

2성분 혼합물질의 층류 막비등에서 복사열전달의 효과

성 현 찬[†], 김 경 훈^{*}

금오공과대학교 대학원, ^{*}금오공과대학교 기계공학부

Effect of Radiation on Laminar Film Boiling of Binary Mixtures

Hyeon-Chan Seong[†], Kyoung-Hoon Kim^{*}

Graduate School, Kumoh National Institute of Technology, Kumi 730-701, Korea

^{*}School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Kumi 730-701, Korea

(Received October 20, 2003; revision received August 23, 2004)

ABSTRACT: This paper presents the results of a theoretical study of the effect of radiation during free convective laminar film boiling for methanol/water binary mixtures on an isothermal vertical wall at atmospheric pressure. With the well-known boundary layer theory as a basis, a theoretical model has been formulated into consideration for mass diffusion at liquid phase. The equations are numerically solved by a similarity method to investigate the effects of radiation emissivity on the surface with various parameters such as wall superheat and composition of more volatile component at liquid phase far from the wall. From the results, the distributions of the physical quantities are investigated in both phases. New correlations are proposed to predict the heat transfer coefficient of binary mixtures. It is shown that the proposed correlations are in good agreement with numerical results and with Bromley's correlation within maximum 11% errors. It is also found that as the wall superheat is increased, radiation effect becomes more important.

Key words: Film boiling(막비등), Binary mixtures(2성분 혼합물), Mass diffusion(물질확산), Similarity method(상사법), Wall superheat(벽 과열도)

기 호 설 명

C_p : 정압비열 [J/(kg K)]
 D : 확산계수 [m^2/s]
 g : 중력가속도 [m/s^2]
 h_{lv} : 증발잠열 [J/kg]
 k : 열전도도 [W/(m K)]

L : 수직벽의 길이 [m]
 m : mass flux [$kg/(m^2s)$]
Pr : Prandtl 수
 q : 열 플럭스 [W/m^2]
Sc : Schmidt 수
 T : 온도 [K]
 ΔT_i : 계면 과열도, $T_i - T_b$
 ΔT_w : 벽 과열도, $T_w - T_b$
 u : x 방향 속도성분 [m/s]
 v : y 방향 속도성분 [m/s]
 w : 질량분율

[†] Corresponding author

Tel.: +82-54-467-4396; fax: +82-54-467-4472

E-mail address: hcsung@kumoh.ac.kr

그리스 문자

α	: 열확산계수 [m^2/s]
α_l	: 액체의 복사 흡수율
Γ	: 무차원 농도
δ	: 막두께 [m]
ϵ_w	: 표면의 방사율
η	: 상사변수
θ	: 무차원 온도
μ	: 점성계수 [$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$]
ν	: 동점성 계수 [m^2/s]
ρ	: 밀도 [kg/m^3]
σ	: Stefan-Boltzmann 상수
ψ	: 유동함수

하첨자

1	: 성분 1
b	: 주류
i	: 계면
l	: 액상
r	: 복사
v	: 증기상
w	: 벽

1. 서 론

비등(boiling)은 액체가 액체의 포화온도보다 충분히 높은 온도로 유지되는 표면과 접하고 있을 때 고체 표면에서 액체에서 기체로 상변화하는 것이다. 이러한 비등은 특히 금속물질들의 경화를 위하여 물, 기름 또는 폴리머 용액을 사용하는 산업현장에서 흔히 볼 수 있다.

혼합물질은 일반적으로 순수한 단일성분을 혼합한 것을 말하며 비공비(non-azeotropic) 혼합물과 공비(azeotropic) 혼합물로 구분된다. 비공비 혼합물은 등압하에서 액상과 기상 간에 액화 또는 기화가 일어날 때 온도가 변하는 특징이 있으며, 상변화하면서 기상 및 액상의 성분비도 변하게 된다. 비공비 혼합물의 증발과정은 비등점이 상대적으로 낮은 성분(more volatile component)이 비등점이 상대적으로 높은 휘발성 성분(less

volatile component)에 비해 비등되는 비율이 높아서 기액 계면 근방에 남아 있는 혼합액은 주류에 비해 비등점이 높은 휘발성 성분의 농도가 높은 농도분포를 가진 확산층이 형성되고 액체가 연속적으로 증발이 되기 위해서는 이 확산층을 통하여 혼합액체의 물질확산이 이루어져야 한다. 이 확산층을 통한 물질의 확산과정에서 휘발성 성분의 분압이 낮아지고 이에 따른 계면 근방의 포화온도가 높아져서 결국 계면과 증발 표면과의 온도차가 저하되어 열전달성능이 저하되는 것으로 알려져 있다.

단일성분 액체의 비등 특성은 지금까지 많이 연구되었지만 대부분의 산업응用に 이용되는 비등액은 혼합액체가 주로 사용되고 있다. 혼합물에서 기상과 액상의 조성은 열역학적 기액 상평형(vapor-liquid phase equilibrium)으로 인하여 다르기 때문에 액체 혼합물의 비등은 열전달의 구동력(driving force)은 물질전달에 의해 지배된다는 점에서 단일성분 액체의 비등과는 구별된다. 일반적으로 물질 확산율은 액상에서 열확산율에 비하여는 매우 느리기 때문에 기액 계면 근처에서 휘발성 성분(more volatile component)의 고갈로 인하여 혼합물에서는 기액 계면에서 온도 상승과 증발지연이 예상된다.

과거 2성분 혼합물에서의 핵비등에 대한 연구가 활발히 이루어졌으나 막비등에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 단지 실험적으로 연구가 진행되어 왔으며 이론적인 해석은 활발히 이루어지지 않았다. 이런 이론적인 해석들에서 물질확산이 비등 열전달과정에 중요한 역할을 한다는 것을 밝혔다.

수직 평판의 포화 막비등에 대한 이론적인 첫 번째 연구는 Bromley⁽¹⁾에 의하여 수행되었으며 증기막에서의 관성력은 무시할 만큼 작고 온도분포는 선형이라는 가정을 하였다.

Koh⁽²⁾는 증기상과 액상에서의 관성력을 고려함과 동시에 계면에서 접선 속도와 전단력이 연속이라는 조건과 계면온도는 포화온도라는 조건을 이용하여 두 상에 대한 경계층 방정식으로 수직 평판 상에서의 포화 막비등을 해석하였다.

Sparrow and Cess⁽³⁾는 막비등에 있어서 기액 계면은 정지(stationary)되었으며 포화상태에 있다는 가정으로 액상에 대한 에너지방정식을 고려함으로써 과냉효과를 조사하였다.

Yue and Weber⁽⁴⁾는 수직 평판에 대하여 액상에서 물질확산과 열전도를 고려한 이상 경계층 이론으로서 2성분(binary) 포화혼합물의 막비등을 해석하였다. 이 연구에서 이들은 휘발성의 차이가 큰 혼합물인 경우 단일성분의 비등에 대하여 Bromley⁽¹⁾가 예측한 것보다 훨씬 큰 열 플럭스를 산출한다는 것을 주장함으로써 확산현상을 생략한 가정은 잘못된 결과를 도출할 수 있다는 것을 보였다.

Marschall and Moresco⁽⁵⁾는 가열된 수직 평판에서 2성분 혼합증기의 증류 막비등에 대한 해석에서 기액 계면온도는 액체혼합물 내의 확산현상에 의존함을 보여주었으며 확산현상이 생략되었을 때의 잘못된 결과는 계면온도와 증기혼합물의 물성치의 상호 의존성에 기인하기 때문임을 주장하였다.

최근에 Liu et al.⁽⁶⁾은 2성분 혼합물에 대하여 포화 막비등 열전달을 이론적으로 해석하여 구(sphere)에 대한 실험을 수행한 결과와 비교하였으며 물질확산의 효과로 인하여 기액 계면의 온도가 높아짐을 보여주었다. 또한 이들은 Scriven⁽⁷⁾에 의해 제안된 기포 성장 반경과 시간, 그리고 물성치와의 상관식에서 확산에 의한 효과를 나타내는 항을 인자로 하여 단일 휘발성 성분의 비등에서의 열 플럭스와 이 인자를 조합한 형태로 2

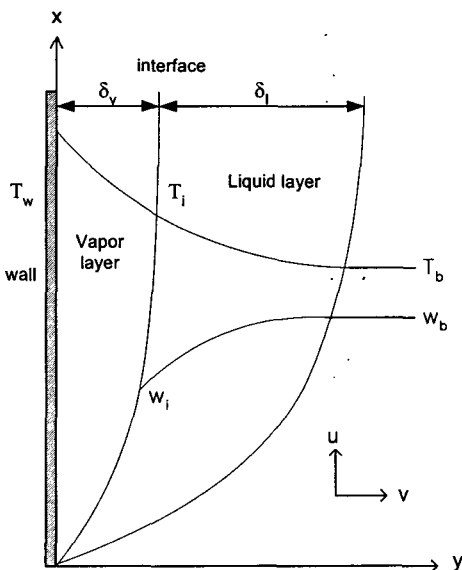


Fig. 1 Physical model and coordinates.

성분 혼합물에서의 열플럭스를 예측하는 관계식을 제시하였다. 그러나 이들의 논문에서는 복사의 영향으로 인한 계면온도의 변화는 고려하지 않고 특정한 위치에서의 물리량들을 대표값으로 하였으며, 따라서 벽과 주류 사이의 온도차이가 커질수록 중요하게 되는 복사효과에 대한 영향은 조사하지 못하였다.

따라서 본 논문에서는 비공비 혼합물의 특성을 나타내는 methanol/water 혼합물에 대하여 등은 수직벽에서 자연대류 막비등을 2상 경계층의 수치적 모델을 계산하고자 한다. 또한 물리량들을 계산함에 있어서 복사효과로 인한 계면온도 변화를 고려한 수치적분을 수행하여 벽 과열도와 주류에서의 휘발성 성분(메탄올)의 변화에 따른 복사의 효과를 조사하고 열전달 예측 상관식을 제시하고자 한다.

2. 막비등 모델

2.1 물리적 모델과 기본가정

일정한 압력 하에 있는 서로 다른 비등온도와 분자량을 가지는 2성분 혼합액체가 등은 수직벽에서 막비등하는 과정의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 비등점이 높은 성분(less volatile component)과 비등점이 낮은 성분(more volatile component)이 포화영역에서 각각의 질량분율(성분비)을 가지면서 비등하여 수직 벽면에 따라 얇은 막을 형성하여 상승하고 증기막을 둘러싸고 있는 혼합액체는 기액 계면으로 다가갈수록 비등점이 높은 성분이 증발되지 않는 상태로 남아 있게 되어

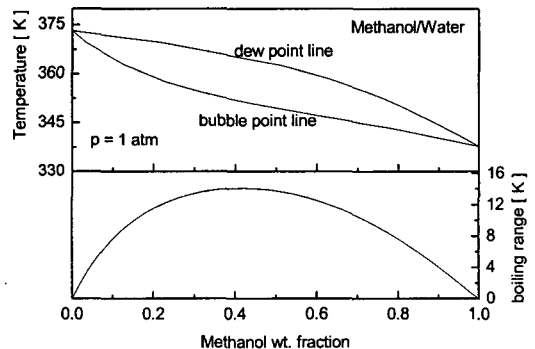


Fig. 2 Phase equilibrium diagram and boiling range.

농도(질량분율)가 높아지게 된다. 비등점이 높은 성분의 질량분율이 많아지게 된 기액 계면에서의 밀도가 주류층 혼합액체의 밀도보다 작아지게 되고 밀도차이로 인한 부력의 작용으로 혼합액체 경계층이 형성되어 상승한다. 수직벽 주위에서 결과적으로 상승하는 증기층, 즉 증기막과 상승하는 혼합액체 경계층으로 이루어진 평행류 2중 경계층이 형성된다. 좌표계로서 기액 계면에서 계면의 온도와 주류층의 온도가 같아지는 위치인 수직벽 최저점으로부터 수직 표면을 따라 쥘 길이 x 와 수직벽 표면으로부터 쥘 수직거리 y 를 잡아 주었다.

Fig. 2는 대기압하의 methanol/water 혼합물의 상평형 선도와 이슬점 온도와 기포점 온도의 차이로 정의되는 비등범위를 보여주고 있으며, 그림에서 보는 바와 같이 전 영역에서 methanol이 휘발성 성분이 됨을 알 수 있다. 또한 비등범위는 휘발성 성분(methanol)의 분율이 약 0.42에서 최대를 보여주고 있다.

또한, 본 연구에서는 메탄올/물의 2성분 혼합액체가 수직벽에서 막비등하는 모델을 해석하기 위하여 다음과 같은 기본 가정을 하기로 한다.

- (1) 기액 계면에서 표면장력의 효과는 무시한다.
- (2) 경계층 내의 흐름은 비압축성 층류흐름이다.
- (3) 주류에서 액체는 정체된 포화상태이며 총압은 일정하다.
- (4) 계면에서 기액 상평형은 Dalton의 분압법칙과 Raoult의 법칙을 따른다.
- (5) 증기층에서의 농도변화는 액체층의 농도변화에 비해 작아서 무시한다.
- (6) 수직벽에서 기액 계면으로의 복사는 무시할 만한 작은 액체층 두께에서 흡수되는 것으로 가정한다.

2.2 지배방정식 및 경계조건

본 연구에서는 Fig. 1에서 보여지는 것처럼 2성분 혼합액체가 수직벽에서 막비등하는 모델을 해석하기 위해서 2중 경계층 모델을 사용하며, 기액 경계면에서 멀리 떨어진 곳에서 액체는 정체되었으며 포화되어 있고, 증기층에서의 농도변화는 액체층의 농도변화에 비해 작아서 무시한다는 가정 하에서 경계층 이론을 이용하여 증기막과 액체 경계층에서의 지배방정식과 경계조건을 정

리하면 다음과 같다.

증기층 지배방정식

$$\frac{\partial u_v}{\partial x} + \frac{\partial v_v}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$u_v \frac{\partial u_v}{\partial x} + v_v \frac{\partial u_v}{\partial y} = \nu_v \frac{\partial^2 u_v}{\partial y^2} + \frac{g(\rho_b - \rho_v)}{\rho_v} \tag{2}$$

$$u_v \frac{\partial T_v}{\partial x} + v_v \frac{\partial T_v}{\partial y} = \frac{k_v}{\rho_v C_{pv}} \frac{\partial^2 T_v}{\partial y^2} \tag{3}$$

액체층 지배방정식

$$\frac{\partial u_l}{\partial x} + \frac{\partial v_l}{\partial y} = 0 \tag{4}$$

$$u_l \frac{\partial u_l}{\partial x} + v_l \frac{\partial u_l}{\partial y} = \nu_l \frac{\partial^2 u_l}{\partial y^2} + \frac{g(\rho_b - \rho_l)}{\rho_l} \tag{5}$$

$$u_l \frac{\partial T_l}{\partial x} + v_l \frac{\partial T_l}{\partial y} = \frac{k_l}{\rho_l C_{pl}} \frac{\partial^2 T_l}{\partial y^2} \tag{6}$$

$$u_l \frac{\partial w_l}{\partial x} + v_l \frac{\partial w_l}{\partial y} = D_l \frac{\partial^2 w_l}{\partial y^2} \tag{7}$$

경계조건

$$y = 0 : \quad u_v = 0, \quad v_v = 0, \quad T_v = T_w \tag{8}$$

$$y = \delta : \quad u_{vi} = u_{li} \tag{9}$$

$$\mu_v \left(\frac{\partial u_v}{\partial y} \right)_i = \mu_l \left(\frac{\partial u_l}{\partial y} \right)_i \tag{10}$$

$$T = T_i \tag{11}$$

$$w_v = w_{vi}, \quad w_l = w_{li} \tag{12}$$

$$\rho_v u_v \left(\frac{d\delta}{dx} - \rho_v v_v \right)_i = \rho_l \left(\rho_l u_l \frac{d\delta}{dx} - \rho_l v_l \right)_i \tag{13}$$

$$m_{1i} = -\rho_l D_l \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)_i + \frac{\rho_l}{\rho_l} (m_1 + m_2)_i \tag{14}$$

$$-k_v \left(\frac{\partial T_v}{\partial y} \right)_i + q_r = mh_{lv} - k_l \left(\frac{\partial T_l}{\partial y} \right)_i \tag{15}$$

여기에서 $q_r = \frac{\sigma}{1/\epsilon_w + 1/\alpha_l - 1} (T_w^4 - T_i^4)$

$$y = b : \quad u_i = 0, \quad w_i = w_b, \quad T_i = T_b \quad (16)$$

2.3 상사변환(Similarity Transformation)

증기층과 액체층에 대한 편미분 지배방정식을 상미분방정식으로 만들기 위하여 연속방정식을 만족하는 유동함수를 도입하고 변수분리를 가지는 것으로 가정한다.

$$\psi = H(\zeta)F(\eta) \quad (17)$$

여기에서 좌표변환은 다음과 같이 표현한다.

$$\zeta = x, \quad \eta = yG(x) \quad (18)$$

위의 식(17)과 (18)을 이용하여 좌표변환을 하면 새로운 독립변수들이 얻어진다.

$$\eta_v = c_v y x^{-1/4} \quad (19)$$

$$\eta_l = c_l (y - \delta_v) x^{-1/4} \quad (20)$$

여기에서, $c_v = \left(\frac{g(\rho_\infty - \rho_w)}{4\nu_v^2 \rho_w} \right)^{1/4}$

$$c_l = \left(\frac{g(\rho_\infty - \rho_w)}{4\nu_l^2 \rho_w} \right)^{1/4}$$

또한 증기층과 액체층에 대한 종속변수들은 다음과 같이 표현된다.

$$F_v = \frac{\psi_v}{4\nu_v c_v x^{3/4}} \quad (21)$$

$$F_l = \frac{\psi_l}{4\nu_l c_l x^{3/4}} \quad (22)$$

$$\theta_v = \frac{T_v - T_i}{T_w - T_i} \quad (23)$$

$$\theta_l = \frac{T_l - T_b}{T_i - T_b} \quad (24)$$

$$\Gamma_l = \frac{w_l - w_b}{w_i - w_b} \quad (25)$$

위의 유동함수와 무차원 변수들을 이용하여 상

사변환을 하면 다음과 무차원 지배방정식과 경계 조건이 얻어진다.

증기층 지배방정식

$$F_v''' + 3F_v F_v'' - 2F_v'^2 + \frac{\rho_b/\rho_v - 1}{\rho_b/\rho_w - 1} = 0 \quad (26)$$

$$\theta_v'' + 3Pr_v F_v \theta_v' = 0 \quad (27)$$

액체층 지배방정식

$$F_l''' + 3F_l F_l'' - 2F_l'^2 + \frac{\rho_b/\rho_l - 1}{\rho_b/\rho_w - 1} = 0 \quad (28)$$

$$\theta_l''' + 3Pr_l F_l \theta_l' = 0 \quad (29)$$

$$\Gamma_l'' + 3Sc_l F_l \Gamma_l' = 0 \quad (30)$$

경계조건

$$\eta_v = 0$$

$$F_v = F_v' = 0 \quad (31)$$

$$\theta_v = 1 \quad (32)$$

$$\eta_v = \eta_{v\delta} (\eta_l = 0)$$

$$F_{li} = R F_{vi}, \quad F_{li}' = F_{vi}' \quad (33)$$

$$F_{li}'' = R F_{vi}'' \quad (34)$$

여기에서, $R = \left(\frac{\rho_v \mu_v}{\rho_l \mu_l} \right)^{1/2}$

$$\frac{Ja_v}{Pr_v} - \frac{q_r x^{1/4}}{C_v h_{lv} \mu_v \theta_{vi}} = -\frac{3F_{vi}'}{\theta_{vi}} + \frac{Ja_l}{Pr_l R} \frac{\theta_{li}'}{\theta_{vi}} \quad (35)$$

여기에서, Jacob 수는 $Ja = \frac{c_p \Delta T}{h_{lv}}$ 이다.

$$\theta_{vi} = 0 \quad (36)$$

$$\theta_{li} = 1, \quad \Gamma_{li} = 1 \quad (37)$$

$$Sc_l = \frac{\Gamma_{li}'}{3F_{li}} \frac{w_i - w_b}{w_{vi} - w_{li}} \quad (38)$$

$$\eta_l = b, F_{lb}' = 0 \quad (39)$$

$$\Gamma_{lb} = 0 \quad (40)$$

$$\theta_{lb} = 0 \quad (41)$$

경계조건 (35)은 벽에서의 복사열전달의 영향을 포함한 기액 계면에서의 에너지 평형을 나타내며, (38)은 계면에서 휘발성 성분의 질량보존을 나타낸다.

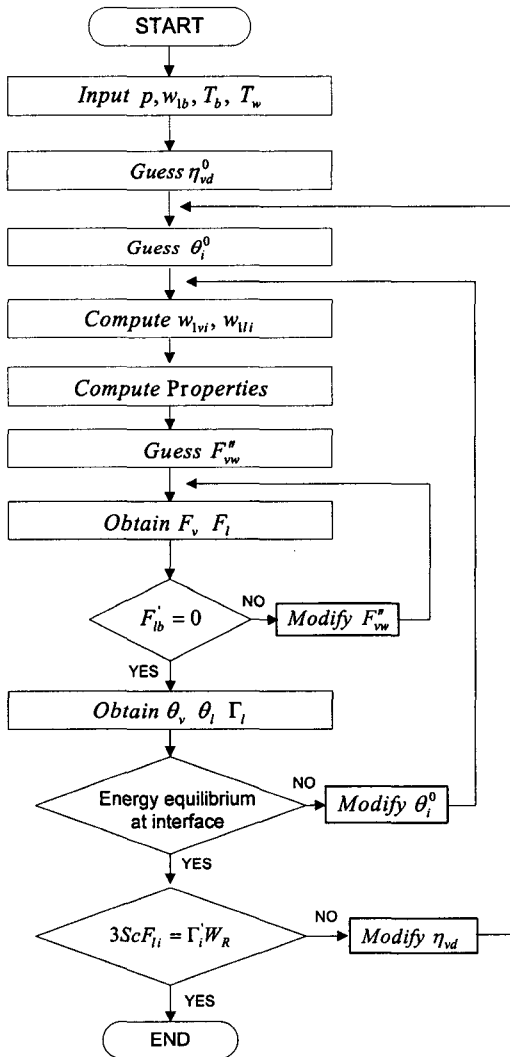


Fig. 3 Flow chart for numerical calculation.

2.4 수치해석 방법 및 물성치

본 연구에서 사용된 2상 경계층의 이론적 모델에 대한 지배방정식 (26)~(30)은 경계조건 (31)~(41)과 함께 증기막 두께(η_{vd}), 수직벽에서의 전단응력(F_{vw}''), 그리고 기액 계면온도(T_i)를 결정하는 3점 경계문제(three point boundary problem)로 되며, 이를 수치해석하기 위한 흐름도는 Fig. 3과 같다. 3개의 미지수를 구하기 위하여 Shooting Method를 이용하였으며 증기층과 액체층에 대한 연립 상미분방정식을 풀기 위하여 5차 Runge-Kutta Method를 이용하였다.

본 연구의 대상으로 선정된 methanol/water의 혼합물에 대한 열물성을 예측하기 위하여 참고문헌⁽⁸⁻¹⁰⁾의 식들을 이용하였으며, 주류에서의 압력은 1 MPa, 그리고 평판의 길이는 1.25 cm이다. 또한, 증기막과 액막에서의 물성치는 일정한 것으로 가정하였으며 각각 막온도 $(T_w + T_i)/2$ 와 $(T_i + T_b)/2$ 에서 계산된 값을 이용하였다.

2.5 물리량

층류 막비등에 대하여 수직벽으로부터 증기막으로의 열전달률은 벽면에서의 열전달과 복사로 인한 열전달의 합으로 표현된다.

$$q = -k_v c_v x^{-1/4} (T_w - T_i) \theta_w' + q_r \quad (42)$$

식(42)에서 우변의 첫번째 항은 벽면에서의 열전달률을 표현하며, 두번째 항은 복사열전달률을 나타낸다.

또한, 계면에서의 휘발성 성분 1의 증발유량은 전체 증발유량 중 1성분의 계면에서 증기층 질량분율의 비에 해당된다.

$$m_1 = (3\mu_v c_v x^{-1/4} F_{vi}) w_{v1} \quad (43)$$

국소 열전달계수는 식(44)으로 표현되며 식(42)에서 보여지는 것과 같이 벽면에서의 무차원 온도 기울기에 직접적으로 비례하며 평균량은 수직벽 하단에서부터 길이 L 까지 수치 적분하면 식(45)과 같이 표현된다.

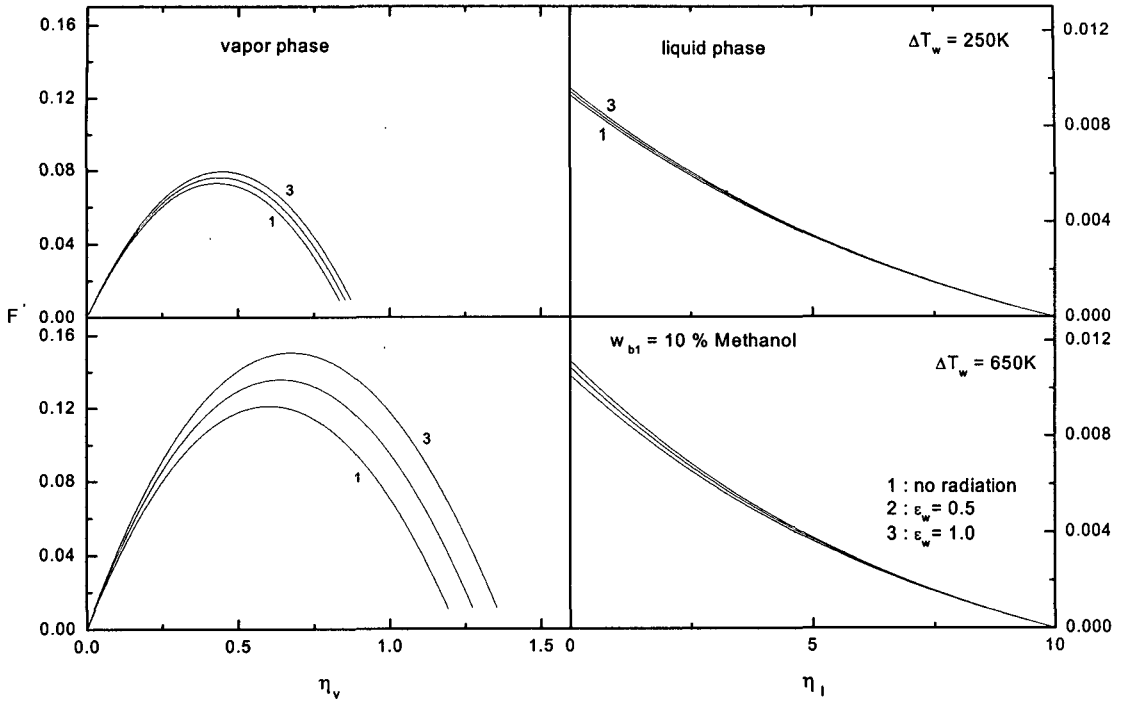


Fig. 4 Velocity profile in vapor and liquid.

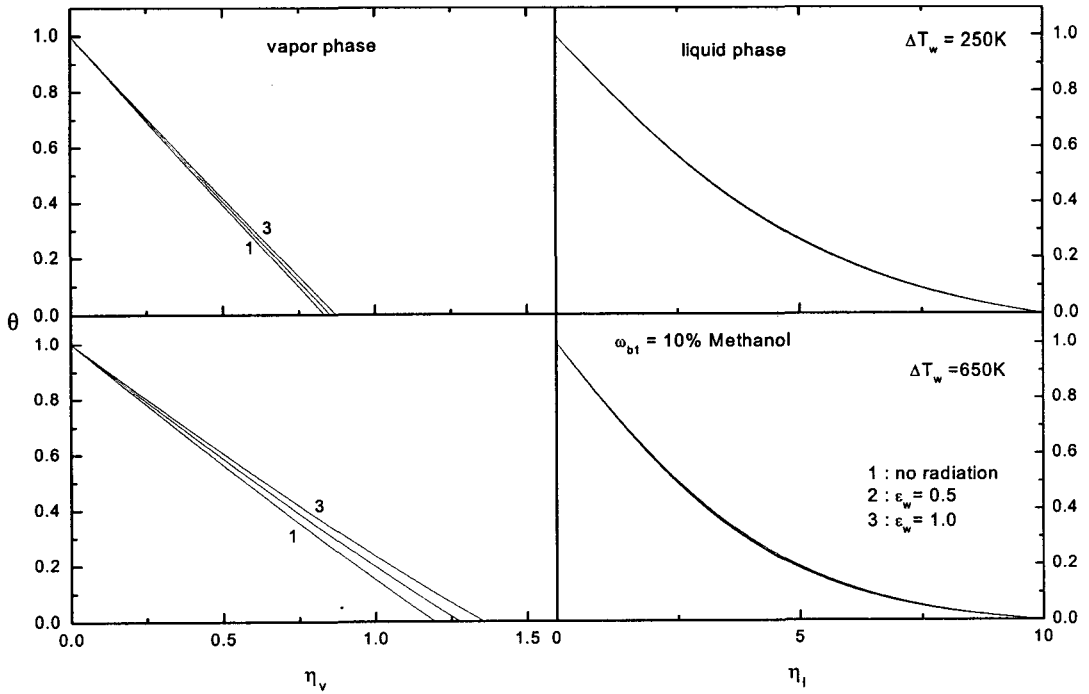


Fig. 5 Temperature profile in vapor and liquid.

$$h_x = \frac{q}{T_w - T_b} \quad (44)$$

$$h_m = \frac{1}{L} \int_0^L h_x dx \quad (45)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 속도, 온도 및 농도 분포

변수 F_v' 과 F_l' 은 각각 증기층과 액체층에서의 무차원 속도를 나타내고 있다. Fig. 4는 두 경계층에 대하여 벽 과열도가 250 K와 650 K, 그리고 주류에서 휘발성 성분(메탄올)의 분율이 0.1일 때 벽에서의 복사 방사율에 따른 속도분포를 보여주고 있다. 증기층에서의 속도는 특정한 위치에서 최대를 가지는 포물선 형태를 가짐을 알 수 있으며, 벽 과열도가 일정한 경우에 벽면에서의 방사율이 커질수록 증기층의 두께는 두꺼워지며, 속도도 커지게 된다. 또한 벽 과열도가 250 K보다 650 K일 때 복사의 효과의 증가로 인하여 증기층 속도는 증가함을 보여주고 있다. 액체층에서의 속도는 계면에서의 속도 연속조건 (33)에 의하여 증기층의 속도로부터 연속적으로 변하여 점진적으로 감소함을 보여준다.

Fig. 5는 Fig. 4의 무차원 속도분포에 대응하는 무차원 온도분포를 보여주고 있다. 얇은 증기층에서는 선형분포를 그리고 두꺼운 액체층에서는 물질확산의 영향으로 인하여 비선형의 분포를 보여주고 있다. 그림에서 보여주는 바와 같이 벽면에서의 복사 방사율이 커질수록 증기층에서 온도가 올기는 작아지게 되는데 이는 복사의 효과가 커

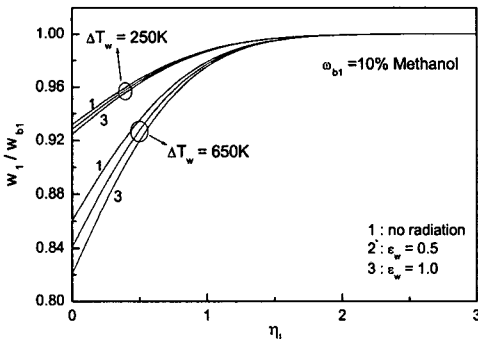


Fig. 6 Concentration profile in vapor and liquid phases.

질수록 계면온도가 증가하기 때문이다. 액체층에서의 온도분포는 벽면에서의 방사율에 거의 무관함을 알 수 있다. Fig. 6은 메탄올의 주류에서의 농도와 액체층 농도와의 비(w_{b1}/w_1)의 분포를 η_1 의 함수로 보여주고 있다. 액체층에서의 온도분포는 Fig. 5에서 보여준 액체층의 온도분포와 밀접한 관련이 있으며, 계면에서 메탄올의 농도는 휘발성 성분의 비등으로 인하여 주류에서의 농도보다 낮다. 또한 방사율과 벽 과열온도가 증가할수록 w_1/w_{b1} 는 감소함을 보여주고 있다. 이는 방사율과 벽 과열온도의 증가에 따라 복사 열전달이 증가함으로써 계면에서 휘발성 성분인 메탄올이 더 많이 비등하여 계면농도가 낮아지기 때문이다. 또한 높은 Schmidt 수 때문에 농도층의 두께는 온도층의 두께에 비하여 매우 얇다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 $w_{b1}=0.1$ 일 때 계면 과열도 ΔT_i 를 방사율에 따른 벽 과열도 ΔT_w 의 함수로 보여주고 있다. 계면 과열도는 ΔT_w 와 ϵ_w 이 커질수록 증가

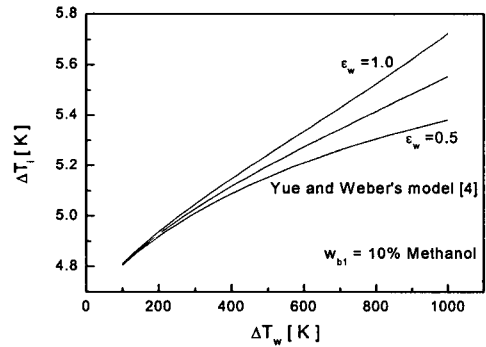


Fig. 7 Increase in interface temperature.

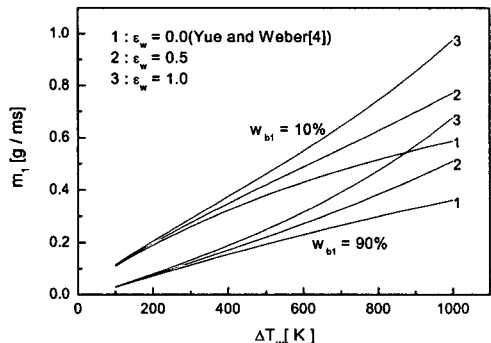


Fig. 8 Mass flow rate of more volatile component at the interface.

하며 이는 벽 과열도와 벽 방사율이 커질수록 계 면에서 메탄올이 더 많이 비등하여 주류로부터의 물질확산에 따라 휘발성 성분(물)의 분압이 높 아지게 되어 계면온도가 높아지게 된다.

Fig. 8은 벽 과열온도에 따른 계면에서 메탄올의 증발량에 대한 복사효과를 보여주고 있다. 그림 에서 보여주는 것과 같이 복사효과를 고려하지 않 을 경우, 즉 $\epsilon_w=0$ 인 경우보다 복사를 고려한 경 우 계면온도의 증가로 인하여 휘발성 성분이 메탄 올의 증발량은 증가하게 되며, 또한 벽 과열도가 커질수록 복사에 의한 효과는 더욱 중요하게 된다.

3.2 열전달과 상관식

Fig. 9는 벽면에서의 복사 방사율 ϵ_w 의 효과를 알아보기 위하여 식(42)의 우변항에서 첫째항과 둘째항으로 표현된 벽면에서의 열전달량과 증기 막에서의 복사 열전달량을 벽 과열도의 함수로 보 여주고 있다. 벽에서의 열전달량 q_w 은 벽 과열도 가 증가함에 따라 거의 선형적으로 커지게 된다. 또한 q_w 는 ϵ_w 가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이는데 이는 식(42)에서처럼 벽면 열전달량은 벽과 계면의 온도차에 비례하게 되며 Fig. 7에서 보여준 것과 같이 ϵ_w 가 증가할수록 복사 열전달 의 영향으로 계면온도가 상승하게 되어 벽과 계 면 사이의 온도차가 작아지기 때문이다. 복사 열 전달 q_r 은 벽 과열도와 ϵ_w 가 커질수록 비선형적 으로 급격히 증가함을 나타낸다. 따라서, 과열도 와 방사율이 큰 표면에 대한 막비등의 해석에서

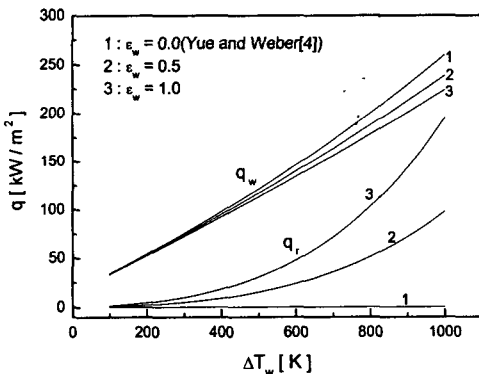


Fig. 9 Radiation and wall heat flux as a function of ΔT_w .

는 복사의 영향이 중요하므로 복사를 고려하지 않 은 Yue and Weber⁽⁴⁾의 모델은 적절하지 않음을 보여준다.

Fig. 10은 $\epsilon_w=0.5$, 그리고 과열도가 450, 650, 그리고 850 K일 때 평균 열전달계수를 주류에서 Methanol 분율의 함수로 나타낸 것이다. 그림에서 보여주는 것과 같이 주류에서 메탄올의 분율이 증가할수록 열전달계수는 증가하다가 감소하 는 분포이며, 과열도가 증가할수록 열전달에 있 어서 이러한 감소하는 현저히 줄어드는 경향을 보여주고 있다. 이는 물질확산 효과가 최대가 되는 분율의 존재를 뜻하며, 과열도가 작아질수록 복사에 의한 효과보다는 물질확산이 열전달에 큰 영향을 준다는 것을 의미한다. 또한, 순수한 물 ($w_{b1}=0$)의 열전달은 순수한 메탄올 ($w_{b1}=1$)에 비하여 낮음을 나타낸다.

본 연구에서 고려된 메탄올/물의 2성분 혼합물 대한 층류 막비등 열전달계수를 예측하기 위한 수정식을 다음과 같이 표현하였으며, 적용 범위는 $100 \leq \Delta T_w \leq 1000$ K, $0 \leq \epsilon_w \leq 1$, 그리고 주류에서의 분율은 0(순수 물)에서 1(순수 메탄올)이다.

$$h = h_{\infty} + Jh_r \tag{46}$$

위 식에서 J 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$J = \left[0.64 + 0.22 \left(\frac{1}{1 + 0.13 h_{\infty} / h_r} \right) \right] \tag{47}$$

또한, h_r 은 복사에 의한 열전달계수로 다음과

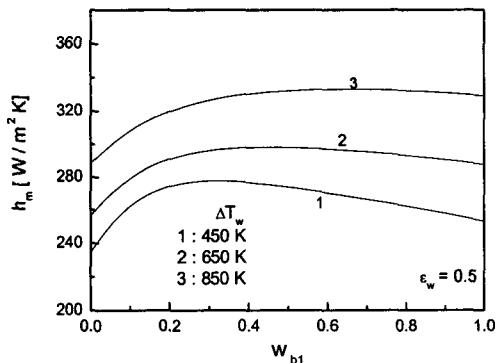


Fig. 10 Mean heat transfer coefficient as a function of w_{b1} at $\epsilon_w=0.5$.

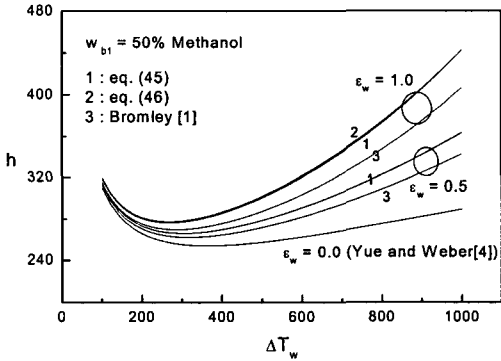


Fig. 11 Comparison of mean heat transfer.

같이 정의된다.

$$h_r = \frac{\sigma}{1/\epsilon_w + 1/\alpha_l - 1} \frac{T_w^4 - T_b^4}{\Delta T_w} \quad (48)$$

h_{co} 는 복사를 고려하지 않을 경우의 열전달계수로서 본 연구에서 고려한 메탄올/물에 대하여 다음과 같은 예측식을 사용하였다.

$$h_{co} = 0.77 \left(\frac{k_v^3 \rho_v (\rho_l - \rho_v) g h_{lv}}{L \Delta T_w} \right)^{1/4} \quad (49)$$

Fig. 11은 주류에서 메탄올의 분율이 0.5일 때 수치해석 결과와 식(46)으로 주어진 상관식, 그리고 Bromley⁽¹⁾에 의한 열전달계수를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 과열도가 증가할수록 복사의 효과는 매우 중요해지며, Bromley⁽¹⁾의 예측은 수치해석 결과보다 열전달을 다소 저평가함을 알 수 있다. 또한 제안된 상관식은 Bromley⁽¹⁾와 최대 11%의 오차범위 내에서 열전달계수를 예측하고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 대기압 하에서 메탄올/물 2성분 혼합물의 수직벽에서 자연대류 층류 막비등 열전달에 대하여 2중 경계층 모델을 이용하여 수치적으로 해석하였으며 고려된 모델에 대하여 벽면 과열도와 주류에서의 농도변화에 따른 복사효과가 열전달에 미치는 영향을 알아보았다. 벽 과열도가 증가할수록 막비등 열전달에서 복사에 의한 효과가 매우 중요함을 알았다.

또한, 복사를 고려하지 않은 경우의 열전달계수와 복사 열전달계수를 이용한 열전달 예측 상관식을 제시하였으며 기존의 모델과 비교하였다. 제시된 상관식은 기존 연구의 결과와 최대 11% 이내의 오차 내에서 잘 예측한다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. Bromley, L. A., 1950, Heat transfer in stable film boiling, Chem. Eng. Prog., Vol. 46, No. 5, pp. 221-227.
2. Koh, J. C., 1962, Analysis of film boiling on vertical surfaces, ASME J. of Heat Transfer, Vol. 84, pp. 55-62.
3. Sparrow, E. M. and Cess, R. D., 1962, The effect of subcooled liquid on laminar film boiling, Journal of Heat Transfer, Vol. 84, pp. 149-156.
4. Yue, P. L. and Weber, M. E., 1973, Film Boiling of Saturated Binary Mixtures, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 16, pp. 1877-1888.
5. Marschall, E. and Moresco, L. L., 1977, Analysis of binary film boiling, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 20, pp. 1013-1018.
6. Liu, M. H., Yang, Y. M. and Maa, J. R., 1996, Mass diffusion effect on film boiling of saturated binary mixtures, Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 30, pp. 815-834.
7. Scriven, L. E., 1959, On the dynamics of phase growth, Chem. Eng. Sci., Vol. 10, pp. 1-12.
8. Yaws, C. L., 1999, Chemical Properties Handbook, McGraw-Hill, New York.
9. Reid, R. C., Prausnitz, J. M. and Poling, B. E., 1999, The Properties of Gases and Liquids, 5th ed., McGraw-Hill, New York.
10. Danner, R. P. and Daubert, T. E., 1983, Manual for Predicting Chemical Process Design Data-Data Prediction Manual, Design Institute for Physical Property Data, AIChE.