

## 水平圓管群上の 二元吸收溶液流動에 依한 傳熱吸收特性

Absorption of Water Vapor into an Absorbing Binary Liquid Film  
Falling over a Horizontal Tube Bank

金 錫 賢\*, 金 永 仁\*\*, 徐 石 清\*\*\*, 黃 東 坤†  
S. Kim, Y. I. Kim, S. C. Seo, D.K.Hwang

### ABSTRACT

Condensation of water vapor into an absorbent liquid of LiBr-water solution falling over a bank of water cooled horizontal tubes was investigated theoretically. The governing conservation equation for a re-defined physical transport phenomena were solved numerically using a finite difference method.

Raw parameters were used in this study, since reliable experimental data is required prior to a dimensionless parametric study. The average values of wall heat transfer coefficient and interfacial absorption rate were defined to see the system performance. Other parameters include tube diameter, streamwise coordinate (and number of tubes in row), mass flow rate, and the wall temperature. The effects of these quantities on the absorption processes and suggestions for a rational system design have been presented.

### 기 호 설 명

$C_p$  : 정압비열  
 $d$  : 관외경  
 $D$  : 물질확산율  
 $h$  : 열전달계수  
 $m$  : 질량농도비(mass fraction)  
 $\dot{m}''$  : 질량유속  
 $N$  : 관의 수  
 $Pr$  : 프란틀수,  $\nu/\alpha$

$\dot{q}''$  : 열유속  
 $Sc$  : 슈미트수,  $\nu/D$   
 $T$  : 온도  
 $u, v$  :  $z$  및  $y$  방향속도  
 $\bar{U}$  :  $z$  방향 평균속도  
 $y, z$  : 좌표계 (Fig. 2)  
 $z^*$  : 유동방향 무차원좌표,  $z/(\pi d/2)$   
 <그리스문자>  
 $\alpha$  : 열확산율  
 $\Gamma$  : 단위폭당의 질량유량

\* 정회원, 국민대학교 기계공학과

\*\* 정회원, 한국과학기술원 기계공학부

\*\*\* 정회원, 한국기계연구소

† 국민대 대학원

- $\nu$  : 동점성계수  
<하첨자>
- $o$  : 초기값
- $w$  : 관 외벽면
- $s$  : 액막의 자유표면

### 1. 서 론

자유낙하하는 液膜 (liquid falling film)에 의한 기체나 증기의 흡수현상 문제는 기계나 화학분야의 장치산업 등에서 직접접촉 방식의 열 및 물질교환기 성능향상과 관련하여 기술적인 관심이 커지고 있다.<sup>1,2)</sup> 또한 액체-기체 시스템의 2상 자유표면에서의 전달기구는 학술적 측면에서도 그 관심이 매우 크다.

최근에 에너지의 효율적 이용방안으로 실용화 개발이 가속되어온 제1종 및 제2종 흡수식 열펌프는 네가지의 직접접촉식 교환기들(증발기, 응축기, 발생기, 흡수기)로 구성되어 있으며 이들의 적정설계는 시스템 성능향상을 위해 불가결한 사항이다. 특히 이들 교환기중 흡수기는 냉매(H<sub>2</sub>O)의 흡수열을 이용하여 최종 목표인 온수를 얻어내는 매우 중요한 요소로써 설계최적화를 위하여는 전열관 표면에 형성되는 흡수액막 부근에서의 非等溫 傳達現象에 대한 정확한 이해가 필요하다.

많은 연구가 층류 및 난류유동 영역의 낙하액막에 대하여 수행되어 왔으며 고전적 해석들은 Scriven<sup>3)</sup>이 잘 정리하고 있다. 최근에는 Grossman<sup>4)</sup>이 흡수식 열펌프의 흡수기와 관련하여 층류낙하액막의 물질전달현상을 해석하였고 이후 그의 해석을 난류영역 유동문제까지도 확장하였다.<sup>5)</sup> 여기에서 그는 액막내의 속도 분포를 구하기 위하여 길이방향의 정상해인 누셀트해(Nusselt Solution)<sup>6)</sup>를 사용하였으며 열 및 물질전달 현상은 가로방향 침투깊이 (penetration depth)가 작다고 가정하여 비정상확산방정식을 적용하였다. Urakawa 등<sup>7)</sup>은 이 문제에 좀더 정확히 접근하고자 에너지 및 농도지배식에 가로방향 속도성분을 포함하는 대류항을 고려하였으나 속도분포는 여전히 누셀트해를 이용하였다.

김석현<sup>8)</sup>은 이와 같은 최근의 연구결과를 비교분석하고 다음과 같은 비합리성을 지적하였다. 즉,

(1) 누셀트의 응축액막에 대한 해석은 유체역학적으로 잘 발달된 (fully developed) 유동에 대하여만 적용될 수 있다.

(2) 수평원관표면유동을 동반하는 열전달문제는 전형적인 입구영역(entrance region) 문제이다.

(3) 침투이론 (penetration theory)은 슈미트수가 매우 크고 층류이며 가로방향 속도성분이 무시되는 경우의 물질전달 현상에만 적용된다.

본 연구에서는 흡수기내의 전달현상문제를 주의깊게 재정의하고 수립된 지배방정식의 수치해로부터 교환기의 전달특성과 설계상의 유의점 등을 제시하고자 한다.

### 2. 흡수기내의 전달현상 및 지배방정식

제2종 흡수식 열펌프에 채용되는 전형적인 흡수기에서의 열적조건은 Fig. 1에 보인 바와 같다.<sup>2)</sup> 84°C의 포화수증기(포화증기압  $P_{sat} = 0.555 \times 10^5 P_a$ )가 증발기로부터 공급되어 발생기에서 보내지는 LiBr 수용액에 흡수되며 단열흡수구역을 지나면서 141.2°C(LiBr의 포화농도 0.618)까지 도달한다. 전열관내에 흐르는 온수는 95°C에서 공급되어 115°C까지 가열된다. 본 계산에서는 액막에 전하는 전열관 표면온도를 130°C로 概算하여 사용하였다.

자유표면 부근의 전달현상에 대하여는,

(1) 증기축 전단응력 및 현열변화는 매우 작으며,

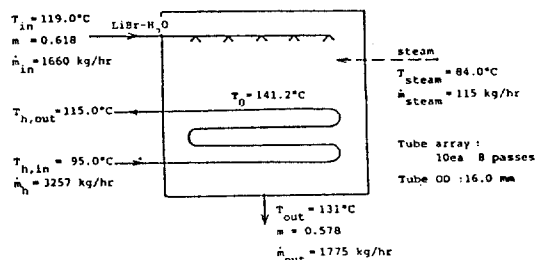


Fig.1 A typical absorber design parameters

- (2) 시스템내에 불응축성기체가 없고,
- (3) 자유표면에서의 농도는 주위압력 및 온도와 평형을 이루고 있다

는 가정하에 실제적으로 액체측의 전달현상만이 중요하게 된다. 액막에서는 자유표면에서 발생하는 높은 흡수열로 인하여 열 및 물질전달현상이 매우 강하게 결합된 문제가 된다. 또한 흡수된 질량에 의한 가로방향속도성분의 증가는 소위 '블로우잉 효과'로써 전달현상에 부가적인 영향을 미치게 된다.

지배방정식의 수립에는 표면과가 나타나지 않는 순수층류 유동이라는 가정외에

- (1) 정상상태이며 불성치는 일정이다.
- (2) 유동방향확산은 무시된다.
- (3) 자유표면에서 증기압-온도-농도의 평형관계가 유지된다.

는 등의 가정이 도입되었다. 최종적으로 얻어진 2차원 액막유동에 대한 보존칙들은 다음과 같다.<sup>8)</sup>

(질량보존)

$$\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

(z-운동량)

$$u \frac{\partial u}{\partial z} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + g(z) \quad \dots\dots\dots (2)$$

(에너지)

$$u \frac{\partial T}{\partial z} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\nu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (3)$$

(불 질)

$$u \frac{\partial m}{\partial z} + v \frac{\partial m}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\nu}{Sc} \frac{\partial m}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (4)$$

사용된 좌표계가 Fig.2에 주어져 있으며 여기서 국부중력가속도  $g(z)$ 는,

$$g(z) = g \sin(z/R) \frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_l} \quad \dots\dots\dots (5)$$

식(2)~(4)는 일반형태로써

$$u \frac{\partial \phi}{\partial z} + v \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( D_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S \quad \dots\dots\dots (6)$$

와 같이 표시될 수 있으며  $\phi$ 는 종속변수  $u$ ,  $T$  또는  $m$ 을 나타내며  $D_\phi$ 는  $\phi$ 에 해당하는 확산율(즉  $\nu$ ,  $\alpha$  또는  $D$ )를 나타낸다. 또한  $S$ 는 생성항으로써  $z$ -운동량방정식의 중력항

이 된다.

이와 같은 포물형 연립편미분방정식에 적용될 초기 및 경계조건들은 다음과 같이 주어졌다.

$$u(0, y) = u_o(y) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$T(0, y) = T_o \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$m(0, y) = m_o \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$u(z, 0) = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{\partial m}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$T(z, 0) = T_w = \text{const.} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=\delta} = 0 \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=\delta} = \rho D \frac{\partial m}{\partial y} \Big|_{y=\delta} H_a \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$m(z, \delta) = m(P_{sat}, T_{sat}) \quad \dots\dots\dots (15)$$

여기서 에너지방정식에 대한 벽면온도 일정의 조건식(12)는 관내부의 대류 열전달저항과 벽면의 전도저항이 커질 때에는 열유속 일정의 조건

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = \dot{q}_w'' = \text{const.} \quad \dots\dots\dots (16)$$

으로 대치되는 것이 더욱 바람직한 것이다. 다만 Fujii 등<sup>9)</sup>에 의하면 본 문제에서 두 극한의 결과치에 대한 차이가 크지 않은 것으로 예상되어 여기에서는 식(12)를 그대로 사용하였다.

수평원관주위의 액막유동은 그 두께  $\delta$ 가 일정하지 않으므로 액막의 자유표면이 좌표계의 표면과 일치하지 않아 해석상 어려움이 따르고 적절한 좌표변환이 요청된다. 여기서는 자유표면으로부터의 흡수질량유입과 그로 인한 블로우잉 효과를 포용하기 위하여  $y = \delta$ 에서의 유량함수값  $\phi_s(z)$ 로 무차원화된 가로방향 독립변수

$$w = \phi / \phi_s \quad \dots\dots\dots (17)$$

를 도입한다. 이러한 변환은 경계층 문제해석에 Spalding 등<sup>10)</sup>이 처음 사용한 것으로써 결과적으로 얻어지는  $(z-w)$  좌표계는 액막두께의 변화뿐 아니라 국부적인 질량변화까지 처

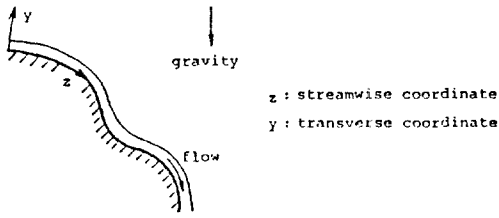


Fig.2 Coordinate system

리하는 이점을 가진다. 또한 수치계산에서의 오차를 극소화하고 계산능률을 높이기 위하여 종속변수의 구배가 큰 부분 즉 액막입구, 액막의 자유표면 및 벽면부근 등에서 절점간격을 작게 잡을 수 있도록  $\xi = \xi(z)$ ,  $\eta = \eta(w)$ 가 되는 좌표계 ( $\xi - \eta$ )를 도입하면 지배방정식은 최종적으로

$$\frac{\partial \phi}{\partial \xi} = E \frac{\partial \phi}{\partial \eta} + F \frac{\partial^2 \phi}{\partial \eta^2} + S \dots\dots\dots (18)$$

로 주어진다.

수치계산에는 간접(fully implicit)유한차분법을 사용하였다. 본 문제에서는 절점간격이 큰 하류영역에서 이 방법이 Crank-Nicholson 보다 더 안정되고 정확한 수치해를 주었다. 계산의 진행에는 가능한 한 비선형계수들을 앞 단계에서의 값을 사용케 함으로써 반복계산을 피하였다. 선형화된 삼중대각행렬시스템은 Thomas 알고리즘을 사용하여 저장장소와 연산속도를 최소화하였고 총괄 질량보존 및 에너지 보존상태를 별도로 감시하여 계산의 정확성을 기하였다.

### 3. 결과 및 토의

흡수기의 전열흡수성능에 관한 인자들은 물성치를 비롯하여  $N, d, \Gamma, U_o, T_o, T_w$  등이다. 초기속도  $U_o$ 는 본 문제에서 교환기 효율에 영향을 주지 않는 것으로 보고되었으며<sup>11)</sup> 선정된 다섯개의 인자( $N, d, \Gamma, T_o, Sc$ )들만이 변화되었다. 계산에서 적용된 이들의 표준상태<sup>2)</sup>가 Table 1에 주어져 있다. 계산된 온도 및 농도분포는 국소열유속( $\dot{q}_w''$ ) 및 수증기의 질량 흡수속도 ( $\dot{m}_s''$ )를 구하는데 사용되었으며 이

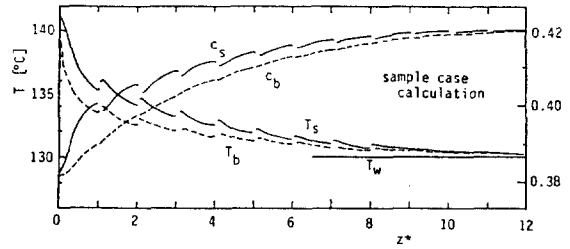


Fig.3 Local values of liquid temperature and mass fraction

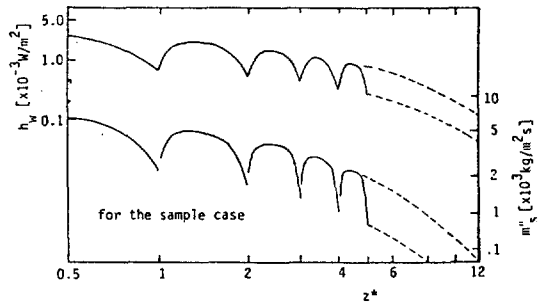


Fig.4 Local values of heat transfer coefficient and mass flux

들로부터 벽면에서의 평균열전달계수 ( $\bar{h}_w$ ) 및 자유표면에서의 평균질량흡수속도 ( $\bar{m}_s''$ )를 다음 절차에 의하여 계산하였다.

$$\dot{q}_w'' = -k \frac{\partial}{\partial y} \Big|_{y=0} \dots\dots\dots (19)$$

$$\dot{m}_s'' = -\rho D \frac{\partial m}{\partial y} \Big|_{y=\delta} \dots\dots\dots (20)$$

$$\bar{h}_w \equiv \frac{1}{2} \int_0^z \frac{\dot{q}_w''}{\Delta T} dz; \Delta T = T_o - T_w \dots\dots (21)$$

$$\bar{m}_s'' = \frac{1}{z} \int_0^z \dot{m}_s'' dz \dots\dots\dots (22)$$

계산결과는 신뢰성 있는 실험데이터의 확인이 있을 때까지 무차원화를 1차인자(raw parameter)를 사용하였으며 대수준급의 좌표축을 사용함으로써 지수법칙(power law)를 찾고자 시도하였다. Fig.3, 4에는  $z$ 에 따른  $T, m, \bar{h}_w, \bar{m}_s''$  등의 변화를 보여주고 있다.  $\bar{h}_w$  및  $\bar{m}_s''$ 는  $T$ 와  $m$ 에 비해 하류에서의 유동방향 의존성이 여전히 크게 나타나고 있다. 각 원관초기 부분에서  $T$  및  $\bar{h}_w$  등이 증가하는 현상은 원관의 하단부분에서 LiBr 수용액이 과포

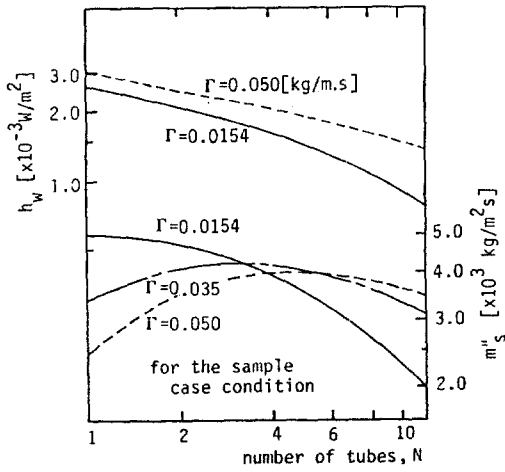


Fig. 5 Effects of N

화되어 있어서 초기의 표면평형수분농도가 크게 증가함으로 인한 것 며 실제에 있어서 이러한 과포화상태가 방지될 수 있도록 설계할 것이 요청된다.

Fig. 5에는 단순한 자수법칙에 따르지는 않지만 매우 중요한 인자인 N과  $\Gamma$ 에 대한 영향이 주어저 있다. 그림에서 근사적으로  $\bar{h}_w \propto N^{0.6}$ 가 성립함을 알 수 있지만  $\bar{m}_s$ 에 관한 乘數는 N 그 자체의 함수가 되는 복잡한 양상을 나타내고 있다.

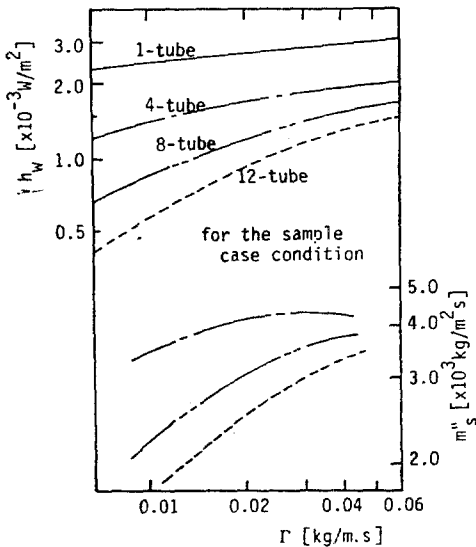


Fig. 6 Effects of  $\Gamma$

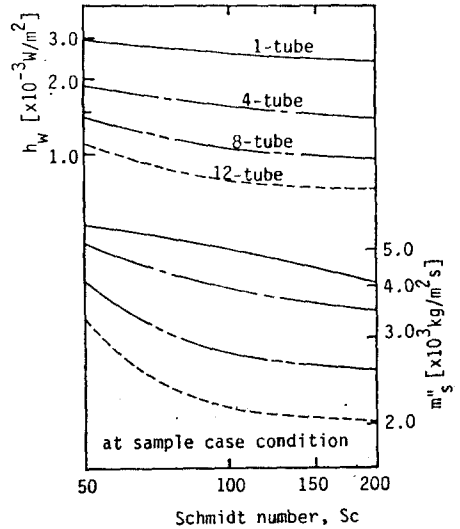


Fig. 7 Effects of Sc

Fig. 6에 다소 복잡한  $\Gamma$  의존형태가 주어저 있다. 물질전달에 있어서 관의 수가 많아지면  $\Gamma$ 가 증가할수록  $\bar{m}_s$ 가 커지나 작은 값의 N에 대하여는 경향이 반대가 된다. 즉 주어진 N에 대하여  $\bar{m}_s$ 의 최대치를 주는  $\Gamma$ 가 존재한다는 것을 알 수 있다. 그러나  $\Gamma$ 가 과소하게 되면 관표면에 국소적으로 드라이 아웃 (dry-out)현상이 나타날 수 있으며 큰  $\Gamma$ 에 대하여는 표면과가 또는 난류가 발생하므로 전

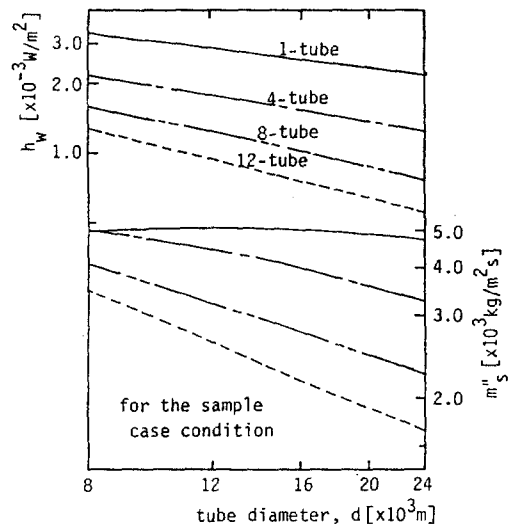


Fig. 8 Effects of d

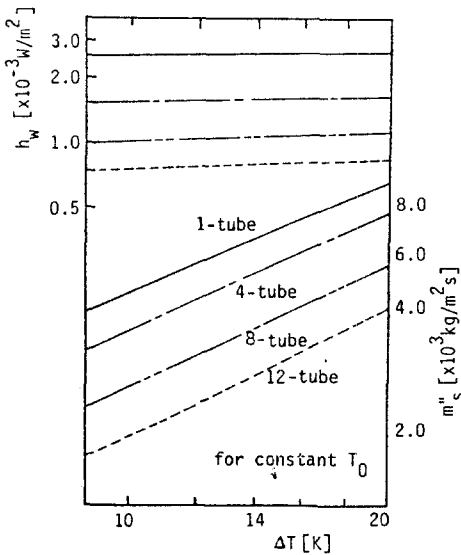


Fig.9 Effects of  $\Delta T$  ( $T_0$  fixed)

달현상의 모델링이 달라지게 된다. 한편 Sc에 대한 의존도가 Fig.7에 주어져 있으며 온도의 함수인 Sc의 정확한 선택이 성능예측에 매우 중요한 것임을 암시한다. Fig.8, 9에 나타난  $d$  및  $\Delta T (=T_0 - T_w)$ 의 영향은 지수법칙에 매우 잘 따르고 있으며,

$$\bar{h}_w \propto d^{-0.4} (\Delta T)^{0.0} \dots\dots\dots (23)$$

$$\bar{m}_s'' \propto d^{-0.5} (\Delta T)^{-1.0} \dots\dots\dots (24)$$

으로 주어진다. 단,  $d$ 에 대한 승수는  $N$ 에 따

Table 1. Sample case parameters for numerical computation

Physical properties for 60% LiBr-H <sub>2</sub> O solution evaluated at 136 °C	
density	$\rho = 1.700 \text{ kg/m}^3$
specific heat	$C_p = 1.860 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$
kinematic viscosity	$\nu = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
thermal diffusivity	$\alpha = 0.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
mass diffusivity (for temporary use)	$D = 1.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$
System parameters	
$N = 1, 4, 8, 12 ; U_o = 0.10 \text{ m/s}$	
$d = 16.0 \text{ mm} ; T_o = 141.2 \text{ }^\circ\text{C}$	
$\Gamma = 0.015 \text{ kg/m} ; T_w = 130.0 \text{ }^\circ\text{C}$	

라 다소 변하는 값이다.  $\Delta T$ 가 클수록 전술한 바와 같이 관의 하단에서 큰 과포화현상이 나타나며 전체 흡수량을 증가시킨다. 다만, 지나친 과포화로 인하여 생길 수 있는 염의 석출은 설계시 방지될 수 있도록 설계시 유의하여야 할 것이다.

#### 4. 결 론

원관군 위를 흘러 자유낙하하는 LiBr의二元溶液에 의한 수증기흡수 및 열전달 해석을 통하여 층류영역에서 관군벽면에서의 평균열전달계수는 정성적으로

$$\bar{h}_w \propto N^{-0.5} d^{-0.4} (\Delta T)^{0.0}$$

으로 주어짐을 보였다. Sc와  $\Gamma$ 의 영향은 단순한 지수법칙으로 표시되지는 않으나 매우 크게 나타났으며 이들 인자들의 적절한 계산 및 선택이 설계상 매우 중요한 것으로 판단된다.

전달현상에 관한 완전한 이론적 모델을 구축하기 위하여는 주의깊은 실험이 뒷받침되어야 한다. 여기 주어진 수식모델은 표면파를 동반하는 층류유동(wavy laminar) 및 난류유동 영역에 확장될 수 있을 것이다. 한편 장과장의 표면파 형성에 관한 문제, 그리고 적절한 초기조건을 얻기 위한 유체역학적 고찰이 요망된다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학기술원의 지원하에 공기조화·냉동공학회 용역사업의 일부로 수행되었으며 관계자 제위께 감사를 표한다.

#### 인 용 문 헌

1. Heat Exchanger Design Handbook, Ch.3, McGraw Hill, NY, 1983.
2. 이춘식등, “고온용 흡수식 열펌프 개발”, 과학기술처 국책연구보고서 N110-2480-2, 한국과학기술원, 1986. 7.

3. Scriven, L.E., "Flow and Transfer at Fluid Interface", *Chem. Engr. Educ.*, Vol.3, pp.150-155, 1968.
4. Grossman, G., "Simultaneous Heat and Mass Transfer in Film Absorption Under Laminar Flow", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.26, pp.357-371, 1983.
5. Grossman, G. and Heath, M.T., "Simultaneous Heat and Mass Transfer in Absorption of Gases in Turbulent Liquid Films", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.27, pp.2365-2376, 1984.
6. Edwards, D.K., Denny, V.E. and Mills, A.F., *Transfer Processes, 2nd ed.*, McGraw Hill, NY, 1979.
7. Urakawa, K., Morioka, I. and Kiyota, M., "Absorption of Water Vapor into Lithium Bromide-Water Solution Film Falling along a Vertical Plate", *Trans. JSME series B*, Vol.52, pp.1766-1771, 1985.
8. Kim, S., "Condensation of Water Vapor into a Binary Absorbing Liquid Film", *Proceedings of Korea-Germany seminar on Heat Pump System and Their Applications*, pp.14.1-14.14, Seoul, Korea, July, 1987.
9. Fujii, T., Honda, H. and Oda, K., "Condensation of Steam on a Horizontal Tube - the Influence of Oncoming Velocity and Thermal Conduction at the Tube Wall", 18th Nat'l. Heat Transfer Conf. (ASME/AIChE), pp.35-43, San Diego, CA, 1979.
10. Patankar, S.V. and Spalding, D.B., *Heat and Mass Transfer in Boundary Layers*, CRC Press, Cleveland, 1968.
11. 金錫賢, 徐石清, 金永仁, 吳敏煥, "水平圓管上の LiBr 水溶液 落下液膜에 의한傳熱吸收特性", 空氣調和・冷凍工學會 冬季學術大會 抄錄集, pp.76~82, 1987. 11.