 ppm(물 농도 기준) 정도이며, LiBr 수용액의 온도가 올라갈수록 증가한다.⁽¹⁰⁾ Fig. 6에서 볼 수 있듯이 용해도 이하인 5 ppm에서도 냉매 흡수율이 급격히 향상되며, 계면활성제의 농도가 증가함에 따라 냉매 흡수율이 더욱 증가함을 알 수 있다. 그러나 계면활성제의 농도 10 ppm 이후에는 계면활성제를 더 첨가하여도 냉매 흡수율은 더 이상 증가하지 않고 일정한 값을 유지한다.

Fig. 7과 8은 각 분사용액온도와 흡수기 내부 압력 조건에서 계면활성제의 농도에 대해 평균 Nusselt 수(Nu)와 평균 Sherwood 수(Sh)를 나타낸 것이다. 계면활성제의 농도 10 ppm 이하에서는 Nusselt 수와 Sherwood 수가 급격하게 증가하나, 계면활성제의 농도 10 ppm 이상에서는 Nusselt 수와 Sherwood 수가 더 이상 증가하지 않고 일

정해짐을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 계면활성제의 농도 10 ppm 이하에서 평균 Nusselt 수를 계면활성제의 농도에 대한 1차식으로 나타내었고, 10 ppm 이상에서는 계면활성제를 넣지 않은 경우의 평균 Nusselt 수(Nu_0)의 배수로 나타내었다.

$$Nu = 42.1 + 2.7X_{2E1H} \text{ for } X_{2E1H} \leq 10 \text{ ppm} \quad (12)$$

$$\frac{Nu}{Nu_0} = 1.7 \text{ for } X_{2E1H} > 10 \text{ ppm} \quad (13)$$

평균 Sherwood 수도 평균 Nusselt 수와 마찬가지로 10 ppm 이하에서는 계면활성제의 농도에 대한 1차식으로, 10 ppm 이상에서는 계면활성제를 넣지 않은 경우의 평균 Sherwood 수(Sh_0)의 배수로 나타내었다.

$$Sh = 29.0 + 9.4X_{2E1H} \text{ for } X_{2E1H} \leq 10 \text{ ppm} \quad (14)$$

$$\frac{Sh}{Sh_0} = 4.4 \text{ for } X_{2E1H} > 10 \text{ ppm} \quad (15)$$

본 실험의 경우에는 Nu_0 와 Sh_0 의 값으로 각각 39.1과 27.7이 얻어졌다.

이상의 결과에서 알 수 있듯이 계면활성제의 농도가 10 ppm 이상이 되면 계면활성제를 더 첨가하여도 흡수성능에는 영향을 주지 않지만, 3.1 절에서 언급한 것과 같이 추기에 의해 계면활성제의 농도가 감소하므로 실제 시스템에서는 사전에 충분한 양의 계면활성제를 첨가하는 것이 바람직하다.

3.3.3 흡수기 내부 압력의 영향

Fig. 9에서 계면활성제가 없는 경우와 계면활성제의 농도 80 ppm인 경우에 흡수기 내부압력과 분사용액온도에 따른 흡수기 출구에서의 용액 온도, 냉각열량 및 냉매 흡수율의 변화를 나타내었다. 분사용액의 온도가 같을 때 흡수기 내부압력이 증가하면 분사용액의 포화압력과 흡수기 내부압력의 차가 커지므로 흡수기 내부에서부터 흡수제의 기-액 자유표면으로 냉매증기의 흡수가 더 잘 일어난다. 따라서 흡수에 의해 흡수용액의 자유표면에서 온도와 냉매의 농도가 증가하므로 용액 출구온도와 냉각 열유속, 그리고 냉매 흡수율이 모두 증가한다. 또한 계면활성제를 첨가했

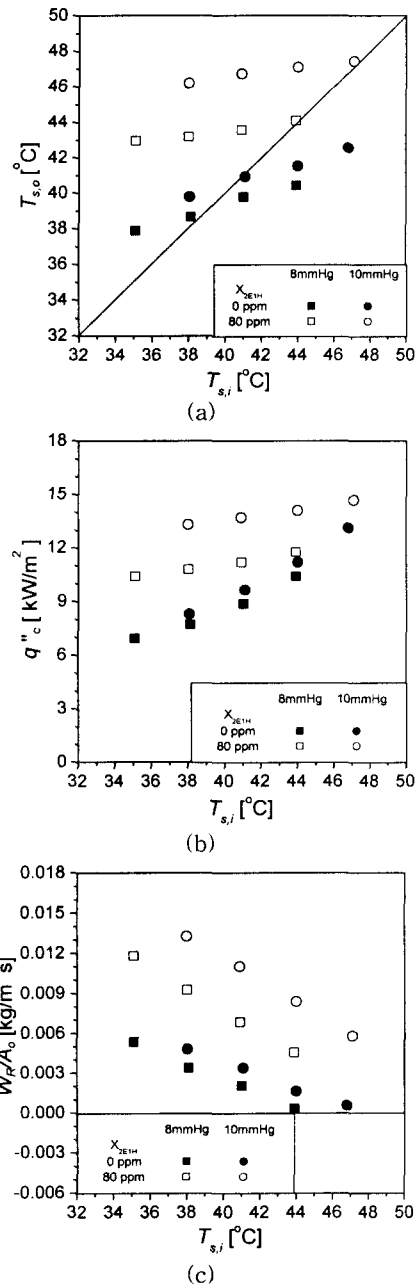


Fig. 9 Variation of the solution outlet temp., the cooling load and the absorption rate with the solution inlet temp.

을 경우에도 계면활성제를 첨가하지 않았을 경우에 비하여 용액 출구온도, 냉각 열유속 및 냉매 흡수율이 모두 크게 나타남을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 계면활성제 첨가시 계면활성제의 농도, 분사용액의 온도, 흡수기 내부의 압력 등을 변수로 하여 수평 냉각관 외부를 흘러내리는 LiBr 수용액의 열 및 물질전달 특성을 파악하고 흡수성능의 정량적인 자료를 획득하였다.

또한 계면활성제를 첨가했을 경우 불응축 기체 및 추기의 영향을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 용해도 이하에서 적은 양의 계면활성제를 첨가하더라도 LiBr 수용액의 열 및 물질전달 특성이 급격히 향상되며, 계면활성제의 농도 10 ppm 이상에서 평균 Nusselt 수는 계면활성제를 첨가하지 않은 경우의 1.7배, 평균 Sherwood 수는 4.4배의 일정한 값을 유지한다.

(2) 진공펌프로 불응축 기체를 추기할 경우 냉매증기 사이에 떠 있는 계면활성제가 시스템 외부로 방출되며 흡수성능은 감소한다. 따라서 계면활성제의 농도가 10 ppm 이상에서는 계면활성제를 추가해도 흡수성능에는 큰 영향이 없으나, 추기시 방출되는 계면활성제에 의해 흡수성능이 감소하는 것을 막기 위해 10 ppm 이상의 계면활성제를 사전에 첨가하는 것이 바람직하다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 선문대학교 공조기술지역협력연구센터(RRC)와 과학기술부 지원으로 수행하는 중점국가연구개발사업(온실가스 저감기술연구), 그리고 교육부의 BK21 프로젝트 연구비의 일부 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Ziegler, F. and Grossman, G., 1996, Review Paper: Heat-transfer enhancement by additives, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 19, No. 5, pp. 301-309.
- Kashiwagi, T., Watanabe, H., Omata, K. and Rie, D.H., 1988, Marangoni effect in the process of steam absorption into the falling film of the aqueous solution of LiBr, *Proceedings of 1st KSME-JSME Thermal and Fluid Eng. Conference*, Vol. 1, pp. 205-210.
- Hozawa, M., Inoue, M., Sato, J. and Tsukada, T., 1991, Marangoni convection during steam absorption into aqueous LiBr solution with surfactants, *J. Chemical Engineering of Japan*, Vol. 24, No. 2, pp. 209-214.
- Hihara, E. and Saito, T., 1993, Effect of surfactant on falling film absorption, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 16, No. 5, pp. 339-346.
- Kulankara, S., Verma, S. and Herold, K.E., 1999, Theory of heat/mass Transfer additives in absorption chillers, *Proceedings of the ASME, AES-Vol. 39*, pp. 199-206.
- Hoffmann, L., Greiter, I., Wagner, A., Weiss, V. and Alefeld, G., 1996, Experimental investigation of heat transfer in a horizontal tube falling film absorber with aqueous solutions of LiBr with and without surfactants, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 19, No. 5, pp. 331-341.
- Kyung, I. S. and Herold, K. E., 2000, Experimental investigation of absorber performance with and without 2-ethyl-hexanol in H₂O-LiBr absorption cycle, *Proceedings of 34th National Heat Transfer Conference*.
- Seol, S. S. and Lee, S. Y., 2000, An experimental study on flow and heat/mass transfer characteristics of LiBr-H₂O solution flowing over a cooled horizontal tube, *Transactions of the KSME, Part B*, Vol. 24, No. 8, pp. 1085-1096.
- Kim, K. J., 1993, The principle and technic of application and operation of absorption chiller-heater, *The Magazine of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, Vol. 22, No. 1, pp. 17-27.
- Kim, K. J., Berman, N. S. and Wood, B. D., 1994, Surface tension of aqueous lithium bromide+2-ethyl-1-hexanol, *J. Chemical Engineering Data*, Vol. 39, No. 1, pp. 122-124.