

좁은 흰이 달린 경사면을 흐르는 리튬브로마이드 수용액 흡수기에서의 열 및 물질전달

조 은 준, 서 태 범†
인하대학교 기계공학과

Coupled Heat and Mass Transfer in Absorption of Water Vapor into LiBr-H₂O Solution Flowing over a Finned Inclined Surface

Eun-Jun Cho, Tae-Beom Seo

Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received December 7, 2000; revision received June 11, 2001)

ABSTRACT: Absorption of water vapor into LiBr-H₂O solution flowing over a finned inclined surface is numerically investigated. The momentum, energy, and diffusion equations are numerically solved using a finite difference method. The four different shapes of the wall surfaces are considered to find the best surface for absorption assuming that the wall temperature and the surface tension are constant. The effects of the fin interval and Reynolds number are investigated. Based on the numerical results, it is known that the parabolic surface shows better absorption performance than the other surfaces, and that water vapor absorption increases gradually with decreasing the fin interval.

Key words: LiBr-H₂O solution(리튬브로마이드 수용액), Heat transfer(열전달), Mass transfer(물질전달), Absorption(흡수), Surface tension(표면장력)

기 호 설 명

A : 용액의 xy 평면의 단면적 [m^2]
 C : 용액에서 리튬브로마이드의 농도
 C_p : 용액의 비열 [J/kgK]
 D : 용액의 확산계수 [m^2/s]
 D_h : 수력직경 [m]
 h : 수증기의 엔탈피와 리튬브로마이드 수용액
내의 물의 엔탈피차 [J/kg]

l : 용액의 z 방향으로 유동길이 [m]
 n'' : xz 평면으로 투영한 면적당 수증기의 질량
유속 [kg/m^2s]
 ΔP : 유체 사이의 압력차 [N/m^2]
 Pr : Prandtl 수, ν/a
 q'' : xz 평면으로 투영한 면적당 열유속 [$J/m^2 \cdot s$]
 R : 자유표면의 곡률반지름 [m]
 Re : Reynolds 수, $\overline{w}D_h/\nu$
 Sc : Schmidt 수, ν/D
 T : 온도 [$^{\circ}C$]
 w : z 방향의 속도 [m/s]
 \overline{w} : z 방향의 평균 속도 [m/s]
 z : 유동방향의 좌표 [m]

† Corresponding author

Tel.: +82-32-862-7313; fax: +82-32-862-7313

E-mail address: ejcho@hanmail.net

그리스 문자

- α : 용액의 열확산계수 [m^2/s]
- Γ : 용액의 질량유량 [kg/s]
- μ : 점성계수 [kg/ms]
- ν : 동점성계수 [m^2/s]
- ϕ : 경사각 [$^\circ$]
- θ : 접촉각 [$^\circ$]
- ρ : 용액의 밀도 [kg/m^3]
- γ : 표면장력계수 [N/m]

하첨자

- e : 경계
- b : 단면평균
- i : 입구
- w : 벽면

1. 서 론

흡수식 열펌프 및 냉동기는 증기압축식 열펌프 및 냉동기에 비해 일반적으로 효율이 낮다. 그러나 CFC 계열 냉매의 사용규제로 인해 흡수식 열펌프 및 냉동기의 연구가 다시 활기를 띠게 되었고, 그 결과 흡수현상을 연구한 논문들이 많이 발표되고 있다. 그러나 대부분의 논문들에서는 실험에 의한 연구결과들을 발표하였고, 수치해석에 의한 연구결과는 많이 발표되고 있지 않다. 그 이유는 수많은 판군 사이에서 일어나는 유동과 흡수현상이 너무 복잡해서 실제 현상과 유사하게 모델링하는 것이 매우 힘들기 때문이다. 따라서 대부분의 수치해석연구에서는 간단한 형상과 단순화된 유동을 다루고 있다.

열 및 물질전달현상을 동시에 고려한 대표적인 수치해석연구는 다음과 같다. Yih and Seagrave⁽¹⁾는 흐름방향의 온도변화는 무시하고, 액막두께 방향으로 선형화된 온도구배를 가지는 액막에 대한 해석을 하였다. Grossman⁽²⁾은 경사평판을 일정한 온도나 단열상태로 가정하여 층류액막유동에 대한 에너지 및 확산방정식을 해석하였고, Lee et al.⁽³⁾은 수평원관에서 리튬브로마이드 수용액의 열 및 물질전달에 대하여 해석하였다. 그러나 이들 모두는 비교적 간단한 2차원 형상에 대한 해

석이었다. 실제 사용되어지고 있는 시스템의 수평관 흡수기에서는 주로 흰 달린 수평관이 사용되고 있으므로, 2차원 모델을 이용한 해석결과는 적용하기가 매우 제한적이다.

본 연구에서는 실제 사용되고 있는 흰이 달린 수평관 흡수기와 유사하게, 좁은 흰이 달린 경사면을 흐르는 유동에 대해 열전달 및 흡수현상을 수치해석하였다. 이 수치해석모델을 이용해서 3차원 온도, 농도 분포를 조사하였다. 그리고, 이 값들을 이용하여 흡수기 경사 밑면의 형상, 흰의 간격, 흰의 높이 등의 변화에 따른 열전달 및 흡수성능을 비교 분석하였다.

2. 모델링

3차원 흡수현상을 해석하기 위해 사용된 계산 영역의 개략도는 Fig. 1과 같다. 흰이 달린 표면위를 흐르는 리튬브로마이드 수용액은 경계면에서 시스템의 냉매로 사용되는 수증기를 흡수한다. 이 흡수는 벽과 용액의 온도 차이에 의해 발생한 온도 구배에 기인한 것이며, 수증기에서 물로의 상변화를 의미한다. 상변화시 수증기가 액화열을 방출하므로 경계면에서는 열 및 물질전달이 동시에 일어나는 것이다.

본 연구의 흡수기 모델을 해석하기 위한 가정은 다음과 같다.

- (1) 물성치는 온도와 농도의 변화에 무관하다.
- (2) 흡수되는 수증기의 질량은 무시한다. 따라서 용액의 질량유량은 일정하다.
- (3) 일정한 경사면을 흐르는 유동은 층류이다.
- (4) 용액의 속도는 입구에서부터 충분히 발달되었고, z 방향성분만 가진다.
- (5) 경계면에서 평형 압력은 일정하다.
- (6) 표면장력은 경계면 전체에서 일정하다.

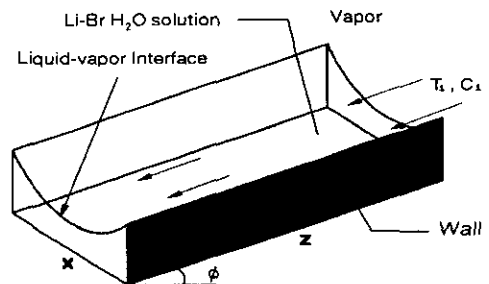


Fig. 1 Calculation domain.

2.1 접촉각과 표면장력

벽에 두 가지 다른 유체가 접촉할 경우에 분자 간의 인력으로 인한 접촉각이 형성된다. 흰 사이의 간격이 중력을 무시할 정도로 충분히 작으면 두 유체의 경계면은 표면장력에 의해 원호를 형성한다.⁽⁴⁾

$$\Delta P = \frac{\gamma}{R} \tag{1}$$

여기서 γ 은 표면장력계수를 나타내고, R 은 자유표면의 곡률 반지름, ΔP 는 유체 사이의 압력차를 나타낸다. 여기서 R 은 접촉각과 흰 사이의 간격을 알면 결정할 수 있으므로, 경계면의 형상이 결정된다. 이로 인한 xy 평면의 해석 단면은 Fig. 2와 같다. 단면의 형태는 밑면의 모양에 따라 결정된다. Fig. 2의 (a)는 밑면이 직사각형이며, (b)는 밑면이 원, (c)는 타원, (d)는 포물선이다. 타원형태와 포물선형태의 단면에서는 수직흰의 길이를 전체 높이(밑면의 최하점에서 흰 끝까지의 거리)의 20%로 설정하여, 용액이 흰 위로 넘치지 않게 함으로써 실제로 존재 가능한 유동에 가깝게 하였다.

2.2 속도해석

가정에 의한 운동방정식은 다음과 같다

$$u, v = 0, \quad w = w(x, y) \tag{2}$$

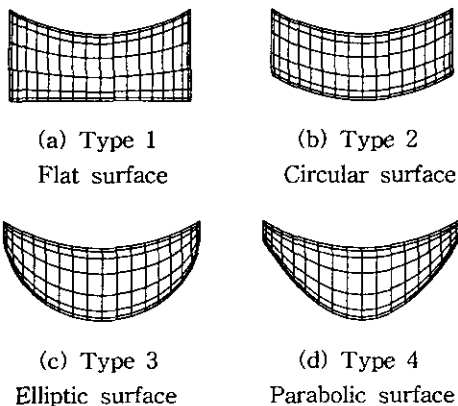


Fig. 2 Various types of surfaces.

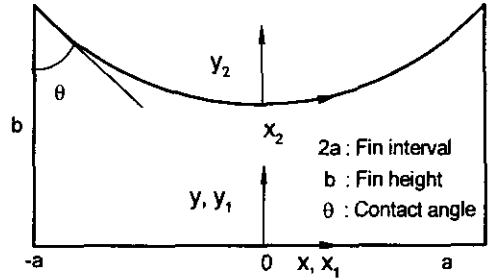


Fig. 3 Coordinate system for the xy plane.

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial z} - \rho g \sin \phi \right) \tag{3}$$

여기서 흐름방향의 압력변화가 없다고 가정하면 $\partial P / \partial z = 0$ 이 된다. 속도는 z 방향의 성분만 가진다. Fig. 3에서 $x-y$ 는 평면, x_1-y_1 은 밑면, x_2-y_2 는 경계면에서의 좌표를 나타내며, 속도에 관한 경계조건은 다음과 같다.

$$x = -a, a \text{와 } y_1 = 0 \text{에서 } w = 0 \tag{4}$$

$$y_2 = 0 \text{에서 } \frac{\partial w}{\partial y_2} = 0 \tag{5}$$

여기서 y_1 은 밑면에 수직인 좌표이고, y_2 는 경계면에 수직인 좌표를 나타낸다. 양쪽의 흰과 밑면에서는 속도가 0이고, 그 위의 경계면에서는 수증기의 점성을 고려하지 않고, 액막의 속도만 고려한 경계식을 사용하였다.

2.3 온도와 농도해석

온도와 농도분포를 계산하기 위해 이용한 지배방정식은 다음과 같다.

에너지방정식 :

$$w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\nu}{Pr} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \tag{6}$$

확산방정식 :

$$w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\nu}{Sc} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \tag{7}$$

두 지배방정식의 경계조건은 다음과 같다.

$$x = -a, a \text{에서 } T = T_w, \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

$$y_1 = 0 \text{에서 } T = T_w, \frac{\partial C}{\partial y_1} = 0 \quad (9)$$

이러한 경계조건을 갖는 이유는 벽의 온도가 일정하고, 벽을 통한 물질이동이 없기 때문이다. 평형상태의 경계면에서 압력이 일정하면 식(10)과 같이 온도를 농도의 함수로 나타낼 수 있다. 그리고 수증기에서 용액으로의 상변화 과정으로 인한 경계조건은 식(11)과 같다.

$$y_2 = 0 \text{에서 } T_e = f(C_e) \quad (10)$$

$$q_e'' = h \cdot n'' \quad (11)$$

McNeely⁽⁵⁾에 의하면 리튬브로마이드 수용액의 농도변화가 작을 때 일정압력 하에서 온도와 농도의 조건을 나타낸 식(10)은 다음과 같이 1차식으로 나타낼 수 있다.

$$T_e = B_1 C_e + B_2 \quad (12)$$

식(11)에서 h 는 수증기가 액체에 흡수될 때 발생하는 잠열로, 수증기의 엔탈피에서 용액 내의 물의 엔탈피를 뺀 값이다. n'' 은 흡수되는 수증기의 질량유속을 나타내며, q_e'' 은 수증기가 상변화하면서 용액에 흡수된 열을 나타낸다. 위에서 경계면에 관련된 식(10)과 식(11)을 사용하면 경계면에서의 온도와 농도를 결정할 수 있게 된다.

3. 수치해석

x, y 방향 격자는 28×31 이고, 대수격자생성법으로 격자를 생성하였다. 보다 정확한 결과값을 얻으려면 경계면에서 격자의 간격이 상당히 작아야 하기 때문에 z 방향으로 10^7 개 이상의 격자를 생성하여 수렴조건을 만족시켰다. 펜티엄 II에서 450 MHz CPU일 때 계산시간은 24시간이 소요된다. 속도는 경계조건식(4)와 (5)를 이용하여 SOR (Sucessive Over Relaxation)법으로 풀었다. 온도, 농도의 해석은 유한차분법(Finite Difference

Table 1 Calculating conditions and properties

l	0.03 m	k	0.487 W/m · K
T_i	50°C	h	2.721×10^6 J/kg
C_i	0.6	D	1.6×10^{-9} m ² /s
T_w	30°C	ν	3.0×10^{-6} m ² /s
P_e	9.2 mmHg	ϕ	45°
ρ	1,700 kg/m ³	θ	60°
C_p	1,570 J/kg · K	Pr	21.43
g	9.807 m/s ²	Sc	1875

Method)으로서 Runge-Kutta법을 사용하였고, 동시에 경계면의 온도, 농도는 식(10)과 식(11)을 연결한 식에 SOR을 수행하여 얻었다.

입구와 경계면이 만나는 선에서 입구온도 및 입구농도와 경계온도 및 경계농도와의 불일치로 인하여 불연속적인 선이 존재하게 된다. 이를 극복하기 위하여 입구온도와 농도로부터 입구에서 10^{-12} m 이내의 유동을 계산하였고, 그때의 경계면의 온도와 농도를 입구온도와 농도로 가정하여, 수치해석 초기값 지정시 입구의 경계선에서 온도와 농도가 불일치되는 문제를 해결하였다. 본 연구에 사용된 계산조건과 물성치는 Table 1과 같다.

4. 계산결과 및 고찰

Table 2는 각각의 단면에서 계산수행시 사용한 유동조건들과 질량유량과 평균 속도의 결과를 나타낸다. 속도계산식을 수행하여 Re, Pr, Sc를 각각 일치시켰을 때의 단면의 모양에 따른 유동을 비교하였다. 일반적으로 흡수기에서 Re는 100보다 작기 때문에 Table 2와 같은 조건을 주었다. 계산결과에서 \bar{w} (평균 속도)는 서로 차이가 없었으나, Γ (질량유량)은 Type 1이 가장 높다. 일정한 평균 속도에서 다른 질량유량을 갖는다는 것

Table 2 Flow conditions and results

	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
Re	70	70	70	70
Pr	21.43	21.43	21.43	21.43
Sc	1875	1875	1875	1875
Γ [kg/s]	3.2E-4	2.9E-4	2.7E-4	2.7E-4
\bar{w} [m/s]	0.1506	0.1484	0.1485	0.1503

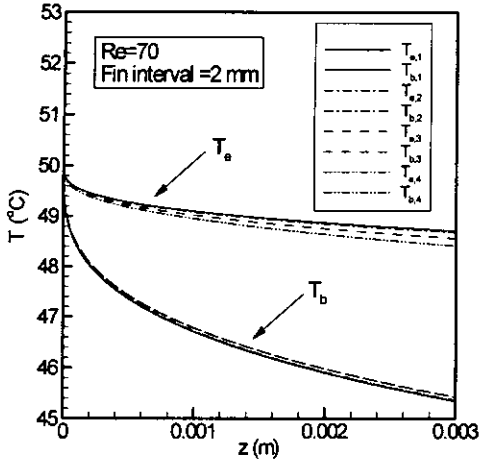


Fig. 4 Variation of the mean temperatures at the interface and the cross-section along the channel axis.

은 유효(effective) 용액 두께의 차이가 발생한다는 것을 의미하고, 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Gamma = \rho \bar{w} A \approx \rho \bar{w} (t \cdot 2a) \quad (13)$$

여기서 t 는 유효(effective) 용액 두께를 나타내고, Type 1의 t 가 가장 큰 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 Type 1이 다른 단면을 가진 형태들보다 점성으로 인한 유동의 감소가 가장 크기 때문이다. 그러므로 용액의 평균 속도가 같을 경우에, Type 3, 4에서 유동의 감소가 작은 것을 알 수 있고, 유효 용액 두께도 Type 3, 4가 작은 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 Reynolds 수가 70이고, 핀 간격이 2 mm일 때, z 방향에 따른 경계면의 평균 온도 (T_e)와 단면 평균 온도(T_b)의 변화를 나타낸다. T_e 는 z 방향에 따라 거의 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 T_b 는 입구 근처에서 T_e 보다 급격하게 감소하고, 점차로 선형적으로 감소한다. T_b 는 단면 형태에 따라 온도 차이가 거의 없다. 그러나 T_b 는 수증기 흡수에 영향을 미치는 인자가 아니다. 용액을 냉각시키는 이유는 경계면의 온도를 낮추기 위한 것이지 전체 온도를 낮추기 위해서가 아니기 때문이다. Type

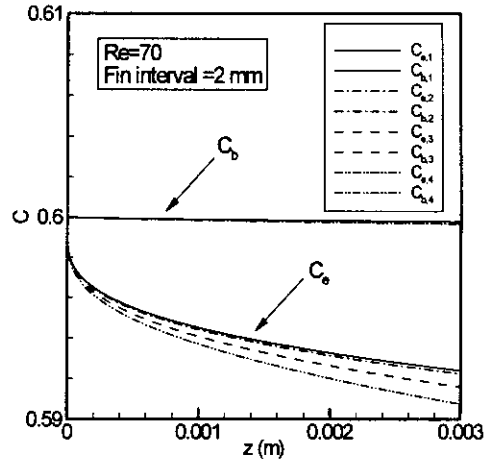


Fig. 5 Variation of the mean concentrations at the interface and the cross-section along the channel axis.

4는 다른 형태들에 비하여 T_e 가 낮다. 이것은 Type 4에서 경계면으로의 열전달이 가장 효과적으로 일어난 것을 나타낸다.

Reynolds 수가 70이고, 핀 간격이 2 mm일 때의 농도변화는 Fig. 5와 같다. 단면 평균 농도(C_b)는 거의 일치하고, 경계면의 평균 농도(C_e)는 Type 4에서 가장 낮다. 용액 내 리튬브로마이드 농도가 낮으면, 수증기 농도는 높으므로, Type 4의 수증기 흡수량이 가장 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 6는 Reynolds 수가 70이고, 핀 간격이 2

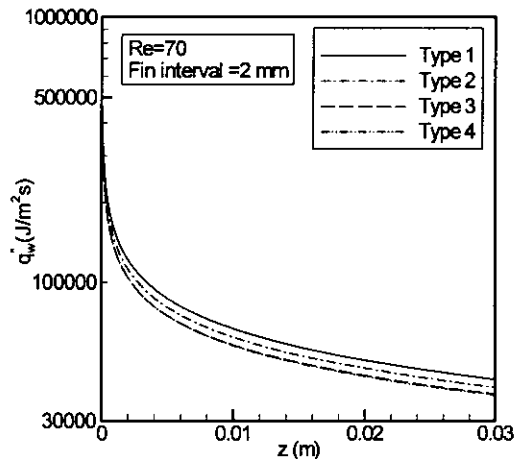


Fig. 6 Variation of the average heat fluxes at the wall along the channel axis.

mm일 때, z 방향에 따라 벽으로 전달되는 열을 xz 평면에 투영한 면적당 평균 열유속(q_w'')으로 나타낸 것이다. xz 평면에 투영시킨 이유는 이 논문에서는 나타내지 않았지만, 원이 없는 경사면과 비교하게 될 경우를 고려한 것이며, 실제로 두 원 사이의 거리당 열전달량과 물질전달량이 중요한 결과이지 전체 흡수면적당 열전달량과 물질전달량이 중요한 것은 아니기 때문이다. q_w'' 를 계산한 식은 다음과 같다.

$$q_w'' = \frac{1}{2a} \sum_{i=1}^n k \frac{\partial T_i}{\partial y_1} \Delta x_{1,i} \Big|_{y_1=0} + \frac{1}{2a} \sum_{i=1}^m k \frac{\partial T_i}{\partial x} \Delta(y_2 - y_1)_i \Big|_{x=-a,a} \quad (14)$$

q_w'' 는 입구 근처에서 급격히 감소하고, 그 후 완만하게 감소하는 열전달현상의 전형적인 모습을 보인다. $z=30$ mm일 때 Type 1이 3, 4에 비해 약 10% 열전달량이 크다. 그러나 집수 길이가 Type 1이 약 20% 크기 때문에 전체 흡수면적당 열전달량은 Type 3, 4가 크다. Type 3, 4의 집수 길이와 q_w'' 는 거의 일치하는데, 실제로 이후의 Fig. 7은 Type 4가 Type 3보다 우수한 흡수성능을 보여주고 있다. 앞에서 언급했듯이 단면 내부보다는 경계면으로의 열전달이 중요하므로, 열전달량이 반드시 흡수성능을 지배한다고 할 수는 없다.

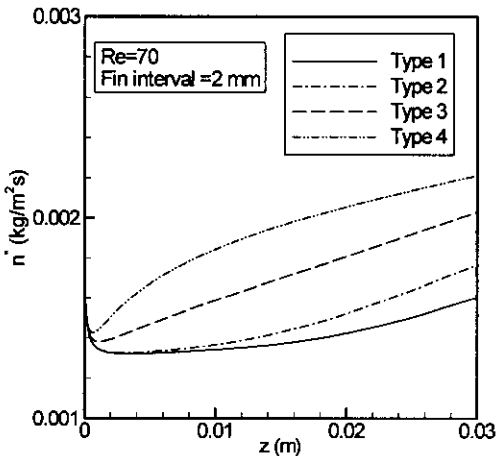


Fig. 7 Variation of the mass fluxes at the interface along the channel axis.

Fig. 7은 Reynolds 수가 70이고, 원 간격이 2 mm일 때, xz 평면에 투영한 면적당 흡수되는 수증기의 질량유속(n')을 z 방향에 따라 나타낸 것이다. n' 를 구하는 식은 다음과 같다.

$$n'' = \frac{1}{2a} \sum_{i=1}^n \rho D \frac{\partial C_i}{\partial y_2} \Delta x_{2,i} \Big|_{y_2=0} \quad (15)$$

Fig. 7을 보면 입구 근처에서 n' 은 감소했다가 증가한다. 입구 근처의 원 상부에서는 입구 용액과 원과의 급격한 온도구배가 형성되며, 그로 인해 원 근처의 경계면에서만 온도가 낮아져 수증기를 흡수하게 된다. 그 후 용액이 흘러내리면서 원 상단 근처의 용액온도는 점차 내려가고, 온도구배도 작아지므로 흡수량이 감소하다가, 밑면에서 발달한 온도구배가 경계면까지 형성되어 경계면 전체로 흡수하는 영역이 증가하면서 흡수량도 증가하는 것이다. Type 4는 Type 1에 비해 $z=30$ mm에서 약 37%의 수증기가 더 흡수된다. 즉 포물선형태의 흡수기의 유동 특성은 경계면으로 효과적인 열전달을 일으키고, 이로 인해 물질전달을 증가시키는 것이다.

Fig. 8로부터 Type 4의 수증기 흡수성능이 가장 우수함을 알 수 있다. Reynolds 수가 작거나 원의 간격이 작을 경우 xz 평면에 투영한 면적당 흡수되는 수증기의 전체 평균 질량유속(n_{avg}'')이 크다. 원의 간격이 작아지면 수증기 단면형태에

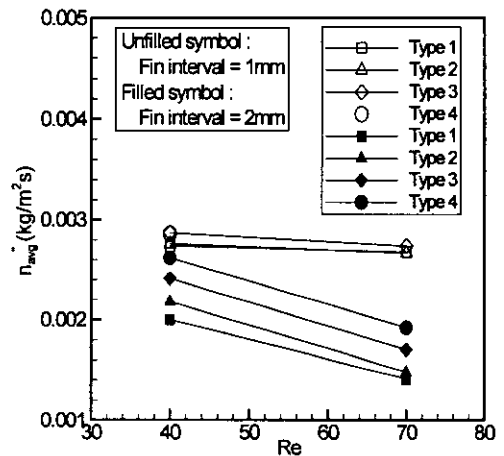


Fig. 8 Average mass fluxes for the different surface shapes and the fin intervals.

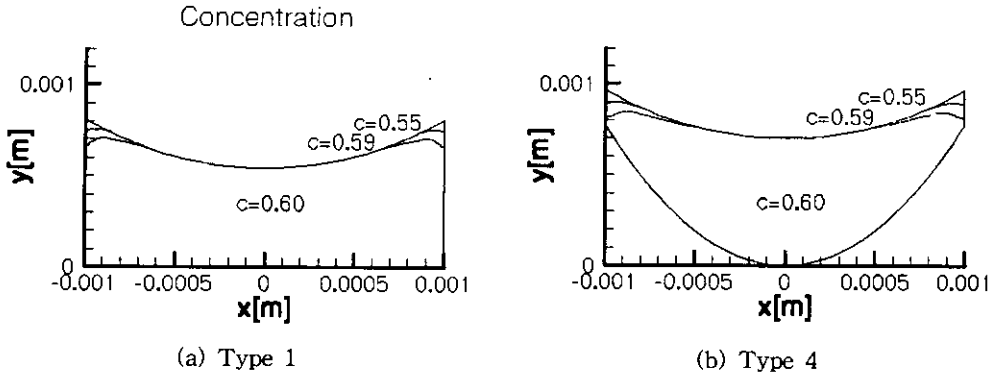


Fig. 9 Contour lines of concentration at $z=30$ mm ($Re=70$).

다른 흡수량의 차이가 작아진다. Reynolds 수가 70이고, 핀의 간격이 1 mm일 때, Type 4는 계산이 불가능하다. 그 이유는 핀의 높이가 10 mm 이상이 되어도 용액이 핀 위로 넘치게 되기 때문이다. 또한 용액이 넘치면 경계면 확장효과가 없어지게 된다.

Fig. 9은 위의 계산조건에서 $z=0.03$ m일 때, 용액의 농도분포를 등농도선으로 나타낸 것으로 수치는 용액의 농도를 나타낸다. Fig. 9에서 수증기 흡수영역은 핀 상부 근처에서 존재하는 것을 알 수 있다. 이것으로 핀의 역할은 경계면을 확장시키는 것 이외에도 용액과 핀 사이의 급격한 온도분포를 조성하여 수증기를 흡수한다는 것을 알 수 있다. 본 연구대상의 흡수기처럼 유동길이 길지 않으면 경계면 전 범위가 아니라 핀 근처의 경계면에서 수증기가 흡수된다. 한편 그림

상에서는 큰 차이가 나지는 않지만 Type 4는 Type 1에 비해서 수증기 흡수량이 더 많은 것을 보여준다.

Type 3에 대한 Fig. 10에서 Reynolds 수가 증가할수록 핀 높이는 증가하고, n_{avg} 는 감소하다가 증가한다. 실제 유동은 Reynolds 수가 30 이하일 때 존재하기 어렵기 때문에 그림과 같은 값을 갖지 않는다. 또 실제 유동은 Re가 증가할수록 n_{avg} 가 감소하는데, 그 이유는 고정된 핀의 높이 이상으로 유동이 형성되어 경계면 확장효과가 없어지기 때문이다.

Fig. 11에서 핀의 간격이 좁을수록 n_{avg} 가 증가한다. 그러나 핀의 간격이 매우 작은 경우에 Reynolds 수를 맞추기 위해서는 핀의 높이가 지나치게 증가하게 되고, 이로 인한 흡수 표면의

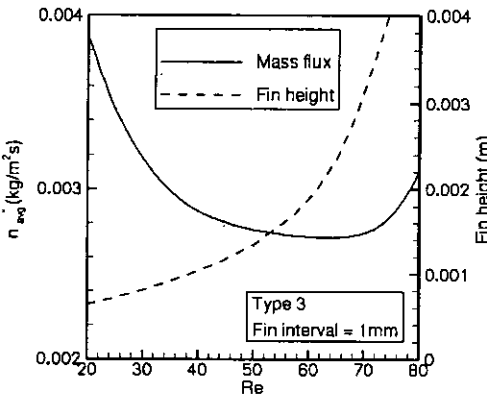


Fig. 10 The effect of Reynolds number on average mass flux and fin height for the type 3.

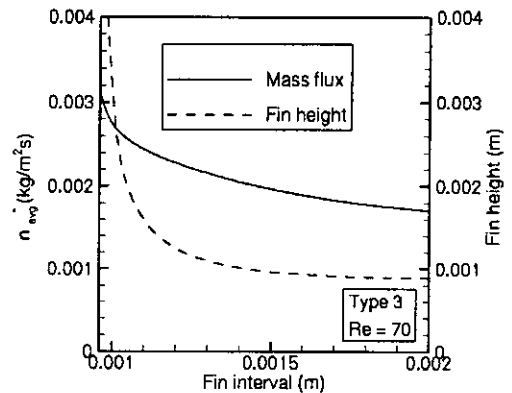


Fig. 11 The effect of fin interval on average mass flux and fin height for the type 3.

확대로 불필요한 열전달이 증가하게 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 좁은 흰 사이를 흘러내리는 리튬브로마이드 수용액에서, 수증기가 용액으로 흡수되는 현상을 3차원으로 해석하였다. 본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

(1) 좁은 흰이 달린 경사면 흡수기에서 수증기 흡수영역은 흰 상부 근처에서 존재하며, 용액 두께가 얇을수록 온도구배가 크게 형성되어, 효과적으로 흡수성능을 증가시킬 수 있다.

(2) 실질적인 용액 두께의 감소로 Type 4인 포물선형태의 흡수기가 흡수성능이 가장 우수하다.

(3) 흰의 간격은 좁을수록 수증기 흡수성능이 우수하다. 그러나 일정간격 이하가 되면, 점성의 영향을 크게 받아 흰 높이가 증대하고, 파대한 열전달 증가를 초래한다.

참고문헌

1. Yih, S. M. and Seagrave, R. C., 1980, Mass

transfer in laminar falling liquid film with accompanying heat and interfacial shear, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 23, pp. 749-758.

2. Grossman, G., 1983, Simultaneous heat and mass transfer in film absorption under laminar flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 26, pp. 357-371.

3. Lee, K. S., Seo, S. C., Kim, Y. I. and Park, D. K., 1988, Coupled heat and mass transfer during the absorption of water vapor into LiBr-H₂O liquid solution flowing down the outside of the horizontal cylinder, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 140-149.

4. White, F. M., 1997, *Fluid Mechanics*, 3rd ed., McGraw Hill international editions, pp. 26-28.

5. McNeely, L. A., 1985, Thermodynamic properties of aqueous solutions of lithium bromide, *ASHRAE Trans*, pp. 413-434.