

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.8.621

내부와 외부에서 증발과 응축이 발생하는 수직관에 대한 유동 해석

박 일 석*

(2008년 5월 22일 접수, 2008년 7월 5일 수정, 2008년 7월 18일 심사완료)

Film Flow Analysis for a Vertical Evaporating Tube with Inner Evaporation and Outer Condensation

Il Seouk Park

Key Words : Vertical Evaporating Tube(수직 증발관), Evaporation(증발), Condensation(응축), Film Flow(액막 유동)

Abstract

A numerical study for the flow, heat and mass transfer characteristics of the evaporating tube with the films flowing down on both the inside and outside tube walls has been carried out. The condensation occurs along the outside wall while the evaporation occurs at the free surface of the inside film. The transport equations for momentum and energy are parabolized by the boundary-layer approximation and solved by using the marching technique. The calculation domain of 2 film flow regions (evaporating and condensation films at the inside and outside tube wall respectively) and tube wall is solved simultaneously. The coupling technique for the problem with the 3 different regions and the 2 interfaces of them has been developed to calculate the temperature field. The velocity and temperature fields and the amount of the condensed and evaporated mass as well as the position where the evaporating film is completely dried out are successfully predicted for various inside pressures and inside film inlet flow rates.

기호설명

X : 관 길이 방향 좌표	Pr : Prandtl 수
R : 관 반경방향 좌표	g : 중력가속도
u : x 방향 속도 성분	ν : 동점성계수
v : r 방향 속도 성분	α : 열확산 계수
T : 온도	Γ : 액막유량
D : 관외경	δ : 액막두께
R : 관반경	H_e : 증발잠열
Re : Reynolds 수	H_c : 응축 잠열
Fr : Froude 수	q'' : 열유속
	P : 관 내부 압력

* 회원, 포스코 기술연구소

E-mail : einlucy@yahoo.co.kr

TEL : (054)220-6355 FAX : (054)220-6914

상첨자

* : 무차원변수

N : 반복 계산 횟수

하첨자

- I : 영역 I
 II : 영역 II
 III : 영역 III
 I : 관 내부
 O : 관 외부
 In : 내부 액막 입구
 S : 자유표면
 W : 벽
 P : x 방향으로의 현재 계산 위치

1. 서론

수직 원관의 내벽을 타고 흐르는 액막에서 증발(Evaporation)과 외벽을 타고 흐르는 액막에서 응축(Condensation)이 동시에 발생하는 증발관에서는 원관의 내부에 차가운 액체가 액막의 형태로 유입되고 이로 인하여 원관의 바깥쪽에 정체된 상태로 존재하던 수증기가 원관의 외벽을 타고 흐르는 응축 액막을 형성하며 또한 이 응축 액막은 관 내벽을 타고 흐르는 액막의 자유표면에 증발 현상을 초래한다. 이러한 수직 증발관은 ME⁽¹⁾ (Multi-effects evaporator) 담수화 공정의 증발부에 직접적으로 응용 되고 증발과 응축 열전달 현상이 동시에 나타나는 많은 공학 문제에 응용 될 수 있다. 본 연구의 수행을 위해 벽을 타고 흐르는 액막 유동 및 이와 동반하여 발생하는 열 및 물질전달에 관한 연구를 수행하여야 하며 이와 관련된 연구로서 Grossman⁽²⁾은 Nusselt⁽³⁾가 제시한 2 차식의 속도 분포로부터 흡수 액막의 열/물질전달 현상의 상사해를 구해 단열 및 일정 온도 벽조건에 대한 결과를 고찰하였고 Stuhltrager 등⁽⁴⁾은 수직 평관을 흘러 내리는 응축 액막에서 자유표면의 파동(Wave) 효과를 보기 위해 타원형 Navier-Stokes 방정식을 풀은 바 있다. 액막유동에서 난류의 영향을 고려하기 위해 Al-Najem 등⁽⁵⁾은 증발하는 난류액막을 Hubbard 등⁽⁶⁾에 의해 제시된 난류모델을 적용하여 해석하였고 Memory 등⁽⁷⁾은 수평원관에서 벽면온도 분포를 가정하여 응축 액막의 열전달 효과를 연구 하였다. Wassenaar 등⁽⁸⁾은 벽을 경계로 한쪽은 냉각수가 흐르고 반대쪽 액막에서는 증기의 흡수가 일어나는 문제를 에너지 보전적 개념을 이용하여 conjugate heat transfer 문제에 기본적인 접근을 시도하였다.

Fig. 1 과 같이 본 연구에서 다루는 액막 유동은 파동이 없는 층류 액막 유동이며 따라서 명백한

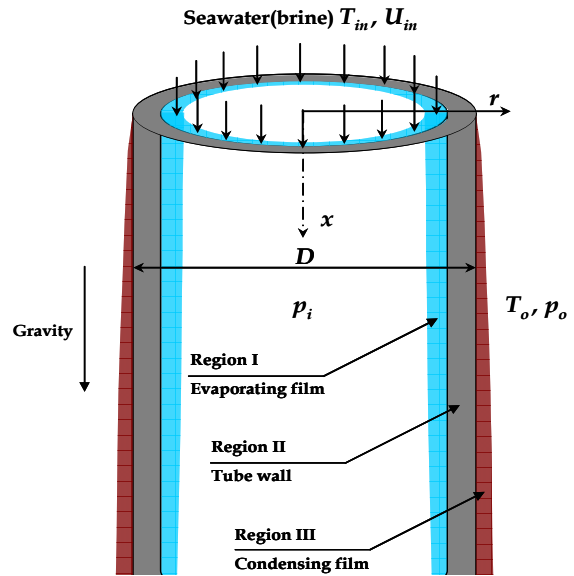


Fig. 1 Schematics for the vertical evaporator with inner evaporating and outer condensing films

주 유동 방향이 존재하여 지배 방정식이 주 유동 방향의 확산항을 소거한 축대칭 경계층 방정식으로 기술 되어질 수 있다. 원관의 내·외부 액막은 각각 증발과 응축이 발생하고 고체의 증발관 부분에서는 열전도 현상이 수반되게 되는데 이에 관한 해석을 위해 본 연구에서는 내·외부 액막과 증발관을 동시에 해석하였고 증발 및 응축에 의한 액막유량의 감소 및 증가를 계산에 첨가하였다. 이에 해석과정 및 수치해석 방법에 관한 설명과 함께 몇 가지 경우에 대한 계산결과를 보이려 한다.

2. 해석 방법

증발관 내·외부 액막의 유동해석을 위하여, 본 연구는 유체의 물성치들은 운전 범위에서 일정하고, 주위 수증기의 점도가 물의 것에 비해 아주 작고 정체되어 있어 자유표면에서의 표면 전단력을 무시할 수 있고 바깥쪽 응축부의 자유표면에서는 포화상태가 유지된다고 가정하였다. 액막의 두께가 매우 얇아 액막에서의 유동 및 열전달 지배 방정식에 경계층근사를 도입하였다.

2.1 지배방정식

Fig. 1 과 같은 관의 내·외벽을 타고 흐르는 액막유동을 다음과 같이 경계층 근사에 의한 포물형 지배방정식으로 기술할 수 있다.

$$\frac{\partial(r^* u^*)}{\partial x^*} + \frac{\partial(r^* v^*)}{\partial r^*} = 0 \quad (1)$$

$$u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial v^*}{\partial r^*} = \frac{1}{Fr} + \frac{1}{Re} \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left(r^* \frac{\partial u^*}{\partial r^*} \right) \quad (2)$$

$$u^* \frac{\partial T^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial T^*}{\partial r^*} = \frac{1}{Re Pr} \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left(r^* \frac{\partial T^*}{\partial r^*} \right) \quad (3)$$

여기서, u^* 와 v^* 는 각각 x^* 와 r^* 방향 속도 성분이고 T^* 는 온도이다. 지배방정식에 사용된 무차원 변수와 파라미터들은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} x^* &= \frac{x}{D}, & r^* &= \frac{r}{D} \\ u^* &= \frac{u}{U_{in}}, & v^* &= \frac{v}{U_{in}} \\ T^* &= \frac{T - T_i}{T_o - T_i} \\ Re &= \frac{U_{in} D}{\nu}, & Fr &= \frac{U_{in}^2}{gD}, & Pr &= \frac{\nu}{\alpha} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, 상첨자 *은 무차원화된 변수를 의미하며 U_{in} 는 영역 I의 입구에서의 평균 유속을 나타내고 D 는 수직관의 직경, T_i 는 증발관 내부 압력에 해당하는 포화온도이며 T_o 는 증발관 외부의 수증기 온도로써 본 해석에서는 바깥쪽 액막이 자유표면에서 포화상태의 수증기와 접촉하고 있다고 가정하므로 바깥쪽 액막의 자유표면 온도가 된다. 관 내부로 유입되는 해수가 관내부의 압력에 대해 포화온도를 유지하며 유입될 경우라면 T_i 가 입구 온도와 같아지고 유입된 해수는 관 외부의 수증기에 의한 가열로 인해 즉시 증발을 시작하게 될 것이다. 만약 해수가 T_i 보다 낮은 온도로 유입된다면 축방향을 따라 가며 액막 내부온도가 충분히 상승한 뒤 자유표면 온도가 T_i 가 되어야 증발이 일어날 것이다. 유입되는 해수 온도가 T_i 보다 높을 경우는 해수가 유입되면서 낮은 압의 기체와 접하게 되어 일종의 Flashing 현상을 보일 것으로 기대되는데 본 해석에서는 이러한 경우를 배제하였다. 한편 속도 무차원화에 사용된 기준속도 U_i 는 $\Gamma_{l,in}/(\rho_l D^2)$ 으로 정의한다. $\Gamma_{l,in}$ 은 내부액막의 입구유량이다.

2.2 경계조건

관 벽에 의해 따로 분리된 두 개의 액막유동 영역과 벽에서 열전달 및 유동 현상을 고찰하기 위하여 다음과 같은 내부액막 자유표면과 외부액막 자유표면 그리고 각 액막의 입구에서의 조건을 사용한다.

-내부액막 자유표면 ($r^* = R_i^* - \delta_i^*$)

$$\frac{\partial u^*}{\partial r^*} = 0, \quad T^* = 0 \quad \text{or} \quad \frac{\partial T^*}{\partial r^*} = 0 \quad (5)$$

-외부액막 자유표면 ($r^* = R_o^* + \delta_{III}^*$)

$$\frac{\partial u^*}{\partial r^*} = 0, \quad T^* = 1 \quad (6)$$

-내부액막 입구 ($x^* = 0$)

$$u^* = \frac{R_i^* Re}{2(R_i^* + \delta_i^*) Fr} [(R_i^* - r^*)^2 + 2\delta_i^*(R_i^* - r^*)] \quad (7)$$

-외부액막 입구 ($x^* = 0$)

$$u^* = 0, \quad v^* = 0, \quad T^* = 1 \quad (8)$$

여기서 R_i^* 와 R_o^* 는 각각 관의 무차원 내반경과 외반경이고 δ_i^* 과 δ_{III}^* 는 무차원 내부액막 및 외부액막 두께를 나타낸다. 식(7)의 속도 Profile은 자유표면에서 No shear 조건과 벽에서 접촉조건 그리고 벽에서

$$-\frac{Re}{Fr} = \frac{1}{R_i^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left(R_i^* \frac{\partial u^*}{\partial r^*} \right) \quad (9)$$

을 만족하는 2차식의 속도 분포이다. 내부액막 입구에서의 온도 분포는 주어진 내부액막 자유표면에서의 온도와 관 외벽의 온도를 바깥 수증기의 온도인 T_o 로 두어 반경방향으로 1차원 해석을 통해 얻은 Profile을 사용하였다.

위의 4개의 경계조건과 함께 증발에 의해 나간 유량과 응축에 의해 추가된 유량을 보정하기 위해 다음과 같이 이전 x 위치에서의 액막유량에 증발과 응축에 의한 유량변화를 가감한 보조 관계식을 이용하여 액막유량 변화를 고려한다.

$$\Gamma_l = \Gamma_{l,p} - \frac{q_{l,s}''}{H_e} 2\pi(R_i - \delta_i)\Delta x \quad (10)$$

$$\Gamma_{III} = \Gamma_{III,p} + \frac{q_{III,s}''}{H_e} 2\pi(R_o + \delta_{III})\Delta x$$

여기서, $\Gamma_{l,p}$ 와 $\Gamma_{III,p}$ 는 내부 및 외부액막의 이전 x 위치에서의 액막유량이며, Γ_l 와 Γ_{III} 는 현 x 위치에서의 액막유량이다. H_e 는 단위질량당 증발 잠열이고 H_c 는 단위질량당 응축 잠열이다. $q_{l,s}''$ 와 $q_{III,s}''$ 는 각각 내부액막과 외부액막 자유표면에서의 열유속을 나타내고 있다.

액막유량의 변화에 따라 액막의 두께가 변하게 되는데 액막유량은 다음의 식 (11)로 정의되므로 식 (10)에 의해 변화한 액막유량을 만족하는 액막 두께를 찾아낼 수 있다.

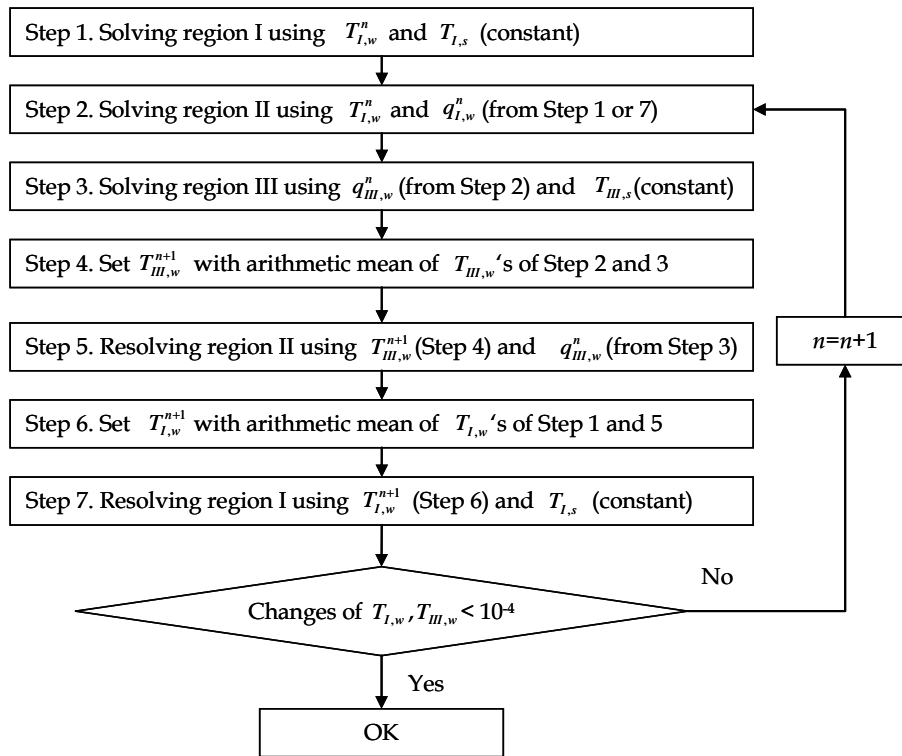


Fig. 2 Solving procedure for conjugate heat transfer problem

$$\Gamma_I = \int_{R_i - \delta_I}^{R_i} \rho u \pi D dr, \quad \Gamma_{III} = \int_{R_o}^{R_o + \delta_{III}} \rho u \pi D dr \quad (11)$$

실제 해석과정에서 액막의 두께는 다음과 같은 반복절차를 통해 찾아진다.

우선 현 x 위치에서 가정한 액막두께(ex. 이전 x 위치에서의 액막두께)를 이용하여 지배방정식 (1~3)을 풀고 식 (10)을 이용하여 현 x 위치에서의 액막유량을 찾아낸다. 다음으로 식 (11)을 통해 새 액막두께를 구하고 이 새 액막두께를 이용하여 지배방정식 식 (1~3)을 다시 푸는 반복과정을 통해 현 x 위치에서 경계조건 식 (5~8)과 액막유량에 관한 보조식 식 (10)을 모두 만족하는 액막 두께를 찾을 수 있다.

본 연구에서 다루는 증발관은 열전달 측면에서 3개의 영역과 그들 사이에 있는 2개의 경계를 가지는 Conjugate heat transfer 문제이며 실제 문제를 풀기 위하여는 각각의 경계인 관의 내벽과 외벽에서의 경계조건이 필요하다. 이에 대한 설명은 다음의 수치해석 부분에 하기로 한다.

2.3 수치해석

경계층 근사에 의해 나온 포물형 운동량 방정식을 이용하여 액막유동을 모사하는 것은 Park 등⁽⁹⁾

의 액막유동해석의 Marching 방법을 적용하였다.

3개의 영역을 가지는 Conjugate heat transfer 측면에서 각각에 대한 온도장을 풀고 이들을 서로 연계시키기 위하여 Fig. 2와 같은 절차를 개발하였다.

- (1) 증발관 내벽에서 가정한 온도를 이용하여 영역 I의 온도장을 계산한다.
- (2) (1)의 계산에 사용되었던 내벽 온도와 계산에서 얻어진 열유속을 이용하여 증발관 외벽의 온도와 열유속을 구한다.
- (3) (2)에서 구한 외벽 열유속과 외부액막 자유표면에서의 포화온도를 경계조건으로 하여 영역 III의 온도장을 계산한다.
- (4) (3)의 계산에서 얻어진 외벽 온도와 (2)에서 구했던 외벽온도를 산술평균하여 새로운 외벽온도로 정한다.
- (5) (3)의 계산에 사용되었던 외벽 열유속과 (4)에서 얻어진 외벽온도를 이용하여 증발관 내벽 온도를 구한다.
- (6) (5)에서 얻은 내벽 온도와 (1)의 계산에 사용된 내벽온도를 산술평균하여 새로운 내벽온도로 정한다.
- (7) (6)에서 정한 새 내벽온도와 내부 액막 자유표면 온도를 이용하여 다시 영역 I의 온도장을 계산한다.

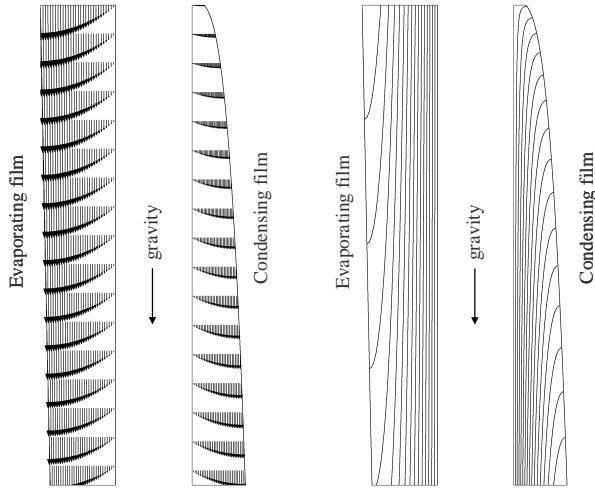


Fig. 3 Velocity vectors and steam lines for inner evaporating film and outer condensing film ($\Gamma_I = 0.0002 \text{ kg/s}$)

(8) 내벽온도와 외벽온도가 각각 변화가 없을 때까지 반복계산 한다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 내부액막의 입구유량이 0.0002 kg/s 인 경우에 속도장을 도시한 것인데 내부액막에서는 증발에 의해 액막 두께가 얇아 지고 외부액막에서는 응축에 의해 액막 두께가 두꺼워지는 것을 볼 수 있다. 또한 유선의 분포를 통하여 내부액막의 자유표면에서 증발에 의해 유량이 빠져나가고 외부액막의 자유표면에서는 응축에 의해 물질이 유입되고 있는 것을 볼 수 있다. 관 길이방향으로의 계산영역은 관 외경과 같은 크기인 $x^*=1$ 까지이며 격자는 내·외부 액막에 각각 $500 \times 30(x \times r)$ 의 동일간격(Uniform) 격자계를 사용하였다. 그림에서 외부 응축 액막의 두께가 0에서 시작하지 않고 일정한 값에서 시작하는 것으로 보이는데 이것은 본 연구에서 입구점에서 반경방향 열전달 해석을 실시한 후 계산된 응축량 및 응축액막 두께를 다음 격자점 해석에 사용하는데 그림을 두번째 격자점부터 나타내었기 때문이다. 또 액막 자체가 매우 얇기 때문에 그림은 중횡비를 $1:75(x:r)$ 로 나타내었다.

본 연구에서는 경계층근사를 적용한 지배방정식을 Marching 기법을 적용하여 풀고 있으므로 주유동 방향으로의 격자의존도를 검사할 필요가 있다. Fig. 4에는 $500 \times 30(x \times r)$ 격자계에 대해 x 방향으로 동일간격 격자계와 액막유동 입구쪽으로 밀집한(Stretched) 격자계를 적용한 경우의 내부액막 두께 변화를 나타내었다. 두 격자계의 결과가 서로

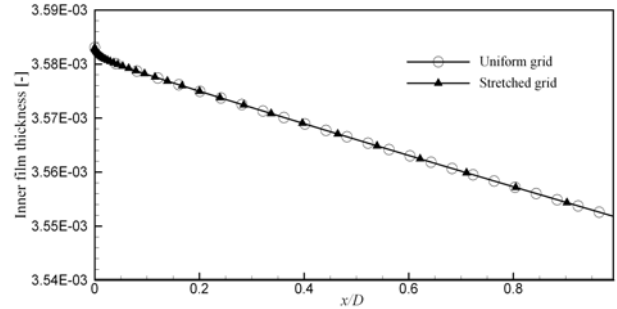


Fig. 4 Inner film thicknesses according to the grid system

매우 일치함을 확인할 수 있고 본 연구에서는 $500 \times 30(x \times r)$ 의 동일간격 격자계를 채택하였다.

Fig. 5는 관 내부의 압력이 달라짐에 따라 내부액막이 초기 가열 단계를 거친 후 증발이 시작될 때 내·외부액막 내부의 등온선 분포를 나타낸 것이다. 액막의 형상에서 증발관 내부 압력이 커질수록 내부액막의 두께 감소와 외부액막의 두께 증가 크기가 작아짐을 관찰할 수 있다.

액막 입구의 자유표면온도를 85°C 로 일정하게 했을 때 관 내부 압력을 85°C 에 대한 포화압력인 58 kPa 과 65 kPa , 70 kPa 로 변화 시켜보았는데 압력이 포화압력(58 kPa)보다 더 커질수록 내부액막이 입구온도인 85°C 로부터 각 경우의 증발점까지 가열되고 난 후 증발이 시작되는 것을 내부 증발 액막에 대한 등온선을 통해 관찰할 수 있다. 58 kPa 인 경우에는 내부 증발 액막의 등온선이 입구부터 자유표면에 거의 평행하게 나타나고 있으나 65 kPa 이나 70 kPa 의 경우에는 입구를 지나 짧은 구간에서 등온선이 자유표면과 직교하며 만나는 구간이 나타나는데 이 구간에서는 증발관 외부로부터 유입된 열이 내부액막을 가열하는 데에만 쓰이고 증발에 의한 열 유출이 없음을 나타내고 있다.

Fig. 6은 증발관 내부압력이 바뀔 때 따라 증발에 의한 내부액막유량의 감소량을 관 길이방향을 따라 비교하였다. 내부액막의 입구유량, 0.0002 kg/s 는 매우 작은 값이므로 관 외부에서 유입된 열은 급속히 내부액막 자유표면 온도를 각 경우의 증발 온도까지 상승시켜 거의 입구점 근처에서부터 증발에 의한 유량 감소가 관찰되고 있다.

Fig. 5는 외부 응축 액막의 유량이 응축에 의해 차츰 증가하는 것을 보인 것인데 압력이 58 kPa 인 경우는 관 내부에서의 조건이 처음부터 포화상태가 만족되어 유입과 동시에 증발이 시작되는 경우이므로 증발에 의한 증발열이 내부액막의 자유표면을 통하여 빠져나가 상대적으로 입구 근처 짧은

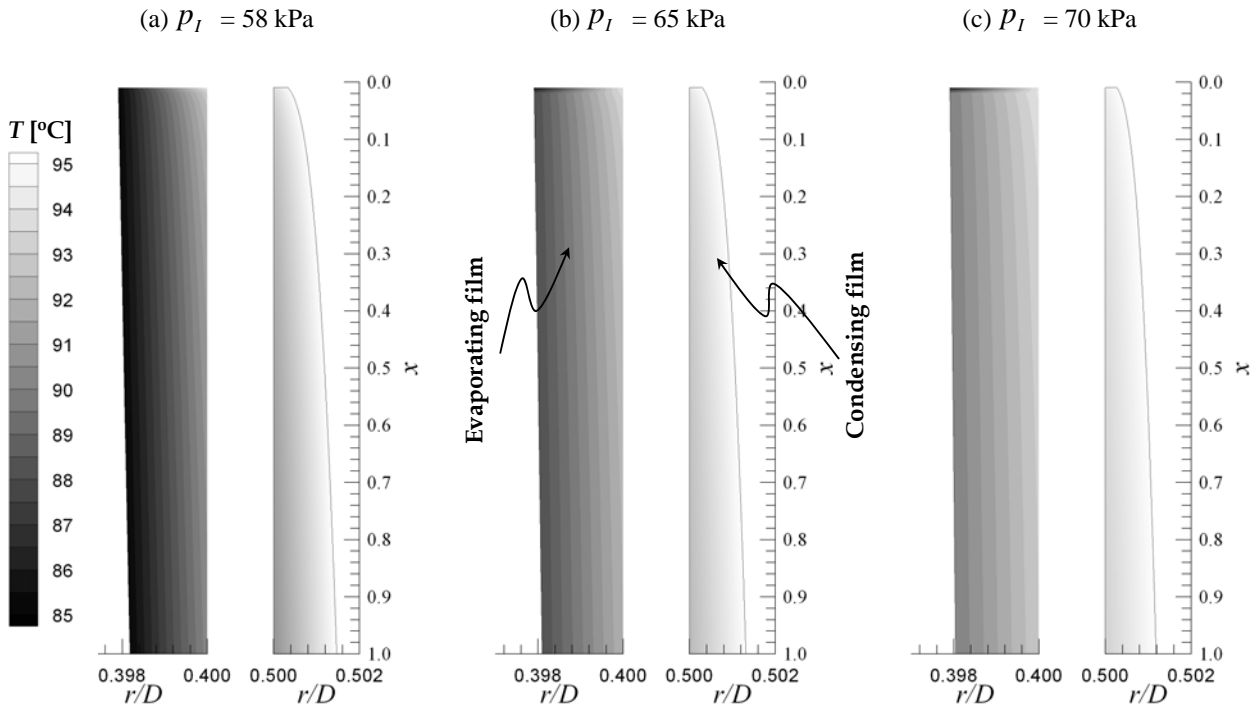


Fig. 5 Isotherms in the evaporating and condensing films (a) $p_I=58$ kPa, (b) $p_I=65$ kPa, (c) $p_I=70$ kPa

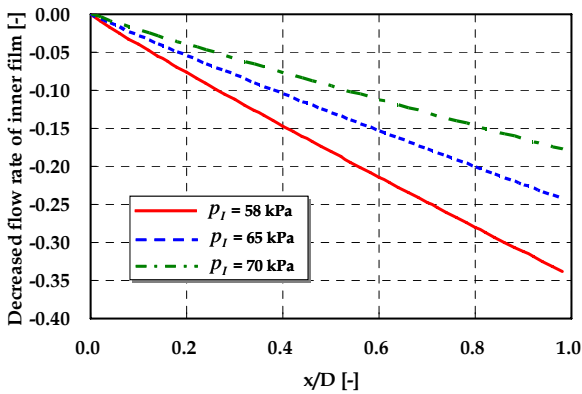


Fig. 6 Decreased flow rate of the inner film due to the evaporation for the various inner pressure conditions when $\Gamma_I=0.0002$ kg/s

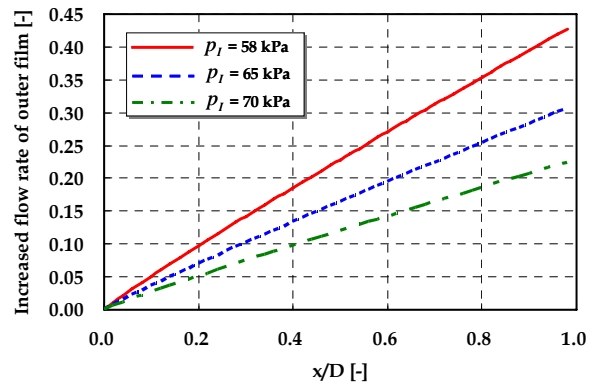


Fig. 7 Increased flow rate of the outer film due to the condensation for the various inner pressure conditions when $\Gamma_I=0.0002$ kg/s

구간에서 증발이 일어나지 않는 65kpa 과 70kpa 인 경우들 보다 더 많은 양의 수증기가 응축된다. 또 65kpa 의 경우가 70kpa 의 경우보다는 더 많은 양의 수증기가 응축되고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 4 와 5 에서 관 내부 압력이 낮을수록 더 많은 양의 수증기를 증발/응축하여 액막유량의 증가/감소 기울기가 큰 값을 가지는 것을 확인할 수 있는데 이것은 관 외부 수증기 온도가 일정한 값으로 고정된 상태에서 관 내부 포화온도가 낮아져 관 내·외부의 온도차가 커졌기 때문이다.

Fig. 6 은 내부 증발액막의 평균온도와 벽면온도

를 축방향을 따라 나타낸 것인데 자유표면에서의 증발에 의해 액막두께가 감소함에 따라 온도는 관 길이방향으로 서서히 감소하고 있다. 관 내부의 압력이 65kpa 이나 70kpa 처럼 내부액막이 포화온도가 아닌 채로 유입되는 경우도 내부액막은 유입 즉시 가열되어 각 경우의 내부액막 평균온도를 형성하고 있다. 관 내부압력이 유입 내부액막 온도에 대한 포화압력(58kPa)에 가까울수록 액막 평균온도와 벽면온도의 차이가 크며 자유표면에서 증발이 활발하게 일어나 Fig. 4 와 같은 결과를 일으킨다.

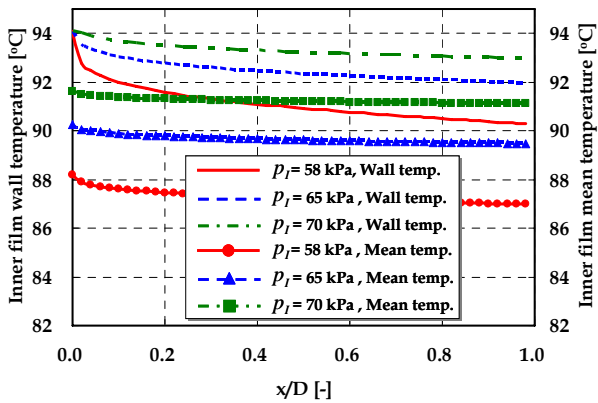


Fig. 8 Variation of the mean and wall temperatures of the inner film along the tube axis direction for the various inner pressure conditions

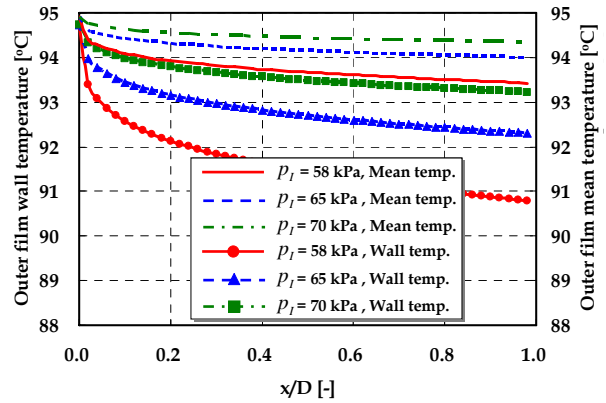


Fig. 9 Variation of the mean and wall temperatures of the outer film along the tube axis direction for the various inner pressure conditions

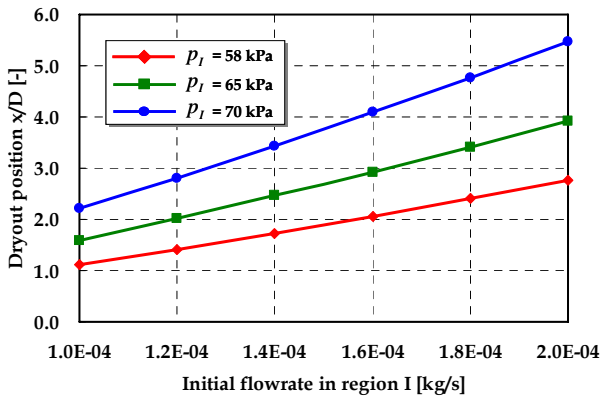


Fig. 10 Expected dry-out position along the initial flowrate of the inner film for the various inner pressure conditions

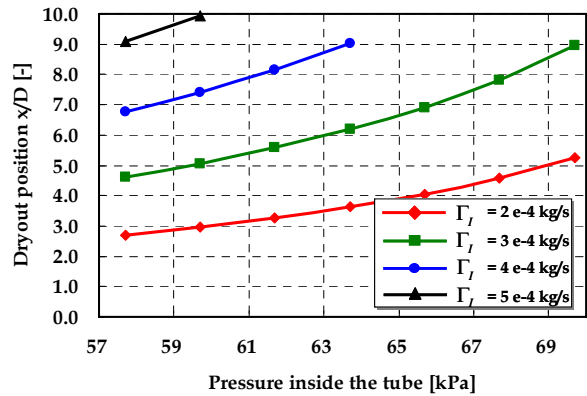


Fig. 11 Expected dry-out position along the tube inside pressure for various inner film initial flowrates

Fig. 7에서는 관 외벽온도와 외부액막의 평균온도를 관 길이방향을 따라 나타내었으며 내부액막이 증발함에 따라 외부액막의 온도도 서서히 감소하고 있다. 또한 관 내부 압력이 포화압력에 가까울수록 액막 평균온도와 벽면온도의 차이가 크게 관찰되고 있으며, 응축이 시작되는 입구 근처 영역이 액막 유량이 작기 때문에 온도 강하가 크게 발생하고 있다.

Fig. 8 과 9에서는 유입된 내부액막이 모두 증발하여 관 내벽이 완전히 마르게(Dry-out)되는 위치를 내부액막 입구유량과 관 내부 압력에 따라 예측하였는데 이는 실제 증발관을 설계할 때 관 길이와 내부액막 유입 유량을 결정하는데 중요한 요소가 된다. 내부액막 유입유량이 0.0001kg/s 이고 관 내부 압력이 58kPa 인 경우는 관 직경 정도의 길이에서 액막이 Dry-out 되고 유량이 늘어날수록 Dry-out 위치는 급격히 증가한다.

4. 결론

관 내부로 유입된 액막이 관 외부의 고온 증기의 영향으로 자유표면에서 증발하고 또한 관 외부의 증기는 내부 액막의 증발로 인해 관 외벽에 응축하여 외부응축액막을 형성하는 문제에 대해 경계층근사한 축대칭 지배방정식을 Marching 기법으로 해석하였다. 또 자유표면의 증발 및 응축에 의한 액막유량의 변화를 고려한 해석절차와 내·외부 액막과 고체관에서의 열전달을 동시에 해석하는 Conjugate heat transfer 문제의 해석절차를 개발하였다.

관 내부 압력이 포화압력보다 큰 경우에는 내부액막 자유표면이 포화온도까지 가열된 후부터 증발이 시작되지만 입구의 현열상승구간은 매우 짧은 것으로 확인되었다. 관 내부 압력이 내부액막의 유입온도에 대해 포화상태에 가깝도록 낮은 경

우가 관 내·외부 액막의 온도차가 크게 형성되어 증발과 응축이 보다 활발하게 일어남을 확인하였다.

내부액막 유입유량이 작을수록, 관 내부 압력이 포화압력에 가까울수록 증발이 활발히 일어나 짧은 거리에서 유입된 해수가 모두 Dry-out 되는 경우가 발생함을 확인하였다. Dry-out 은 관의 부식, 전열 성능 저하 등의 문제를 야기하므로 증발성능과 Dry-out 을 동시에 고려하여 내부액막 입구유량과 관 내부 압력 조건을 결정하는 것이 필요한 것으로 여겨진다.

참고문헌

- (1) Khan, A. H., 1986, "Desalination Processes and Multistage Flash Distillation Practice," *Elsevier*.
- (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) Nusselt, W., 1916, "Die Oberflächen Kondensation des Wasserdampes," *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, Vol. 60, pp. 541~546 and 569~575.
- (4) Stuhltrager, E., Yutaka, N., Akio, M. and Haruo, U., 1991, "Flow Dynamics and Heat Transfer of a Condensate Film on a Vertical Wall -I. Numerical Analysis and Flow Dynamics," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 6, pp. 1677~1686.
- (5) Al-Najem, N. M., Ezuddin, K. Y. and Darwish, M. A., 1992, "Heat Transfer Analysis of Local Evaporative Tubulent Falling Liquid Films," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 114, pp. 688~694.
- (6) Hubbard, G. L., Mills, A. F. and Chung, D. K., 1976, "Heat Transfer Across a Tubulent Falling Film with Cocurrent Vapor Flow," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 98, pp. 319~320.
- (7) Memory, S. B., Lee, W. C. and Rose, J. W., 1993, "Forced Convection Film Condensation on a Horizontal Tube - Effect of Surface Temperature Variation," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 6, pp. 1671~1676.
- (8) Wassenaar, R. H. and Westra, J. J. W., 1992, "Dynamic Model of a Film Absorber with Coupled Heat and Mass Transfer," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 35, No. 1, pp. 87~99.
- (9) Park, I. S. and Choi, D. H., 1996, "Analysis of LiBr-H₂O Film Absorption on a Horizontal Tube," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 125, No. 2, pp. 670~679.