

마이크로 평판내 증발에 의한 확장초승달영역의 열/유동특성

박경우[†] · 노관중^{*} · 이관수^{**}

(2002년 10월 17일 접수, 2003년 2월 21일 심사완료)

Flow and Heat Transfer Characteristics of the Evaporating Extended Meniscus in a Micro Parallel Plate

Kyoungwoo Park, Kwan-Joong Noh and Kwan-Soo Lee

Key Words : Micro-Plate (마이크로 평판), Evaporation (증발), Extended Meniscus Region (확장초승달영역), Two-Phase Flow (2 상 유동), Control Volume (검사체적)

Abstract

A mathematical model is presented to predict the two-phase flow and heat transfer phenomena of the evaporating extended meniscus region in a micro-channel. The pressure difference at the liquid-vapor interface can be obtained by the augmented Laplace-Young equation. The correlative equations for film thickness, pressure, and velocity in the meniscus region are derived by applying the mass, momentum, and energy equations into the control volume. The results show that increasing the heat flux and the liquid inlet velocity cause the length and liquid film thickness of the extended meniscus region to decrease. The variation, however, of the heat flux and liquid inlet velocity has no effect on the profile of film thickness. The majority of heat is transferred through the thin film region that is a very small region in the extended meniscus region. It is also found that the vapor velocity increases gradually in the meniscus region. However, it increases sharply at the junction of the meniscus and thin film regions

기호설명

- A : 단위 폭당 면적 [m]
- \bar{A} : 소산계수 [J]
- f : 마찰계수
- H : 채널의 높이 [m]
- h_{fg} : 증발잠열 [J/kg]
- h : 국소 열전달계수 [$W/m^2 \cdot K$]
- K : 곡률 [m^{-1}]
- \dot{m} : 질량 유속 [kg/s]
- P : 압력 [Pa]
- q' : 열유속 [W/m^2]
- Re : Reynold 수
- u : x -방향 속도 [m/s]
- v : y -방향 속도 [m/s]
- x, y : 수평 및 수직방향 [m]

그리스문자

- δ : 액막두께 [m]
- ρ : 밀도 [kg/m^3]
- σ : 표면장력 [N/m]
- τ : 전단응력 [N/m^2]

하첨자

- i : 액상과 기상의 경계층
- o : 초기값
- l : 액체
- v : 증기
- w : 채널 벽면

1. 서론

전자장비 냉각을 위한 새로운 기술들이 꾸준히 개발되고 있다. 이들 중, 상변화 현상을 이용하여 열전달을 향상시키는 모세관력 순환 (Capillary Pumped Loop, CPL) 시스템이 최근에 크게 각광을 받고 있다. CPL-시스템은 표면장력만으로 작동유체를 순환시키므로 구동펌프가 필요 없어 소음과 진동이 발생되지 않을 뿐만 아니라, 마이크로미터

[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 최적설계신기술연구센터

^{*} 회원, 한양대학교 대학원 기계공학부

^{**} 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : ksleehy@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2290-0426, FAX : (02)2295-9021

(μm)단위의 소형화가 가능하다는 장점으로 인해 많은 관심을 불러 일으키고 있다.

일반적으로 CPL-시스템은 증발기, 응축기, 증기관 및 액관 등으로 구성된다. 특히, 증발기는 CPL-시스템을 구성하는 중요한 요소 중의 하나로서, 액체상태로 유입되는 작동유체가 열을 흡수하여 증발함으로써 그 일부가 기체상태로 상변화를 일으키게 된다. Fig. 1 에 증발과정을 개략적으로 나타내었다. 증발기 내의 영역은 작동유체의 유동을 야기시키는 힘에 따라 다음과 같이 세 개의 영역으로 나뉜다: (a)모세관압력(capillary pressure)이 지배적인 초승달(meniscus)영역, (b)모세관압력과 분리압력(disjoining pressure)에 의해 구동되는 박막(thin film) 영역 그리고 (c)분리압력만 존재하는 흡착영역(adsorbed region) 등으로 나눌 수 있다.

상변화 과정의 증발현상에 대한 연구는 실험과 해석을 통해 지금까지 많이 이루어져 왔다. 최근에는 초승달영역과 박막영역을 포함하는 확장 초승달영역(extended meniscus region)에 대한 열/유동 특성을 규명하기 위해 검사체적(control volume, C.V.)을 이용한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

Longtin et al.⁽¹⁾은 분리압을 고려하지 않은 Young-Laplace 방정식과 액상과 기상이 향류라는 가정을 적용하고, 히트파이프의 형상계수를 이용해 증발과정을 모델링 하였다. 이들은 유동 방향에 따라 곡률반지름은 선형적으로 증가하며, 기압의 변화가 액압의 변화보다 작다는 사실을 밝혔다. Sartre et al.⁽²⁾은 유동 방향에 대해서 Longtin et al.의 모델링 방법을 이용하였으며, 전도에 의한 영향을 모델에 추가하였다. 이들 역시 유동 방향으로 곡률반지름이 선형적으로 증가한다고 하였다. Peles 와 Haber⁽³⁾는 기상의 압력(P_g)이 일정하며, 벽 표면 및 기상-액상 경계면에서의 마찰력 등을 무시한 상태에서 히트파이프를 모델링 하였다. 이들은 수

력지름이 커지거나 열유속이 감소하면 초승달영역의 길이가 증가한다고 하였다. 이상의 연구들은 미소 검사체적을 이용하여 수학적 모델⁴⁾을 제시하고, 열 및 유동 특성을 규명하였다. 그러나 이들은 액상과 기상이 향류라는 가정을 도입하거나, 마찰력을 무시하였고, 분리압력과 기상의 압력변화 등이 동시에 고려되지 않았다.

따라서 이 연구에서는 기상의 압력변화와 분리압 등을 고려하고, 미소 검사체적에 질량, 운동량 그리고 에너지 보존방정식을 적용시켜, 마이크로 채널 내 확장초승달영역의 수학적 모델을 제시한다. 또한 확장 초승달영역에 영향을 미치는 요소들의 상호작용을 파악하고, 이들이 유동과 열전달 특성에 미치는 영향을 해석적으로 규명한다.

2. 수학적 모델링

2.1 해석모델 및 기본 가정

마이크로 채널에서 작동유체는 주변의 열을 흡수하여 액상에서 기상으로 상변화를 일으킨다. 이때 증발에 의해 액막 두께(δ)가 감소하며, 액상-기상 경계면에서의 곡률반지름은 증가하게 된다. 해석을 위해 사용한 마이크로 채널에서의 검사체적의 개략도를 Fig. 2 에 도시하였으며, 해석을 위해 도입된 가정은 다음과 같다.

- ① 유체는 정상, 층류, 비압축성 유동이다.
- ② 표면장력 등 유체의 물성치는 일정하다.
- ③ 중력의 영향은 무시한다.
- ④ 기상의 속도가 액상의 속도보다 매우 크다.

이 연구에서는 확장 초승달영역을 초승달영역과 박막영역으로 나누어 수학적 모델을 제시하고자 한다.

2.2 초승달 영역

액상-기상 경계면의 거동은 경계면에서의 기상과 액상의 압력차($\Delta P = P_g - P_l$)에 의해 지배를 받게 되는데, 이러한 압력차는 모세관압력(P_c)과

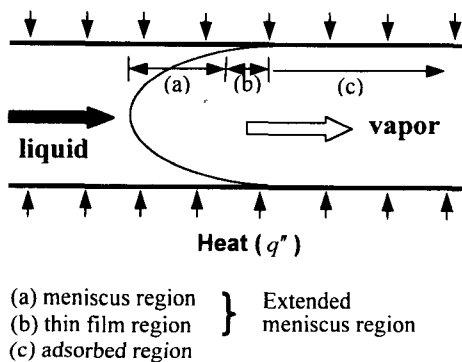


Fig. 1 Schematic of a micro-channel with heat flux

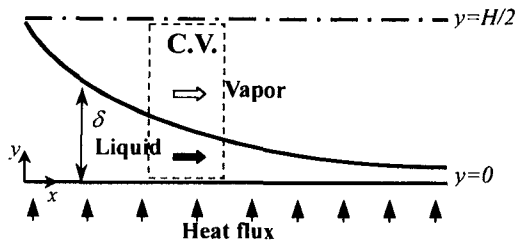


Fig. 2 Control Volume in a micro-channel

분리압력(P_d)의 합으로 표현되는 확장 Laplace-Young 방정식을 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_v - P_l = P_d + P_c \quad (1)$$

Van der Waals 힘에 의해 발생하는 분리압력은 액막두께와 관련되며, 다음의 식으로 표현된다⁽⁶⁾.

$$P_d = -\frac{\bar{A}}{\delta^3} \quad (2)$$

여기서 δ 는 액막두께, \bar{A} 는 Hamaker 상수 ($= 2.87 \times 10^{-21}$ J, 물)로서 wetting 액체인 경우 음의 값을 갖는다.

모세관압력은 표면장력(σ)과 액상-기상 경계면에서의 곡률(K)에 의해 정의된다.

$$P_c = \sigma K \quad (3)$$

경계면에서의 곡률은 유동방향(K_x) 및 유동의 수직방향 (K_y)의 곡률로 이루어지며, 다음의 식으로 표현된다.

$$K = K_y + K_x = \frac{1}{y_i} \left[1 + \left(\frac{dy_i}{dx} \right)^2 \right]^{-0.5} - \frac{d^2 y_i}{dx^2} \left[1 + \left(\frac{dy_i}{dx} \right)^2 \right]^{-1.5} \quad (4)$$

여기서 y_i 는 평판에서 액상-기상 경계면까지의 거리이다. 초승달영역에서는 분리압력이 모세관압력에 비해 매우 적으므로 ($K_x \gg K_y$), 확장 초승달영역에서 K_y 가 액막의 형상에 미치는 영향은 무시할 수 있고, $y_i = H/2 - \delta$ 를 이용하여 액막두께의 항으로 표현하면

$$K = \frac{d^2 \delta}{dx^2} \left[1 + \left(\frac{d\delta}{dx} \right)^2 \right]^{-1.5} \quad (5)$$

이 된다.

식 (2), (3) 그리고 (5)를 식 (1)에 대입 후 정리하면, 다음과 같이 액상 및 기상의 압력의 함수인 액막 두께에 대한 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2 \delta}{dx^2} + \frac{1}{\sigma} \left(P_l - P_v + \frac{\bar{A}}{\delta^3} \right) \left[1 + \left(\frac{d\delta}{dx} \right)^2 \right]^{1.5} = 0 \quad (6)$$

2.2.1 운동량 보존

Fig. 3 과 같이 단위 폭에 대한 검사체적을 설정

하여, 검사체적에 대한 운동량 이론(검사체적을 지나는 정미 운동량 플럭스는 검사체적 면에 작용하는 외력과 같다)을 적용 함으로서 식 (6)의 기상 및 액상의 압력을 구할 수 있다.

먼저, 액상의 경우 x -방향에 대한 운동량 이론을 적용하면

운동량 생성률:

$$\rho_l \left(u_l^2 + \frac{du_l^2}{dx} dx \right) \left(A_l + \frac{dA_l}{dx} dx \right) - \rho_l u_l^2 A_l \quad (7a)$$

외력:

$$P_l A_l - \left(P_l + \frac{dP_l}{dx} dx \right) \left(A_l + \frac{dA_l}{dx} dx \right) + \tau_{l,i} A_{l,i} - \tau_{l,w} A_{l,w} \quad (7b)$$

이 된다. 여기서 u , A , τ 는 각각 속도, 면적 그리고 전단응력을 의미하며, 하첨자 l, i 와 l, w 는 액상-기상 경계면과 벽면을 각각 나타낸다. 그리고 A_l 은 액상의 단위 폭당 면적으로, 이 연구에서는 $A_l = \delta$ 이 된다. 이때, $\tau_{l,i}$ 의 방향은 가정④에 의한 것이다.

식(7)를 정리하면, 액막 두께, 액상 속도 그리고 액상 압력이 서로 연관된 미분형태의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\left(\rho_l u_l^2 + P_l \right) \frac{d\delta}{dx} + 2\rho_l \delta u_l \frac{du_l}{dx} + \delta \frac{dP_l}{dx} = \tau_{l,i} - \tau_{l,w} \quad (8)$$

기상의 경우에도 액상과 동일한 방법으로 x -방향의 운동량 이론을 적용하면

$$\begin{aligned} & \rho_v \left(u_v^2 + \frac{du_v^2}{dx} dx \right) \left(A_v + \frac{dA_v}{dx} dx \right) - \rho_v u_v^2 A_v \\ & = P_v A_v - \left(P_v + \frac{dP_v}{dx} dx \right) \left(A_v + \frac{dA_v}{dx} dx \right) - \tau_{v,i} A_{v,i} \end{aligned} \quad (9)$$

이 된다. 식(9)에서 $A_v (= H/2 - \delta)$ 는 기상의 단위

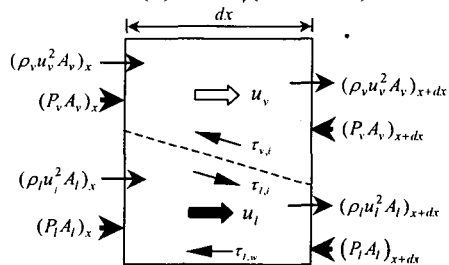


Fig. 3 Control volume for momentum equation

폭당 면적이며, 하첨자 v, i 는 기상에서의 액상-기상 경계면이다. 식 (9)를 정리하면 다음과 같다.

$$-(\rho_v u_v^2 + P_v) \frac{d\delta}{dx} + 2\rho_v \left(\frac{H}{2} - \delta \right) u_v \frac{du_v}{dx} + \left(\frac{H}{2} - \delta \right) \frac{dP_v}{dx} = -\tau_{v,i} \quad (10)$$

식 (8)의 액상에서의 벽면 전단응력 ($\tau_{i,w}$)은 다음 식을 이용하여 계산된다.

$$\tau_{i,w} = \frac{1}{2} \rho u^2 f, \quad f = \frac{k}{\text{Re}_{D_h}} \quad (11)$$

마찰계수 (f)에 나타난 상수 k 는 기하학적인 형상에 따라 다르게 정의되는데, 이 연구에서와 같이 무한 평판인 경우에 $k=24$ 를 사용하였다⁽⁶⁾. 또한 Reynolds 수의 정의에 사용된 수력지름 (D_h)은 유동이 진행됨에 따라 변하므로 $D_h = \delta$ 라 하였다. 또한, 식 (8)과 (10)의 액상-기상 경계면에서의 전단응력(τ_i)은 다음 식으로부터 구한다⁽⁷⁾.

$$\tau_i = \frac{1}{2} \rho_v u_v^2 f - \rho_v u_v v_{v,i} \quad (12)$$

여기서 기상 및 액상에 대한 경계면에서의 전단응력은 그 크기가 같고 방향은 반대이다.

2.2.2 질량 보존

식 (8)과 (10)에서 액상과 기상의 속도(u_i, u_v)는 질량 보존 방정식으로부터 구할 수 있으며, Fig. 4 에 검사체적에 대한 질량유량 변화를 나타내었다. 액상영역에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\rho_i u_i A_i = \rho_i \left(u_i + \frac{du_i}{dx} dx \right) \left(A_i + \frac{dA_i}{dx} dx \right) + \dot{m}, \quad (13)$$

여기서, \dot{m} 은 액상-기상 경계면을 지나는 증발질량유량을 의미하며, 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{m} = \rho_i A_{i,i} v_{i,i} = \rho_v A_{v,i} v_{v,i} \quad (14)$$

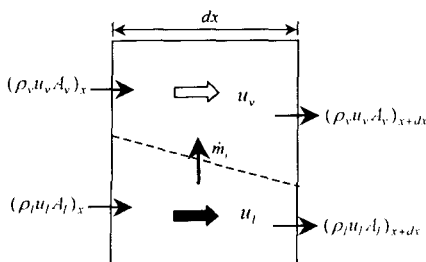


Fig. 4 Control volume for continuity equation

여기서 A_i 는 단위 폭당 경계면의 면적 ($A_i = dx$)이며, $v_{v,i}$ 와 $v_{i,i}$ 는 각각 액상-기상 경계면에서의 액상과 기상의 y -방향 속도이다.

식 (14)을 식 (13)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 액막 두께와 속도의 관계식을 얻게 된다.

$$u_i \frac{d\delta}{dx} + \delta \frac{du_i}{dx} + v_{v,i} = 0 \quad (15)$$

동일한 방법으로, 기상에 대해 질량보존법칙을 적용하면 기상 속도와 액막 두께의 상관관계식을 구할 수 있다.

$$-u_v \frac{d\delta}{dx} + \left(\frac{H}{2} - \delta \right) \frac{du_v}{dx} - v_{v,i} = 0 \quad (16)$$

2.2.3 에너지 보존

식 (15)와 식 (16)에서 액상-기상 경계면에서의 액상 및 기상의 속도는, 유입되는 열유속 (q'')과 증발질량유량(\dot{m})의 관계를 이용하여 구할 수 있다.

$$\dot{m}_i = \frac{\int_0^{\delta} q'' dx}{h_{fg}} = \frac{q'' A_w}{h_{fg}} \quad (17)$$

따라서 식(14)와 (17)로부터, 액상 및 기상의 증발 속도는 다음과 같이 계산된다.

$$v_{v,i} = \frac{q'' A_w}{\rho_i A_i h_{fg}}, \quad v_{i,i} = \frac{q'' A_w}{\rho_v A_v h_{fg}} \quad (18)$$

2.3 박막 영역

박막영역에의 열 및 유동특성을 규명하기 위해 Park 등⁽⁴⁾이 제시한 모델을 적용하였으며, 이들이 제시한 액막 두께, 액상 및 기상의 압력에 대한 지배방정식은 각각 다음과 같다.

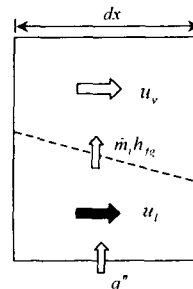


Fig. 5 Control volume for energy equation

액막 두께 (δ):

$$\frac{d^3\delta}{dx^3} - 3\left(\frac{d\delta}{dx}\right)\left(\frac{d^2\delta}{dx^2}\right)^2 \left[1 + \left(\frac{d\delta}{dx}\right)^2\right]^{-1} - \frac{1}{\sigma} \left(\frac{dP_v}{dx} - \frac{dP_l}{dx} + \frac{3\bar{A}}{\delta^4} \frac{d\delta}{dx}\right) \left[1 + \left(\frac{d\delta}{dx}\right)^2\right]^{-1.5} = 0 \quad (19a)$$

기상 압력 (P_v):

$$\frac{dP_v}{dx} = \left\{ \dot{m}_v + \frac{dP_l}{dx} \left(-\frac{\delta^2 H}{4\mu_l} + \frac{\delta^3}{2\mu_l} \right) \rho_v \right\} / A \quad (19b)$$

$$A = -\frac{H^3}{24\nu_v} + \frac{\rho_v \delta H^2}{4\mu_l} + \frac{\delta H^2}{4\nu_v} - \frac{\rho_v H \delta^2}{\mu_l} - \frac{H \delta^2}{2\nu_v} + \frac{\delta^3}{3\nu_v} + \frac{\rho_v \delta^3}{\mu_l}$$

액상 압력 (P_l):

$$\frac{dP_l}{dx} = \frac{3}{2\delta} \left(\delta - \frac{H}{2} \right) \frac{dP_v}{dx} - \frac{3\nu_l}{\delta^3} \dot{m}_l \quad (19c)$$

질량유량 & 열유속 (\dot{m} & q''):

$$\dot{m}_v = \frac{\int_0^{x_{\max}} q'' dx}{h_{fg}}, \quad \dot{m}_l = \frac{\int_0^x q'' dx}{h_{fg}} \quad (19d)$$

3. 수치해석

마이크로 채널 내의 확장 초승달 영역에서의 열 및 유동특성을 규명하기 위해 계산되어야 할 변수는 액막 두께(δ), 액상과 기상의 압력(P_l , P_v) 및 속도(u_l , u_v) 등이다. 이것들은 비선형 상미분방정식에 의해 표현되기 때문에 미분방정식의 해를 구하기 위해서는 다음의 초기 조건이 필요하다.

$$\delta_0 = H/2, \quad \left. \frac{d\delta}{dx} \right|_0 = \text{specific} \\ u_{v,0} = 0, \quad u_{l,0} = \text{specific} \quad (20)$$

$$P_{v,0} = P_{v,\text{sat}}(T_{v,0}), \quad P_{l,0} = P_{v,0} - \frac{\sigma}{(H/2 - \delta_0)} - \frac{\bar{A}}{\delta_0^3}$$

여기서 입구부에서의 액막 두께의 구배 ($d\delta/dx$)는 음의 값으로 매우 큰 값을 주었다. 기상의 초기 압력($P_{v,0}$)은 기상의 온도($T_{v,0}$)가 383K 일 때의 포화압력이며, 액상의 초기 속도($u_{l,0}$)는 Khrustalev와 Faghri⁽⁸⁾의 실험결과를 이용하였다.

확장 초승달 영역에서는 유동이 이루어짐에 따라 곡률이 감소하여 모세관압력이 감소하는데, 이

연구에서는 모세관압력이 분리압력 보다 작아지기 시작하는 x -위치를 박막영역의 시작 위치로 정의하였다.

따라서 초승달 영역에 대해서는 초기 조건식인 식 (20)를 이용하여 지배방정식인 식 (6), (8), (10), (15) 그리고 (16)을 Runge-Kutta Fehlberg 방법으로 계산한다. 다음, 분리압력이 모세관압력보다 커지는 위치에서의 모든 변수 값 (δ , u_v , u_l , P_v , P_l 등)을 박막영역의 초기값으로 이용함으로써, 박막영역에서의 열 및 유동특성을 규명한다. 이러한 계산은 액막 두께(δ)가 10^{-9} m 가 될 때까지 수행한다.

4. 결과 및 토의

마이크로 채널 내 확장초승달영역의 증발에 의한 2-상유동 현상을 규명하기 위한 지배방정식을 유도하기 위해 미소 검사체적에 대해 질량, 운동량 그리고 에너지방정식을 적용하였다. 또한 열유속과 액상의 초기 속도 변화가 유동특성에 미치는 영향을 조사하였다. 사용된 작동유체는 물로서, 383 K 에 대한 물성치를 이용하였다. 기준 모델의 열 및 유동조건은 채널 높이(H)는 120 μm , 액상의 초기 속도($u_{l,0}$)는 0.027 m/s 그리고 열유속(q'')은 $1.0 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ 이다.

4.1 유동 및 열전달특성

확장 초승달영역의 유동방향 (x) 에 대한 액막 두께(δ) 및 상변화 과정에 의한 국소 열전달계수 (h)의 변화를 Fig. 6(a)에 나타내었으며, Fig. 6(b)에 모세관압력 및 분리압력을 각각 도시하였다. 먼저, Fig. 6(a)에서 보면 액상의 작동유체가 흡착영역으로 흘러감에 따라 채널로 유입되는 열에 의해 증발하면서 액막 두께는 약 $x = 1 \text{ mm}$ 까지는 급격히 감소하며, 이후 완만하게 감소한다. 액막두께의 변화는 모세관압력과 분리압력의 분포에 직접적인 영향을 미친다. 즉, Fig. 6(b)에 나타난 바와 같이, δ 의 감소로 액상-기상 경계면의 곡률 (K)이 감소하여 모세관압력은 δ 의 형상과 거의 동일하게 변한다. 또한 거의 0 Pa 에 가깝던 분리압력은 확장 초승달영역의 마지막 부분에서 급격히 증가한다. 이 연구에서는 분리압력의 크기가 모세관압력 보다 더 커지는 지점이 $x = 3.24 \text{ mm}$ 로서, 이 위치를 기준으로 초승달영역과 박막영역으로 구분하였다. 따라서 박막영역의 길이는 초승달영역의 길이에

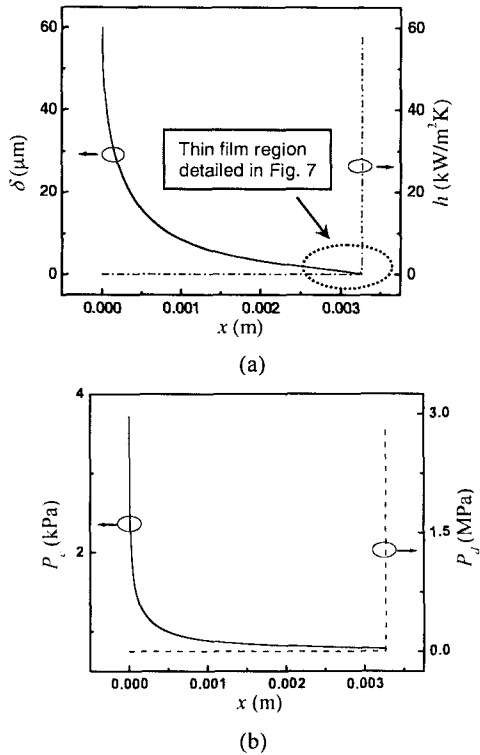


Fig. 6 (a) Film thickness and local heat transfer coefficient and (b) capillary and disjoining pressures

비해 매우 짧다. 이러한 초승달영역 및 박막영역의 구분을 고려한 상태에서 Fig. 6(a)의 국소 열전달계수의 변화를 보면, 초승달영역에서는 거의 열전달이 발생하지 않은 반면 박막영역에서 그 값은 급격히 증가한다. 이는 액막 두께가 작을수록 열저항이 감소하여 열전달이 활발히 이루어지기 때문이다. 따라서 대부분의 열전달이 박막영역에서 발생한다.

Fig. 7은 박막영역에서의 액막 두께의 변화를 유동방향에 대해 도시한 것으로, 박막영역만을 해석한 Park 등⁽⁴⁾의 결과와 비교하여 나타내었다. 이때 $q'' = 10^6 \text{ W/m}^2$ 이며 $H = 120 \mu\text{m}$ 이다. 이 그림에서 $x = 0$ 은 전체 해석 영역에서의 위치 $x = 3.24 \text{ mm}$ 를 의미한다. 그림에 나타난 바와 같이 박막영역의 길이(L)는 약 $17.5 \mu\text{m}$ 로서 확장초승달 영역의 약 0.5%를 차지하며, 박막영역 입구에서의 액막 두께는 16.2 nm 이다. 이러한 결과는 Park 등의 결과 ($L = 8.2 \mu\text{m}$, $\delta_f = 23.4 \text{ nm}$)와 약간의 차이를 보이는데, 이는 해석영역을 서로 다르게 선정하여 초기조건을 부여하였기 때문이다. 즉, 이 연구에서는 확장초승달영역의 $x = 3.24 \text{ mm}$ 위치에서 계산된

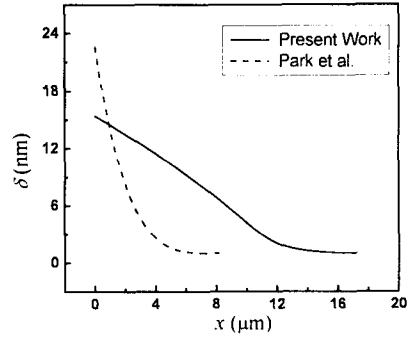


Fig. 7 Film thickness at thin film region

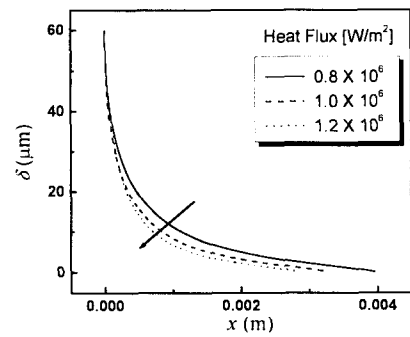


Fig. 8 Film thickness with heat flux

변수들을 박막영역의 초기값으로 사용한 반면, Park 등의 연구는 흡착영역에서부터 해석을 시작하여 모세관압력이 분리압력보다 커지는 위치까지를 박막영역으로 규정하여 해석하였기 때문이다.

4.2 열유속과 초기 액상속도의 영향

Fig. 8은 열유속의 변화에 따른 액막두께의 분포를 Fig. 6과 동일한 조건에 대해 나타낸 그림이다. 그림에서 보는바와 같이, 열유속의 증가는 액막의 두께 및 확장 초승달영역의 길이를 감소시키지만, 액막의 전반적인 형상에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 이는 Swanson 과 Herdt⁽⁹⁾의 결과와 일치한다. 열유속의 증가는 액상압력(P_l)을 증가시키지만, 기상의 압력(P_g) 변화에는 큰 영향을 미치지 않는다 (Fig. 10 참조). 따라서 채널로 유입되는 열이 증가할수록, 액상과 기상의 압력차가 커져 유속 및 액상의 증발 질량유량을 증가시키기 때문에 액막의 두께는 감소하게 된다. 또한 열유속이 증가할수록 액막 두께 및 확장초승달 영역의 길이에 미치는 영향이 점차 감소하고 있음을 Fig. 8은 잘 보여주고 있다.

Fig. 9(a)와 (b)는 유입되는 열의 변화에 따른 액상 및 기상의 압력변화를 나타낸 그림이다. 동일한 열유속인 경우, 유동이 진행됨에 따라 액상 및 기상의 압력(P_l 과 P_v)이 동시에 감소하여 액상 및 기상이 동일한 방향 (x -방향)으로 흘러 나가고 있음을 의미한다. 이는 액상-기상 경계면에서의 전단응력 및 곡률반지름의 증가에 의해 발생하는 현상이다. 특히, Fig. 10(a)와 (b)를 비교하면, 액상의 압력변화가 기상에 비하여 매우 크게 나타나는데 (약 10^3 차이), 이로부터 경계면에서 발생하는 전단응력은 주로 액상의 압력강하에 의한 것임을 알 수 있다. 또한 급격한 압력 변화가 확장초승달 영역의 끝부분, 즉 박막영역에서 발생되고 있다. 유입되는 열유속이 증가할수록 액상 및 기상의 압력구배 ($\Delta P/L$)는 모두 증가하는데, 이는 더 많은 열이 채널로부터 유입됨에 따라 액막두께의 감소가 질량유량의 증가를 초래하기 때문이다.

열유속 변화에 따른 액상(u_l)과 기상의 속도(u_v)분포를 Fig. 10(a)와 (b)에 각각 나타내었다. Fig. 10(a)에서 액상의 속도는 확장 초승달영역의 약 30%까지 증가하다가 감소한다. 특히, 박막영역에 접근하면서 급격히 감소한다. 이러한 현상은 모든 열유속 조건에 대해 동일한 경향을 보인다. 그러

나 최대속도 및 발생위치는 열유속의 변화에 따라 다르게 나타나는데, 이를 Table 2에 보다 자세히 나타내었다. Table 2에서 보는 바와 같이, 열유속의 증가로 액상 속도의 최대값은 거의 선형적으로 증가하며, 최대속도의 발생위치는 점차 확장초승달 시작 위치로 이동하고 있음을 알 수 있다. 기상의 속도는 유동 방향에 대해 거의 선형적으로 증가하며 박막영역에서 급격히 증가한다. 이는 박막영역에서 높은 열전달로 인해 증발질량유량이 급증하기 때문이다. 그리고 열유속(q'')의 증가에도 불구하고 기상의 최대 속도($u_{v,max}$)는 거의 변하지 않는다. 또한 동일한 열유속의 경우에 Fig. 10(a)와 (b)를 비교해 보면, 기상의 속도가 액상에 비해 약

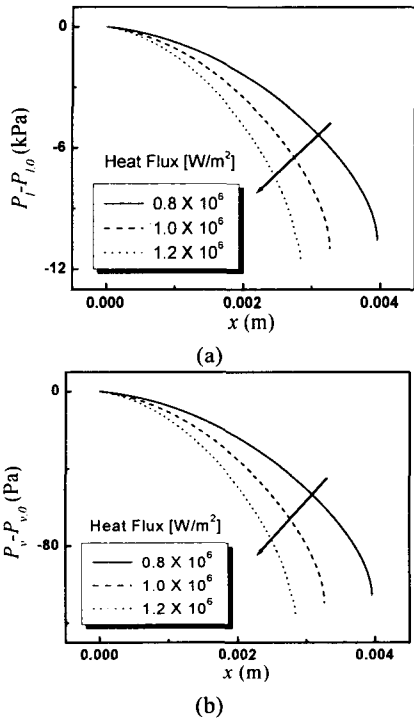


Fig. 9 (a) Liquid and (b) vapor pressure with heat flux

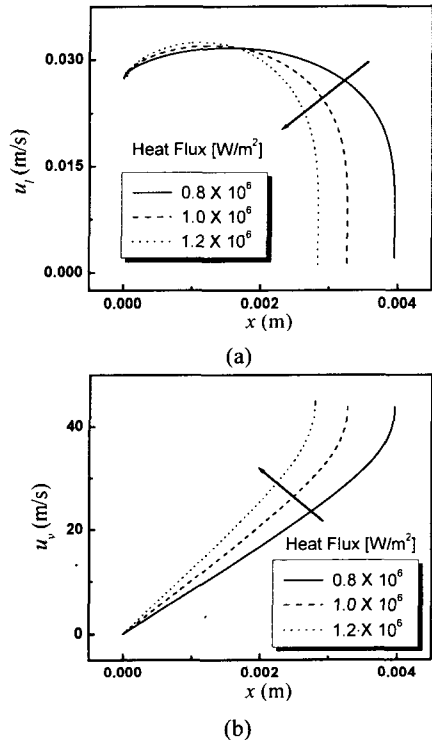


Fig. 10 (a) Liquid and (b) vapor velocities with heat flux

Table 2 Maximum liquid velocity and its location with heat flux

	Heat flux (q'' , 10^6 W/m 2)		
	0.8	1.0	1.2
$u_{l,max}$ [mm/s]	31.65	31.98	32.48
Corresponding x-location [mm]	1.62	1.24	1.13

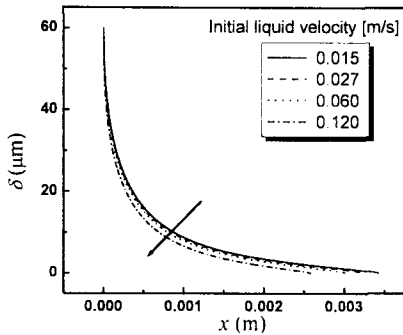


Fig. 11 Film thickness with liquid velocity

10³ 정도 빠름을 알 수 있다.

Fig. 11 은 Fig. 6 과 동일한 조건에서 액상의 입구 속도 변화에 따른 액막의 형상을 나타낸 그림이다. 액상의 입구 속도가 증가할수록, 즉 유입되는 유체의 질량유량이 증가할수록, 액막의 두께와 확장 초승달영역의 길이는 감소하지만 형상은 유지된다. 이는 액상의 속도가 증가하면 액상과 기상의 압력 차가 증가하고 더 많은 양의 증발이 발생했기 때문이다. 그러나 속도의 변화폭에 비해 액막 형상의 변화는 미미함을 알 수 있다.

5. 결론

이 연구에서는 작동유체(물)의 증발로 인해 발생하는 확장 초승달영역에서의 2-상 유동현상을 해석적으로 규명하기 위해 기상의 압력변화와 분리압력을 고려한 수학적 모델을 제시하였다. 이를 바탕으로 열유속 변화와 액상의 유입속도 변화가 유동 특성에 미치는 영향을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 박막영역의 길이는 초승달영역보다 매우 짧지만 대부분의 열이 박막영역에서 전달된다.
- (2) 열유속과 액상 입구 속도의 증가는 확장 초승달영역의 길이와 액막두께를 감소시키지만 그 형상에는 영향을 미치지 않는다
- (3) 액상의 속도는 유체가 흘러감에 따라 최고 속도 지점을 지난 후 급격히 감소한다. 반면에 기상의 속도는 거의 선형적으로 증가하지만 초승달 영역에 이르러 급격히 증가한다.

(4) 액상의 입구속도 변화가 유동특성에 미치는 영향은 미미하다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 한양대학교 최적 설계신기술연구센터(iDOT)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Longtin, J. P., Badran, B. and Gerner, F. M., 1994, "A One-Dimensional Model of a Micro Heat Pipe During Steady-State Operation," *J. of Heat Transfer*, Vol. 116, pp. 709~715.
- (2) Sartre, V., Zaghoudi, M. and Lallemand, M., 2000, "Effect of interfacial phenomena on evaporative heat transfer in micro heat pipes," *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 39, pp. 498~504.
- (3) Peles, Y.P. and Haber, S., 2000, "A study state, one dimensional model for boiling two phase flow in triangular micro-channel," *Int. J. of Multiphase Flow*, Vol. 26, pp.1095~1115.
- (4) Kyoungwoo Park, Kwan-Joong Noh and Kwan-Soo Lee, 2002, "Transport Phenomena in a Thin Film Region of Micro Channel," *Int. J. Heat Mass Transfer*, submitted.
- (5) Derjaguin, B.V., Zorin, Z.M., 1957, "Optical Study of the Absorption and Surface Condensation of Vapors in the Vicinity of Saturation on a Smooth Surface," *Proc. 2nd International Congress on Surface Activity* (London), Vol.2, pp.145~152.
- (6) Bejan, 1995, *Convection Heat Transfer*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., pp. 102~104.
- (7) Blangetti, F. and Naushahi, M. K., 1980, "Influence of Mass Transfer on the Momentum Transfer in Condensation and Evaporation Phenomena," *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 23, pp. 1694~1695.
- (8) Khurstalev, D. and Faghri, A., 1997, "Thick-Film Phenomenon in High-Heat-Flux Evaporation From Cylindrical Pores," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol.119, pp.272~278.
- (9) Swanson, L.W. and Herdt, G.C., 1992, "Model of the Evaporating Meniscus in a Capillary Tube," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol.114, pp.434~441.