

垂直管內를 흘러내리는 液膜式 吸收器의
 吸收 및 熱傳達特性(第2報 熱傳達特性)

Characteristics of Absorption and Heat Transfer for Film Falling along a
 Vertical Inner Tube (2nd. Report, Characteristics of Heat Transfer)

엄 기 찬*, 이 동 호**, 최 국 광***, 柏木孝夫****, 서 정 윤*****
 K. C. Ohm, D. H. Rie, G. G. Choi, Takao Kasiwagi, J. Y. Seo

Key words : Film Reynolds number(막 레이놀즈수), Heat Transfer Coefficient(열전달계수),
 Mass Transfer Coefficient(물질전달계수), Supercooled Liquid(과냉액), Superheated Liquid(과열액)

Abstract

This is the second report of a three part study on the absorption and heat transfer characteristics of absorber, the correlation of refrigerating capacity and heating capacity. The 2nd report deals with the heat transfer characteristics of a vertical falling film type absorber of inner copper tube. The solute is LiBr-Water solution(60wt%) and the solvent is water vapor. The film Reynolds numbers are varied in the range of 35~130. The states of LiBr solution at the top of absorber are supercooled liquid and superheated liquid. The results are summarized as follows ;

Heat transfer results reveal that for the absorption of falling film, the state of LiBr solution appears to be influential in determining the heat transfer. Thus, for the state of supercooled liquid, heat transfer coefficient decreases with increasing the film Reynolds number, but in the condition of superheated liquid, it increases conversely. The mass transfer coefficients that were presented in the 1st.report and heat transfer coefficients of this paper are presented as the dimensionless correlation. The optimum water flowrate which brings about maximum value of heat flux in the film exists, and that increases with increasing the cooling water temperature.

기 호 설 명

C_p : 정압비열 (kJ/kg · K)
 d_i : 흡수기의 내경 (m)
 d_o : 흡수기의 외경 (m)
 D : 물질확산계수 (m²/s)
 G : 질량유량 (kg/s)
 h : 열전달계수 (W/m² · K)

K : 열통과율 (W/m² · K)
 $L_s = (\mu_s / \rho_s \cdot g)^{1/3}$: 응축계수의 대표길이 (m)
 L : 흡수기의 높이 (m)
 P : 압력 (mmHg)
 g : 중력가속도 (m/s²)
 Q : 전열량 (W)
 T : 흡수용액온도 (°C)
 T_c : 냉각수온도 (°C)
 v : 유속 (m/s)
 V : 체적유량 (m³/s)
 β : 물질전달계수 (m/s)
 μ : 점성계수 (Pa · s)

*인하공업전문대학 기계설계과

**인천대학교 산업안전공학과

***인천대학교 기계공학과

****日本 東京農工大 機械시스템工學科

*****인하대학교 기계공학과

ν : 동점성계수 (m^2/s)
 Γ : 단위 점액길이당 흡수용액질량 ($kg/m \cdot s$)

무차원수

$Nu = h_s \cdot L_s / k_s$: Nusselt수
 $Re = 4\Gamma_s / \mu_s$: 막 Reynolds수
 $Sh = \beta \cdot L_s / D_s$: Sherwood수
 $Pr = \mu \cdot C_p / k$: Prandtl수
 $Re_c = \nu_w \cdot d_w / \nu_w$: 냉각수의 Reynolds수

첨자

1 : 입구
 2 : 출구
 S : 흡수용액
 W : 냉각수

1. 서 론

근래에 흡수냉온수기와 흡수식 열펌프의 소형화, 공냉화, 고효율화를 위한 방안으로 4개의 주요 열교환기인 증발기, 흡수기, 재생기, 응축기 중에서, 차지하는 체적이 크고, 또한 성능에 미치는 영향이 큰 흡수기의 흡수 및 열전달 특성과 그 촉진에 관한 연구가 주요과제로 등장하고 있다. 종래에는 이 흡수기 내의 전열관 구성이 橫형이었으나, 최근 온도효율이 크고 설치면적을 작게 할 수 있는 중형 흡수기⁽¹⁾가 고안되어, 그 흡수 및 전열특성에 관한 연구가 활발히 진행되기 시작하였다. 그 초기단계로서 수직평판에 관한 수치해⁽²⁻⁴⁾ 및 실험⁽⁵⁻⁶⁾ 결과가 발표되었으며, 수직관에 관한 연구는 管外 흡수형식이 몇편^(1,3,6)에 불과하다. 더구나 보통 냉동기의 경우에는 흡수기에 공급되는 흡수용액이 과열상태이고, 제2종 흡수식 열펌프의 경우에는 과냉상태인데, 이 영향을 고려한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 저자들의 일부가 수직관내 유하액막식 흡수기의 열 및 물질전달⁽⁷⁾에 대해 흡수기 입구용액온도 및 냉각수 입구온도가 일정한 조건에서의 결과를 보고한 바 있으며, 제1보⁽⁸⁾에서는 흡수용액온도와 냉각수온도의 변화에 따른 흡수특성에 대하여 보고하였다. 본 연구에서는 제1보에 이어 수직관내 유하액막식 흡수기의 흡수용액이 과냉액과 과열액의 각 경우에 대하여, 전열특성 및 물질전달과의 상관관계를 실험적으로 究明하였다. 제3보에서는 본 열

펌프 실험장치에서, 흡수기에서의 난방능력과 증발기에서의 냉동능력과의 관계를 보고할 예정이다.

2. 실험장치 및 방법

실험장치의 구성과 실험방법은 제1보⁽⁸⁾에서 상세히 설명하였으므로 본보에서는 간략하게 설명하기로 한다. Fig. 1은 실험장치(제1보와 동일)의 개략도로서 주요 열교환기(재생기 ①, 증발기 혹은 응축기 ②, 흡수기 ③)와 稀용액조, 냉매조, 냉각수조로 구성되어 있다. 흡수기는 상부헤더(header)와 하부헤더를 수직으로 연결하는 전열관(동관, 내경 25 mm, 외경 30 mm, 높이 1000 mm)과 그 외측에 동심원환상의 아크릴관(내경 40 mm, 외경 50 mm, 높이 1000 mm)을 장착하여 냉각수 유로로 하였다.

실험방법은, 우선 재생과정에서는 재생기내의 희용액(LiBr수용액)을 가열기 12로 가열하여 발생한 수증기는 응축기에서 응축시켜, 소정의 온도 및 60 wt%의 농용액으로 맞춘다. 흡수과정에서는 증발기에서 발생한 냉매증기가 흡수기에 유입되고, 동시에 재생기에서 실험조건의 농도와 온도로 된 농용액이 흡수기의 상부에 유입하여 하부로 흘러내리면서 주위의 냉매(수증기)를 흡수하여 희용액으로

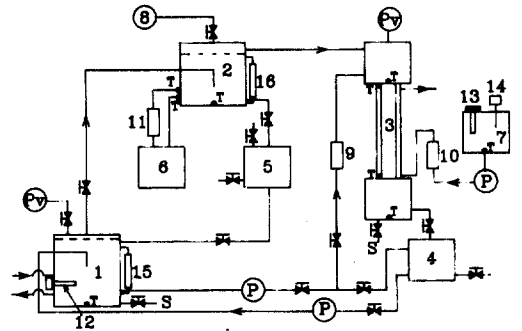


Fig. 1 Experimental apparatus

- 1. Generator 2. Evaporator(Condenser) 3. Absorber
- 4. Weak evaporation tank 5. Refrigerant tank
- 6. Chilled water circulator 7. Cooling water tank
- 8. Vacuum pump 9. Solution flowmeter 10. Cooling water flowmeter
- 11. Chilled water flowmeter 12. Heater 13. Heater 14. Thermostat
- 15. Solution height gage 16. Refrigerant height gage
- P: Solution pump Pv: Vacuum pressure gage T: Thermocouple S: Sampling trap

된다. 흡수기의 하부로부터는 냉각수유로를 통해 냉각수를 공급하여 상향으로 흐르며, 흡수용액과는 대향류로서 열교환을 한다. 이때 흡수용액의 입구 및 출구온도와 냉각수 입구 및 출구온도는 열전대 (T 점)에 의해 측정하였다. 실험개시시의 압력은 약 9 mmHg로 하였다. 실험조건은 LiBr수용액의 농도가 60 wt%로 일정하며, 그 체적유량 $V_s=0.01\sim 0.03\text{ m}^3/\text{h}$ (막 Reynolds수 : 35~130), 흡수기 입구용액온도 $T_1=40\sim 50^\circ\text{C}$, 냉각수 유량 $V_w=0.04\sim 0.15\text{ m}^3/\text{h}$, 냉각수 입구온도 $T_{c1}=20\sim 35^\circ\text{C}$ 로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열전달계수의 산출

Fig. 2는 제1보⁽⁸⁾에서 제안한 흡수모델이다. Fig. 2(a)는 흡수기 입구용액이 과냉액, (b)에는 과열액인 경우의 흡수 및 열이동의 모델로서 \leftarrow 는 열이동, \blackleftarrow 는 물질이동, \leftarrow 는 용액 및 냉각수 흐름의 방향을 표시한다. 그런데 제1보에서 흡수기의 입구용액온도가 40°C 와 45°C 의 경우는 과냉액, 50°C 의 경우는 과열액의 상태임을 설명한 바와 같다.

냉각수로 전달되는 열량 Q 는 열통과율 K , 대수 평균온도차 ΔT_m 을 이용하여 다음 식으로 표시된다.

$$Q = G_w \cdot C_{pw} \cdot (T_{c2} - T_{c1}) = K \cdot A_i \cdot \Delta T_m \quad (1)$$

$$\text{단, } \Delta T_m = \frac{(T_1 - T_{c2}) - (T_2 - T_{c1})}{\ln[(T_1 - T_{c2}) / (T_2 - T_{c1})]} \quad (2)$$

여기서 $A_i = \pi \cdot d_i \cdot L$ 이며 T_1, T_2, T_{c1}, T_{c2} 는 실험치이다. 또 열통과율 K 는 관내 흡수용액의 열전달계수 h_s 와 관의 냉각수측의 열전달계수 h_w 를 이

용하여 다음식으로 표시된다.

$$K = 1 / (1/h_s + d_i/h_w \cdot d_o) \quad (3)$$

단, 관벽(동관)의 전열저항을 무시하고, 냉각수측 열전달계수 h_w 는 Dittus-Boelter의 식(4)를 이용하여 구하였으며, 식(4) 중의 d_w 는 등가직경이다.

$$h_w = 0.023 (k_w/d_w) \cdot (v_w \cdot d_w/v_w)^{0.8} \cdot Pr_w^{0.4} \quad (4)$$

관내의 흡수열전달계수 h_s 는 식(1)~(4)로부터 구하고, 무차원 흡수열전달계수인 Nusselt수(이하 Nu수)는 식(5)로 정의하여, 그 대표길이 L_s 는 식(6)인 응축계수의 대표길이를 취하였다.

$$Nu = h_s \cdot L_s / k_s \quad (5)$$

$$L_s = (\mu_s^2 / \rho_s^2 \cdot g)^{1/3} \quad (6)$$

여기서, h_w 를 h_s 보다 충분히 큰 범위에서 실험을 하게 되면 h_s 의 실험의 정확도는 좋지만, 한편 냉각수 입구와 출구의 온도차가 작아져 식(1)의 열량 Q 의 정확도가 낮아진다. 따라서 본연구에서는 h_w 가 h_s 의 1~1.5배 범위를 기준으로 하여 실험을 행하였다.

측정오차는 제1보⁽⁸⁾에서 언급하였으며, 불확실성 분석(uncertainty analysis)에 의해서 Nu수는 약 4%의 오차범위이고 Sh수 및 Re수의 오차 %도 제1보에 제시하였다.

3.2 흡수용액 및 냉각수의 온도와 열유속

Fig. 3 및 Fig. 4는 흡수용액 입구온도와 열유속과의 관계를, 냉각수 입구온도를 파라미터로 하여 나타낸 대표예이다. 냉각수 입구온도가 일정한 경우에 용액온도 T_1 이 증가하면, 즉 흡수용액온도와 냉각수온도의 차가 클수록 열유속이 증대하고 있다. 냉각수온도와 열유속의 관계로 표시한 예는 Fig. 5 및 Fig. 6과 같이 나타나며, 열유속은 전반적으로 용액유량이 비교적 적은 경우(Fig. 3 및 Fig. 5)에는, 용액 입구온도 $T_1=40^\circ\text{C}$ 로부터 45°C 로 증가했을 때의 열유속의 증가율보다 $T_1=45^\circ\text{C}$ 로부터 50°C (과열액)로 증가했을 때의 열유속의 증가율이 작다. 그러나 용액유량이 비교적 큰 경우(Fig. 4 및 Fig. 6)에는 그러한 현상이 나타나지 않고 오히려 그 증가율이 커지는 경향이 나타나고 있다. 이러한 결과는 제1보⁽⁸⁾의 Fig. 10 및 Fig. 11에서 흡수 질량유속은, 용액유량이 작은 경우에는

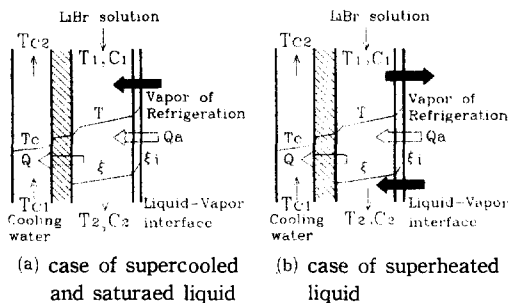


Fig. 2 Model of absorption

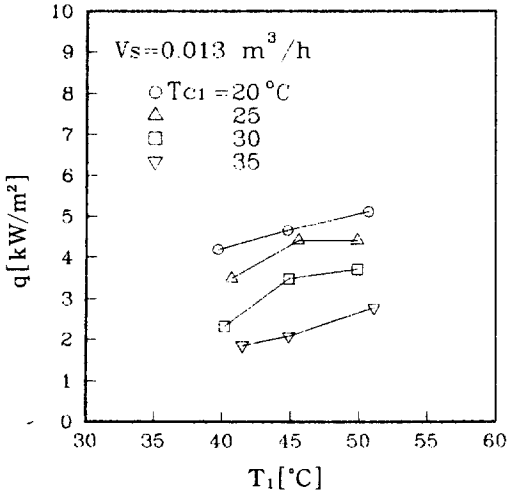


Fig. 3 Effect of LiBr solution temperature on average heatflux

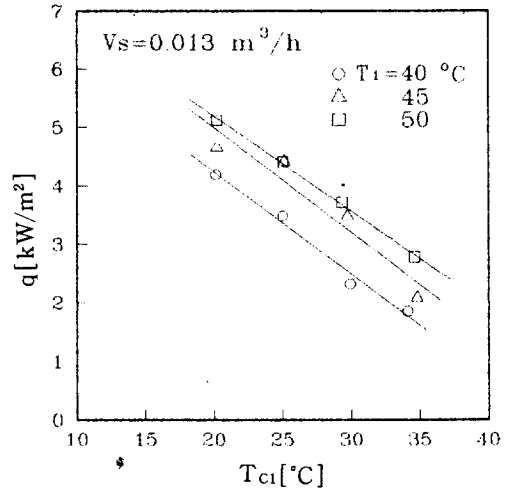


Fig. 5 Effect of LiBr solution temperature on average heatflux

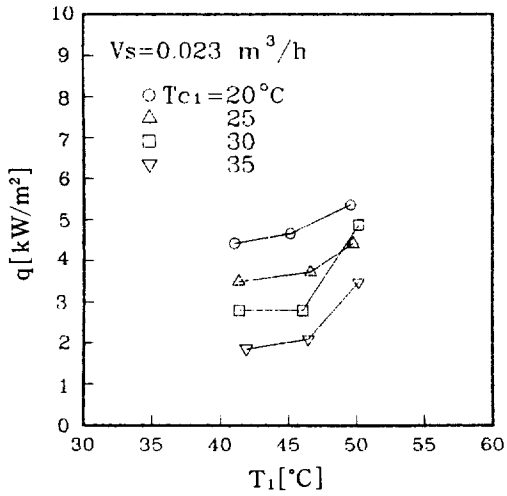


Fig. 4 Effect of LiBr solution temperature on average heatflux

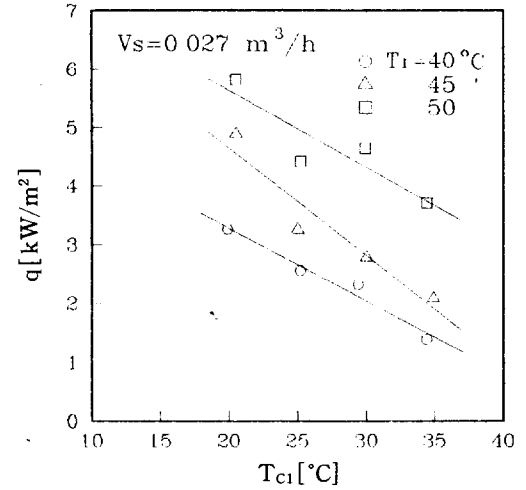


Fig. 6 Effect of LiBr solution temperature on average heatflux

$T_1=40^\circ\text{C}$ 와 45°C 의 차에 비해 $T_1=45^\circ\text{C}$ 와 50°C 에 있어서 그 감소율이 큰데 반해서, 용액유량이 증가하면 후자의 감소율이 작아지는 것과 관계가 있음을 알 수 있다. 물론 동일한 냉각수 온도조건에서는 용액입구온도가 높은 경우에 현열에 의한 열교환량도 있으므로 열유속 그 자체는 용액입구온도가 낮은 경우보다 크다.

3.3 흡수용액유량과 열전달계수

냉각수 유량을 일정 ($V_w=0.15\text{ m}^3/\text{h}$)하게 한 상

태에서, 흡수용액유량은 막Reynolds수(이하 막 Re 수)로 표시하고, 액막의 평균열전달계수는 식(5)로 정의한 Nu 수로, 무차원 온도비는 용액입구온도 T_1 과 냉각수 입구온도 T_{c1} 의 비 T_1/T_{c1} 으로 각각 표시하기로 한다. Fig. 7은 용액입구온도 40°C , Fig. 8은 45°C 인 경우로서 양자 모두 흡수용액의 유입상태가 과냉액인 경우의 열전달 실험결과이다. 막 Re 수가 $35\sim 130$ 의 층류영역에서 $T_1=40^\circ\text{C}$ 에서는 식(7), $T_1=45^\circ\text{C}$ 에서는 식(8)의 관계식을 얻었다.

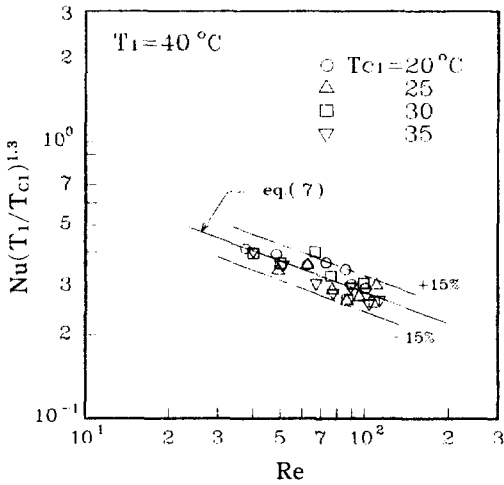


Fig. 7 Heat transfer of falling film LiBr solution (supercooled liquid: $T_1=40^\circ\text{C}$)

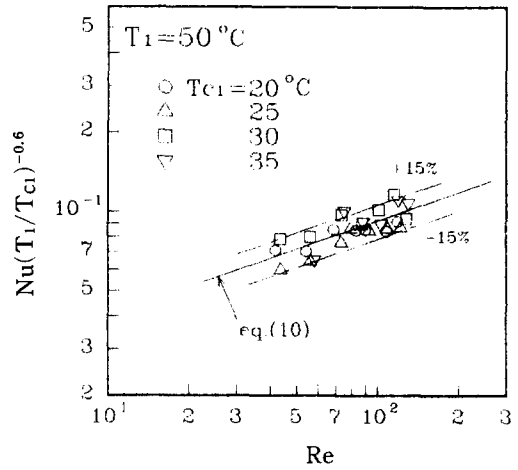


Fig. 9 Heat transfer of falling film LiBr solution (supercooled liquid: $T_1=50^\circ\text{C}$)

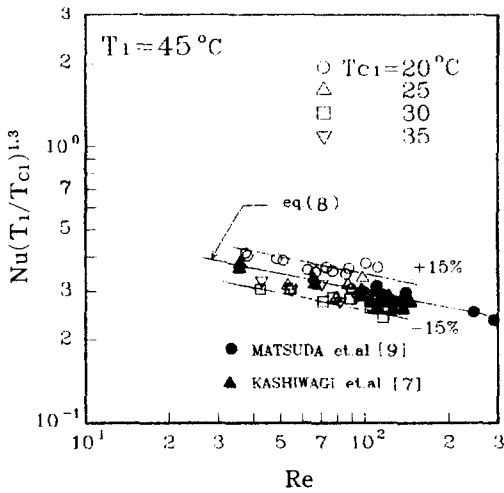


Fig. 8 Heat transfer of falling film LiBr solution (supercooled liquid: $T_1=45^\circ\text{C}$)

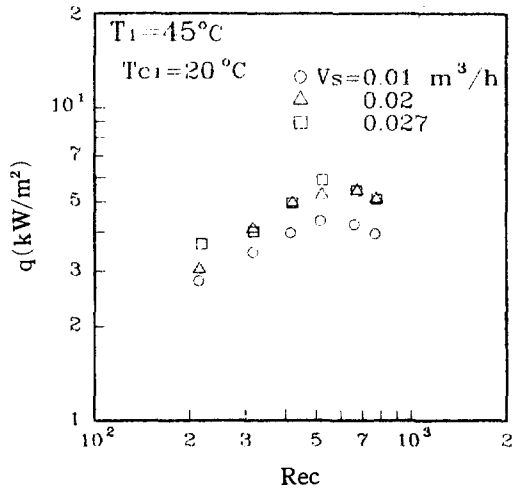


Fig. 10 Variation of average heatflux with cooling water flowrate

$$Nu = 1.618 Re^{-0.376} \cdot (T_1/T_{c1})^{-1.3} \quad (7)$$

$$Nu = 0.796 Re^{-0.224} \cdot (T_1/T_{c1})^{-1.3} \quad (8)$$

이들 선도로부터 막 Re수가 증가하면 액막내의 냉각수 방향으로는 평균 열전달계수가 감소하고 있는데, 그 감소율은 용액입구온도에 따라 다름을 알 수 있으며 $T_1=40^\circ\text{C}$ 인 경우는 액막류가 층류일때 膜狀 응축에서의 Nusselt의 이론식(9)와 유사하다.

$$Nu = (4/3)^{1/3} \cdot Re^{-1/3} \quad (9)$$

또한, Fig. 8에는 저자들이 다른 흡수식 열펌프

에서 얻은 실험결과⁽⁷⁾(수직관내 유하액막식 흡수기의 관내경 23.8 mm, 높이 1000 mm, 용액 입구온도 48°C , 냉각수 입구온도 35°C)를 본연구의 실험식에 따라 정리하여 표시한 결과, 잘 일치하고 있으며 松田等⁽⁹⁾의 관외 흡수실험 데이터(흡수기내 압력 8 kPa, 흡수용액의 포화온도와 냉각수온도의 차 6°C)도 본 실험식에 잘 일치한다.

Fig. 9는 흡수용액의 유입상태가 과열액의 경우로서, 과냉액의 경우와는 반대로 막 Re수의 증가에 따라 Nu수가 증가하며, 다음식으로 표시된다.

$$Nu = 0.0176 Re^{0.36} \cdot (T_1/T_{c1})^{0.6} \quad (10)$$

이것은 다음과 같이 설명할 수 있다. 즉 흡수액이 과냉액의 상태로 흡수기에 유입하게 되면 바로 흡수를 개시하지만, 과열액의 경우는 유입초기에 잠시 증발이 일어나고⁽¹⁰⁾ 또 과열도가 큰 경우에는 액적이 비산하여 액막두께는 그만큼 얇아지며, 따라서 농도는 증가한다고 생각된다. 그러나 유하면서 냉각수에 의한 냉각효과에 의해 액막온도가 저하하여 포화온도 또는 과냉상태로 전환하게 되어 서서히 흡수를 시작하면서 정상적인 냉각수 방향으로의 열이동이 일어나게 되는데, 초기 증발영역에서는 증발잠열을 냉각수로부터 얻으므로 열이동의 방향이 흡수의 경우와는 역방향이 된다. 또 증발구역에서는 용액유량이 적을수록 쏠액막유량에 대한 증발량의 비율이 크므로 역방향(냉각수측에서 LiBr수용액측으로)의 열이동효과가 증가하게 되어 흡수기 전체에 걸친 냉각수 방향으로의 열전달계수가 감소하는 것으로 생각된다. 한편, 흡수영역으로 들어가면, 초기 증발영역에서의 증발량분이 냉각벽에 의한 냉각효과에 영향을 받지 못한 상태에서 흡수과정으로 전환하게 되고, 유입액막유량에 대한 그 증발량분의 비율은 액막유량이 적을수록 크므로 냉각수방향의 평균 열전달계수가 작으며, 액막유량(약 Re수)이 증가하면 전술한 영향(열전달계수의 감소효과)들이 작아져 열전달계수가 증가한다고 생각된다.

3.4 냉각수 유량의 영향

흡수용액의 열전달에 미치는 냉각수 유량의 영향에 대한 연구는 거의 없는 상태이다. 따라서 본 연구에서는 흡수용액 입구온도 45°C의 경우, 냉각수 유량(Rec)을 변화시켜 전열량을 측정하였다. Fig. 10은 냉각수 입구온도 20°C, Fig. 11은 30°C의 경우에 대한 결과로서 냉각수 유량이 증가함에 따라 열유속이 증대하다가 최대치를 나타낸 후 감소하고 있다. 즉 열유속이 최대로 되는 최적 냉각수량이 존재함을 알 수 있다. 그 냉각수량은 $T_{c1}=20^\circ\text{C}$ 에서는 $Rec=520$, $T_{c1}=30^\circ\text{C}$ 에서는 $Rec=830$ 이며, 따라서 냉각수 온도가 증가하면 최적 냉각수량이 증대한다. *

3.5 열 및 물질전달계수의 상관관계

이 절에서는 제1보⁽⁸⁾에서 보고한 물질전달계수와, 본보의 열전달계수와 상관관계를 Nu수와 Sh수, 그리고 무차원 온도비 T_1/T_{c1} 의 관계로 정리하였다.

Fig. 12 및 Fig. 13은 각각 흡수용액 입구온도 40°C와 45°C의 양자 공히 과냉액의 상태에서 흡수기에 유입되는 경우의 열과 물질전달의 상관관계이다. 이들 선도에서 흡수량이 증가하면 열전달계수가 증대하는데, 그 증가율은 용액입구온도가 낮은 쪽이 큼을 알았으며, 그 관계식은 $\pm 15\%$ 정도 내에서 다음과 같이 정리할 수 있다.

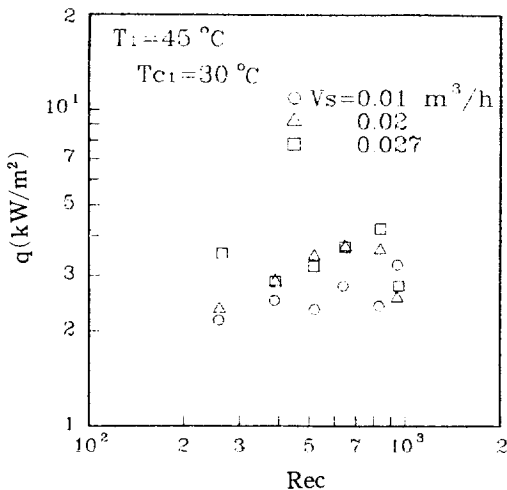


Fig. 11 Variation of average heatflux with cooling water flowrate

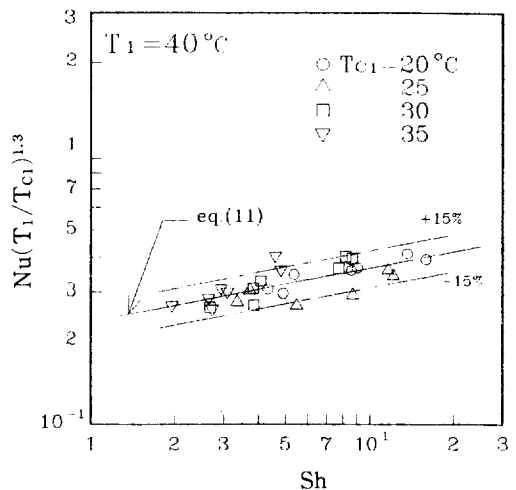


Fig. 12 Correlation of heat transfer and mass transfer (supercooled liquid: $T_1 = 40^\circ\text{C}$)

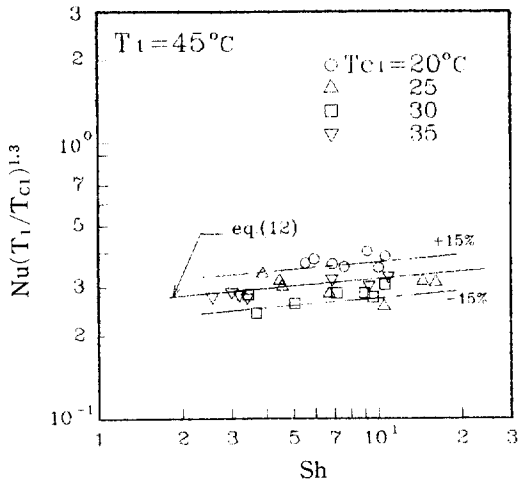


Fig. 13 Correlation of heat transfer and mass transfer (supercooled liquid: $T_1 = 45^\circ\text{C}$)

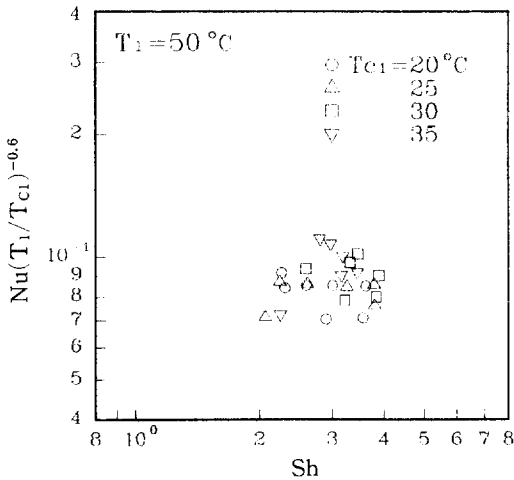


Fig. 14 Correlation of heat transfer and mass transfer (supercooled liquid: $T_1 = 50^\circ\text{C}$)

$$T_1 = 40^\circ\text{C} : Nu = 0.234 Sh^{0.194} \cdot (T_1/T_{c1})^{-1.3} \quad (11)$$

$$T_1 = 45^\circ\text{C} : Nu = 0.263 Sh^{0.087} \cdot (T_1/T_{c1})^{-1.3} \quad (12)$$

그러나 $T_1 = 50^\circ\text{C}$ 인 과열액의 경우는 Fig. 14에서 보는 바와 같이 뚜렷한 경향은 나타나지 않으나, 전체적으로 보아 Sh수의 증가에 따라 Nu수가 약간 증대한다고 볼 수 있다.

4. 결 론

흡수식 열펌프의 흡수기를 수직관내 유하액막식으로 하여, 흡수용액을 60 wt%의 LiBr수용액으로 하고, 그 유량 및 온도 그리고 냉각수의 유량 및 온도를 변화시켜 액막내의 열전달 특성 및 물질전달과의 상호관계를 실험적으로 고찰하였다. 이때 흡수기 입구 용액의 상태는 과냉액과 과열액의 조건하에서 다음의 결론을 얻었다.

1) 흡수기 입구용액온도와 냉각수 입구온도의 차가 클수록 흡수기내의 평균 열유속은 증대하며, 그 증가율은 흡수용액의 유입상태가 과냉액, 과열액에 따라서, 그리고 흡수기에 유입되는 흡수용액유량에 따라 달라진다.

2) 과냉액의 경우, 막 Reynolds수가 증가함에 따라 열전달계수가 감소하지만, 과열액의 경우는 증대한다.

3) 액막내의 열유속을 최대로 하는 최적 냉각수량이 존재하며, 그 최적냉각수량은 냉각수 온도가 증가할수록 증대한다.

4) 과냉액의 경우, 물질전달계수가 증대하면 열전달계수가 증가하며 그 증가율은 용액온도가 낮을수록 크다. 그러나 과열액의 경우는 명확한 경향이 나타나지 않았다.

참고문헌

- (1) 中尾, 尾崎, 山中, 1986, 吸收式ヒートポンプ用縦型熱交換器の研究(第1報, 各種 傳熱管の 吸收特性), 第23回 日本傳熱シンポジウム講演論文集, pp. 367~369.
- (2) Grossman, G., 1983, Simultaneous heat and mass transfer in film absorption under laminar flow, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 26, No. 3, pp. 357~371.
- (3) 松田, 1980, 臭化リチウム水溶液による低壓水蒸氣の 吸收-一方擴散モデルによる 解釋-, 化學工學論文集, vol. 6, No. 2, pp. 157~164.
- (4) 川江, 1987, 層流で 流下する 臭化リチウム水溶液への 水蒸氣吸收特性, 日本機械學會論文集(B編), 52卷, 494號, pp. 3059~3064.
- (5) Chun, K. R. and Seban, R. A., 1971, Heat transfer to evaporating liquid films, J. Heat Transfer,

- pp. 391~396.
- (6) 森岡, 清田, 中尾, 1991, 垂直壁を流下する臭化リチウム水溶液膜への水蒸気の吸収, 日本機械學會論文集(B編), 57卷, 543號, pp. 3916~3920.
- (7) 柏木, 山崎, 嚴基讚, 黑澤, 1991, 縦型管内吸收過程における熱および物質傳達促進, 日本冷凍協會學術講演會講演論文集, pp. 105~108.
- (8) 嚴基讚, 柏木孝夫, 徐正閔, 1993, 垂直管内를 흘러내리는 流下液膜式 吸收器의 吸收 및 熱傳達 特性(第1報, 吸收特性), 空氣調和・冷凍工學論文集, 5卷 1號, pp. 1~9.
- (9) 松田, 羽田, 川村, 1990, 臭化リチウム水溶液を用いた垂直管流下液膜式吸收器・再生器に関する研究, 日本冷凍協會論文集, vol. 7, No. 2, pp. 47~56.
- (10) 森岡, 清田, 1987, 垂直壁を流下する臭化リチウム水溶液への水蒸気の吸収實驗, 日本機械學會論文集(B編), 53卷, 485號, pp. 236~240.