

가열된 표면에 고착된 액적의 증발 특성에 관한 수치해석 연구

정찬호* · 이형주* · 윤국현* · 이성혁†

Numerical Analysis of the Sessile Droplet Evaporation on Heated Surfaces

Chan Ho Jeong, Hyung Ju Lee, Kuk Hyun Yun and Seong Hyuk Lee

Key Words: Droplet evaporation(액적 증발), Computational fluid dynamics(전산유체역학), Thermal property(열물성), Free convection(자연 대류)

Abstract

Droplet evaporation has been known as a common phenomenon in daily life, and it has been widely used for many applications. In particular, the influence of the different heated substrates on evaporation flux and flow characteristics is essential in understanding heat and mass transfer of evaporating droplets. This study aims to simulate the droplet evaporation process by considering variation of thermal property depending on the substrates and the surface temperature. The commercial program of ANSYS Fluent (V.17.2) is used for simulating the conjugated heat transfer in the solid-liquid-vapor domains. Moreover, we adopt the diffusion-limited model to predict the evaporation flux on the different heated substrates. It is found that the evaporation rate significantly changes with the increase in substrate temperature. The evaporation rate substantially varies with different substrates because of variation of thermal property. Also, the droplet evaporates more rapidly as the surface temperature increases owing to an increase in saturation vapor pressure as well as the free convection effect caused by the density gradient.

1. 서 론

액적 증발은 상변화 현상으로 액체 상태에서 기체 상태로 변하는 기화 현상의 일종이다. 증발 현상은 자연현상 및 산업현상 어디에나 존재하며 많은 연구자들의 관심을 받고 있으며, 지난 수십년간 증발 현상의 메커니즘이 연구되어졌다^(1,2). 특히, 증발률은 고착된 액적의 열 전달, 접촉 거동, 그리고 내부 유동 등의 특성에 영향을 미친다⁽³⁻⁵⁾. 따라서 액적의 증발률에 미치는 인자들을 찾고, 정량적으로 증발률을 예측하는 연구들이 수행되었

다. Deegan 등은⁽⁶⁾ 정상상태 확산 방정식(steady state diffusion equation)으로부터 고착된 액적 증발률의 해석해를 도출하였다. 그들은 확산 방정식으로부터 해석해를 구하기 위하여 외기의 자연대류를 무시하였고 액체-기체상 사이에 기화된 분자들이 오직 확산에 의하여 주변 대기로 전파된다고 가정하였다. 그러나, 확산 모델은 상온 조건에서 액적 증발률을 예측하는 데 유용하지만, 전열면의 온도가 높아져 자연 대류가 중요해지는 경우, 부정확한 결과가 보고되었다⁽⁶⁾. 실제로 고온의 전열면과 접촉된 외기에서 나타나는 자연대류는 액적 주변의 증기 분포에 영향을 미친다⁽⁷⁻⁹⁾. Dunn 등⁽¹⁰⁾은 상온에서 전열면의 열 물성이 증발률에 미치는 영향을 수치해석하였다. 그들은 전열면과 액적 사이의 복합열전달을 고려하고 증발 냉각 현상을 수치해석 함으로써, 경계면에서의 국부온도에 따른 포화증기압력 변화를 반영하여 증발률을 예측하였다. 이때 전열면의 열전도율이 낮은 경

(Received: 18 Aug 2020, Received in revised form: 23 Sep 2020, Accepted: 25 Sep 2020)

*중앙대학교 기계공학과

†책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학과

E-mail: shlee89@cau.ac.kr

TEL : (02)820-5254 FAX : (02)814-9476

우, 온도 구배가 커짐에 따라 증발률이 크게 낮아짐을 보였다. 그러나, 그들은 고온 전열면의 열물성이 액적 증발에 미치는 영향을 파악하지 못했다. 이후에 Sobac과 Brutin⁽⁶⁾이 25~75°C 온도 범위에서 전열면의 열물성이 증발 현상에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 그들은 다양한 전열면의 온도 및 열물성에 따른 증발률 값을 측정하였고, 확산 모델을 이용하여 예측한 증발률 값과 비교하였다. 결과에 따르면, 25°C 전열면에서 측정된 증발률과 예측값 사이에는 3.2%, 75°C의 전열면에서는 30%의 차이가 나타났다. 즉, 온도가 높을수록 전열면의 열적 특성이 증발 특성에 중요한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 그러나, 실험 연구의 한계상 고온 전열면의 열물성에 따른 액적-전열면 사이의 복합열전달 변화와 내부 온도 구배가 증발 현상에 미치는 영향을 정량적으로 분석하지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 다양한 전열면에 대해서 표면 온도 변화에 따른 액적 증발 현상을 수치해석을 통해 연구하였다. 특히, 고체-액체-기체 사이의 복합열전달 현상을 고려하고, 전열면의 열적 특성에 따른 증발률, 국부 증발유속, 외기의 증기 분포를 분석하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 형상 및 격자 생성

본 연구에서는 가열 표면에서 증발하는 액적의 열전

달 현상을 고려하기 위해 2차원 축대칭 모델을 사용하였으며, Fig. 1과 같은 계산 영역을 구성하였다. Sobac과 Brutin⁽⁶⁾의 실험결과와 비교하기 위해 수치해석 영역을 유사하게 형상화하였다. 고체 시편은 반지름이 5 mm이고 높이는 10 mm이다. 액적의 체적과 접촉각은 각각 $3.3 \mu\text{l}$ 그리고 67.5° 이다. 액적의 형상을 구형 캡 형상으로 가정하여, 체적과 접촉각을 통해 액적의 접촉 반지름을 계산할 수 있다.

$$R_c = \left(\frac{3}{\pi} V \frac{\sin^3 \theta}{2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta} \right)^{1/3} \quad (1)$$

액적의 초기 접촉각은 약 4 nm의 매우 얇은 표면 코팅을 통해 일정한 접촉각을 갖도록 할 수 있다⁽⁶⁾. 또한, 표면 코팅의 두께는 매우 얇기 때문에 이로 인해 발생하는 열저항은 무시할 수 있으며, 따라서 수치해석에서 표면 코팅 두께의 영향은 무시하였다⁽⁶⁾. 사면격자로 계산영역을 구성하였으며, 격자 독립성 시험을 통해 85,556개의 격자를 사용하였다.

2.2 수치해석 조건

증발로 인한 액적의 체적 변화 속도는 기체확산, 열확산 등의 속도에 비해 매우 느리기 때문에 준평형 상태(quasi-steady state)로 가정할 수 있다⁽¹¹⁾. 준평형 확산 모델(quasi-steady diffusion model)을 사용하여 액적의 액체-기체 경계면에서 증발 유속을 계산하였다. 액적의 증발 유속은 액체-기체 경계면에서 수송되는 증기량과 같

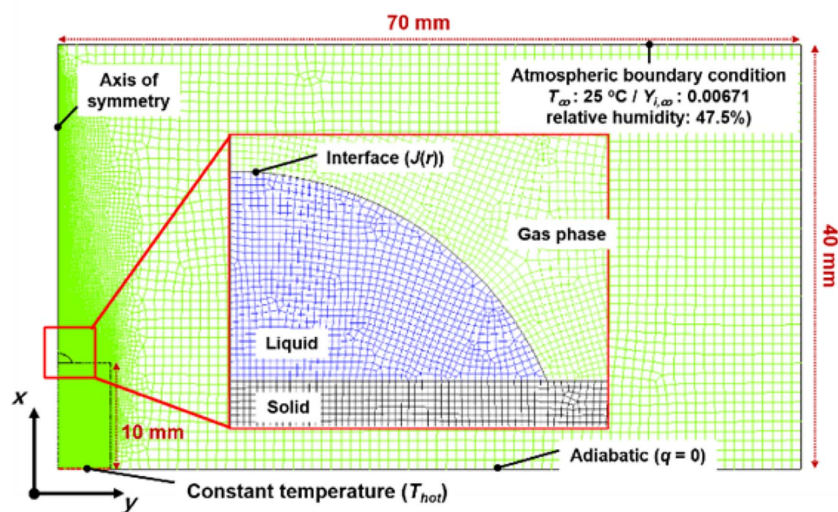


Fig. 1 Computational domain

으므로 Fick's law에 의해 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$J = M(-D\bar{n} \cdot \nabla C_v) \quad (2)$$

여기서, M 은 증기의 몰 질량, D 는 확산계수, n 은 경계면의 법선 벡터, C_v 는 증기의 몰 농도를 나타낸다. 액체-기체 경계면에서의 증기 농도는 포화상태로 가정하였다. 액적의 경계면을 따라 국부 온도 분포가 달라지기 때문에 온도에 따른 포화증기압을 고려해야 하며, 국부 포화증기압은 Clausius-Clapeyron방정식으로 계산하였다⁽¹²⁾.

$$C_{v, sat} = \frac{P_{sat}(T_v)}{RT_v} \quad (3)$$

$$P_{sat}(T_v) = 12,352 \exp\left(\frac{Mh_{fg}}{R} \left(\frac{1}{323.15} - \frac{1}{T_v}\right)\right) \quad (4)$$

P_{sat} 은 포화증기압, T_v 는 액적의 경계면 온도, R 은 기체 상수, h_{fg} 는 증발 잠열이다. 유동장 해석을 위해 층류로 가정하였으며, 고체 표면과 액체, 기체의 복합 열전달을 계산하였다. 또한, 질량 보존, 운동량 보존, 에너지 보존, 중 수송 방정식을 계산하였으며, 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (\rho_i \vec{V}) = 0 \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\rho_i \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \mu_i \nabla^2 \vec{V} + \rho_i \vec{g} \quad (6)$$

$$\nabla \cdot (\vec{V}(\rho_i E + p)) = k_i \nabla^2 T + S \quad (7)$$

$$\nabla \cdot (\rho_i \vec{V} Y_i) = \nabla \cdot (\rho_i D_i \cdot \nabla Y_i) \quad (8)$$

$$S = -h_{fg} \frac{JA_{cell}}{V_{cell}} \quad (9)$$

여기서, S 는 액적 증발로 발생하는 냉각효과를 고려하기 위한 에너지 생성항, A_{cell} 은 경계면에 인접한 격자의 면적, V_{cell} 은 격자의 체적을 나타낸다.

전열면의 온도가 증발 현상에 미치는 영향을 고려하기 위해 시편 바닥면의 온도는 25, 35, 55, 그리고 75°C로 설정하였다. 외부 경계면(outer boundary)에는 대기 조건을 고려하여 일정한 상대습도와 온도를 적용하였으며, 외기의 바닥면은 단열 조건으로 설정하였다. 유체의 물성치는 각각 온도의 함수로 나타낼 수 있으며, Table 1과 같다^(6,10,12). 액체와 기체의 비열은 온도에 의한 변화에 매우 작기 때문에 상수로 사용했다. 또한, 시편의 열전도를 변화가 액적의 증발 거동에 미치는 영향을 파악하기 위해 구리, 알루미늄, 철, 세라믹을 사용하였으며, 각각의 물성치는 Table 2와 같다.

3. 결과 및 분석

Figure 2는 다양한 시편-구리, 알루미늄, 철, 그리고 세라믹에 대하여 가열면 온도 $T_{hot} = 25, 35, 55, 75^\circ\text{C}$ 에 따른 증발률을 나타낸다. 본 연구의 수치해석기법 검증을 위하여 증발률을 Sobac과 Brutin⁽⁶⁾이 수행한 실험결과와 비교하였다.

Table 1 Fluid properties

	Water	Gas
Density (kg/m ³)	-0.00379T ² +1.996T+738.719	Ideal gas law
Thermal conductivity (W/m·K)	-0.0000105T ² +0.007976T-0.83745	7.000×10 ⁻⁵ T+5.180×10 ⁻⁷
Specific heat capacity (J/kg·K)	4182	1006
Viscosity (kg/m·s)	2.0427×10 ⁻⁷ T ² -1.4102×10 ⁻⁴ T+2.4780×10 ⁻²	4.897×10 ⁻⁸ T+3.832×10 ⁻⁶
Latent heat (kJ/kg)	2274	-

Table 2 Properties of solid substrate

	Copper	Aluminum	Steel	Ceramic (Macor)
Density (kg/m ³)	8978	2719	8030	2520
Thermal conductivity (W/m·K)	387.6	202.4	16.3	1.5
Specific heat capacity (J/kg·K)	381	871	502.5	790

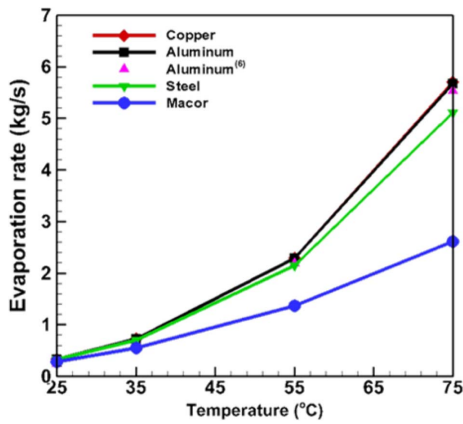


Fig. 2 Evaporation rate with different hot plate temperature

사각형 부호는 수치해석을 통해 예측한 온도에 따른 알루미늄 시편에서의 증발률을 나타내며, 삼각형 부호는 알루미늄 시편에서의 증발률을 나타낸다⁽⁶⁾. 최대오차는 약 4.2%로 수치해석 결과의 신뢰성을 확보하였다. 모든 전열면에 대하여 가열면 온도 T_{hot} 가 증가함에 따라 증발률이 증가하는 것을 확인하였다. 이는 가열면 온도가 증가함에 따라 포화증기압력이 증가하여 액적의 휘발성이 증가하기 때문이다⁽⁶⁾. 또한 액체-기체 경계면이 가열되어 연직방향으로의 밀도 구배가 발생하게 되고, 외기 영역에서 발생하는 자연대류가 액적의 증발을 촉진시킨다⁽¹⁰⁾. 또한, 동일 가열면 온도(T_{hot}) 조건에서는 전열면 종류에 따라 증발률 간의 차이가 나타났다. 이것은 열전도율이 큰 전열면일수록 시편 내부의 온도구배가 작고 결과적으로 액체-기체 경계면의 온도가 높아져

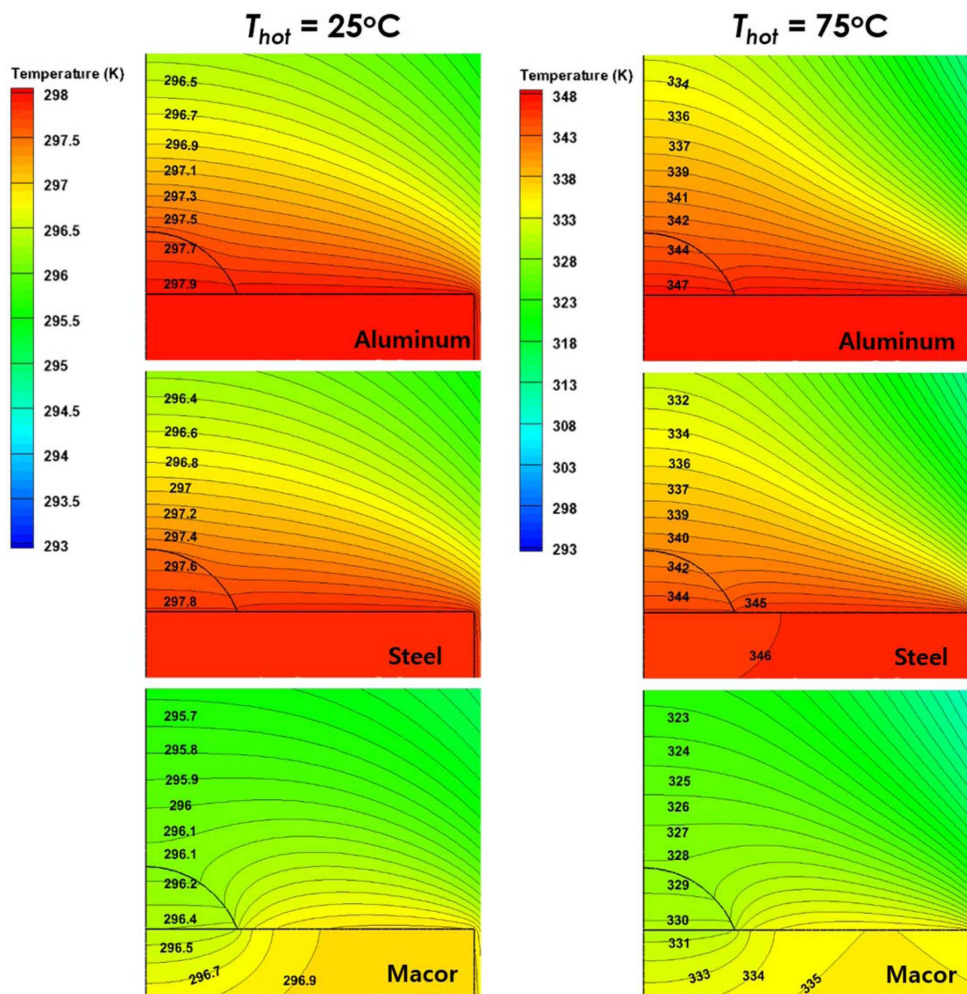


Fig. 3 The contours of temperature distribution

증발률이 커지기 때문이다. 이러한 전열면의 열 물성에 따른 증발률 차이는 가열면의 온도가 높을수록 크게 나타났다. $T_{hot} = 25^{\circ}\text{C}$ 인 알루미늄 시편에서의 증발률(\dot{m}_{al})이 세라믹 표면에서 증발률(\dot{m}_{macor})에 비해 16%가 크게 나타났고, $T_{hot}=75^{\circ}\text{C}$ 인 경우에는 117%가 크게 나타났다. 우선 전열면의 열적 특성이 증발에 미치는 영향을 정성적으로 분석하기 위하여 Fig. 3과 같이 온도장을 나타냈다. Fig. 3은 알루미늄, 철, 세라믹 시편을 $T_{bor}=25, 75^{\circ}\text{C}$ 로 가열하였을 때 나타나는 온도장이다. 금속의 경우 높은 열전도율로 인해 고체 내부의 온도 구배가 매우 작다. 특히 열전도율이 큰 알루미늄($k=202.4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)이

철표면($k=16.3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)에 비해 고체 내부에 더 작은 온도구배가 나타난다. 알루미늄은 가열면 온도가 75°C 인 경우, 고체-액체 경계면(T_{sl})과의 온도차 $T_{hot} - T_{sl}$ 는 0.34°C 정도로 작게 나타난다. 한편, 철 표면의 경우, $T_{hot} - T_{sl} = 2.79^{\circ}\text{C}$ 로 상대적으로 크게 나타났다. 열전도율이 매우 낮은 세라믹의 경우, 낮은 열전도율($k=1.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)로 $T_{hot} - T_{sl} = 17.58^{\circ}\text{C}$ 로 고체 내부에 큰 온도구배가 나타났다.

결과적으로 Fig. 4와 같이 동일한 가열면 온도 조건에서도 전열면의 종류에 따라 액체-기체 경계면의 온도(T_{lv})가 달라지게 된다.

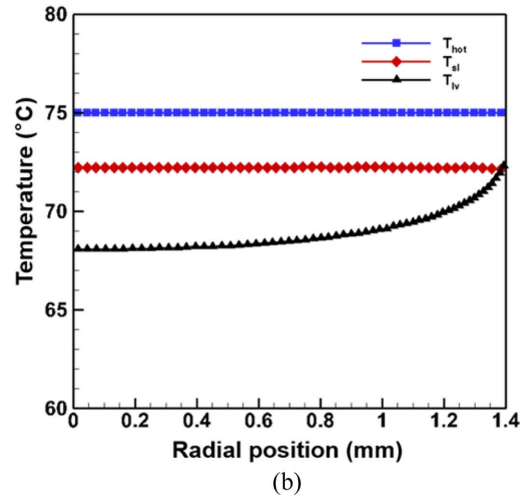
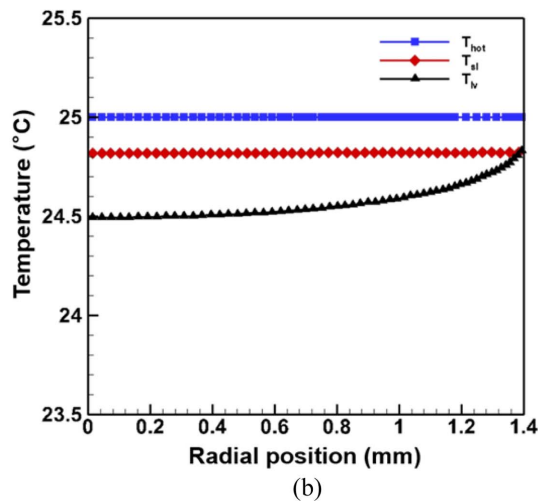
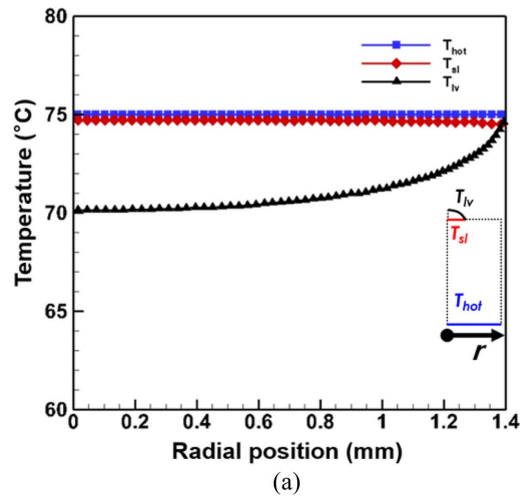
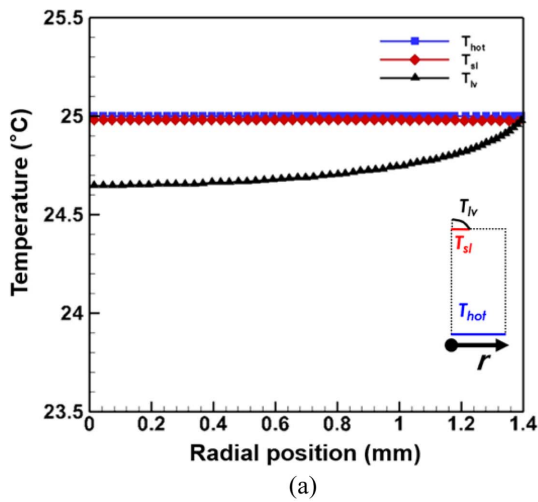


Fig. 4 Temperature distribution along the liquid-vapor interface(T_{lv}), solid-liquid interface(T_{sl}), and the boundary of hot plate ($T_{hot} = 25^{\circ}\text{C}$) with (a) aluminum and (b) steel substrates

Fig. 5 Temperature distribution along the liquid-vapor interface(T_{lv}), solid-liquid interface(T_{sl}), and the boundary of hot plate($T_{hot} = 75^{\circ}\text{C}$) with (a) aluminum and (b) steel substrates

Fig. 4(a, b)는 알루미늄, 철 시편의 가열면 온도 조건이 25°C인 경우, 국부 온도 분포를 나타낸다. 파란색, 빨간색 그리고 검은색 선은 각각 가열면, 고체-액체 경계면, 그리고 액체-기체 경계면에서의 국부 온도 분포이다. $T_{hot} - T_{sl}$ 은 알루미늄의 경우 0.021°C, 철의 경우 0.182°C의 차이가 난다. 이것은 알루미늄의 열전도율이 철에 비해 매우 높기(~12.4배) 때문이다. 따라서 전열면 종류에 따라 액체-기체 경계면에서의 온도 분포가 달라진다.

알루미늄, 철 시편을 75°C로 가열하였을 때의 국부 온도 분포를 나타낸 Fig. 5(a, b)에서도 유사한 결과를 확인할 수 있다. 가열면 온도가 75°C인 고온의 알루미늄 시편의 경우, 높은 열전도율로 인해 $T_{hot} - T_{sl} = 0.34^\circ\text{C}$

로, 철 시편의 $T_{hot} - T_{sl} = 2.79^\circ\text{C}$ 보다 작은 온도 차이를 갖는다. 전열면의 열물성에 따라 액체-기체 경계면에서의 온도가(T_{lv}) 달라지게 된다. 결과적으로, T_{lv} 는 액적의 증발률(\dot{m})에 영향을 미치는 포화증기압(P_{sat}) 및 확산계수(D)에 영향을 미친다.

Figure 6(a, b)는 액체-기체 경계면에서의 국부 증발유속을 반경 방향을 따라 나타낸 것이다. 앞서 언급한 것과 같이, 전열면의 열물성에 따라 달라지는 온도 구배로 인하여 증발 유속에 차이가 나타난다. 예를 들어, $T_{hot} = 25^\circ\text{C}$ 인 경우, 알루미늄 시편위에 놓인 액적의 국부 증발 유속이 철 시편 위에 놓인 액적 국부 증발 유속에 비해 평균 1.6% 크게 나타났으며, $T_{hot} = 75^\circ\text{C}$ 인 경우에는 평균 10.2% 크게 나타났다.

Figure 7은 알루미늄 전열면에 놓인 액적의 가열면 온도에 따른 증발유속을 나타내며, 전열면의 온도가 높을수록 증발유속이 증가한다. 이것은 온도가 증가할수록 액적의 휘발성과 관계 있는 화학적 물성값인 포화증기압력 및 확산계수가 증가하기 때문이다. 또한 Fig. 8과 같이 유동학적으로 전열면의 온도가 높아지면 액체-기체 연직방향으로 밀도의 구배가 증가하여 자연대류가 활발해진다. 활발해진 자연대류는 액체-기체 경계면의 포화된 증기수송을 촉진하여 증발량이 증가하게 된다.

전열면 온도 증가에 따른 자연대류가 액적 증발에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수치해석 시 중력 효과를 제거하여 자연대류를 무시하고 확산현상만을 고려하였다. Fig. 9는 알루미늄 시편에 대하여 확산만을 고려한 액적의 국부 증발유속과 확산과 자연대류를 모두 고려

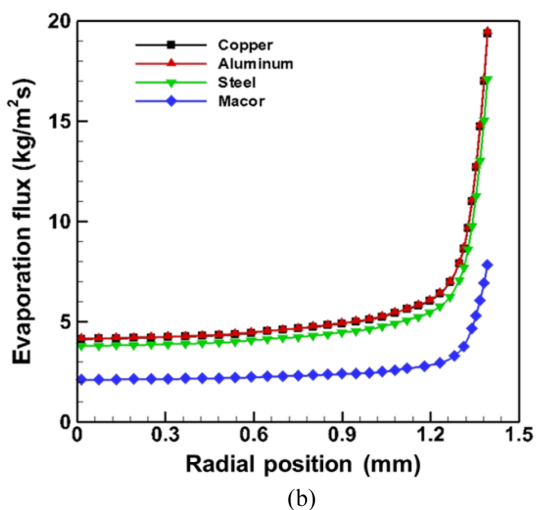
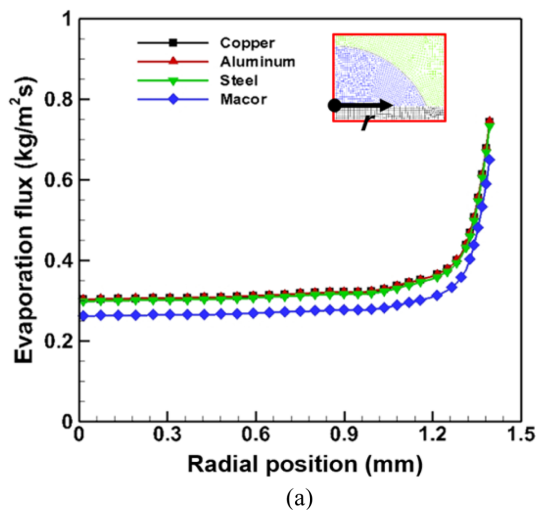


Fig. 6 Evaporation flux distribution along the liquid-vapor interface with (a) $T_{hot} = 25^\circ\text{C}$ and (b) $T_{hot} = 75^\circ\text{C}$

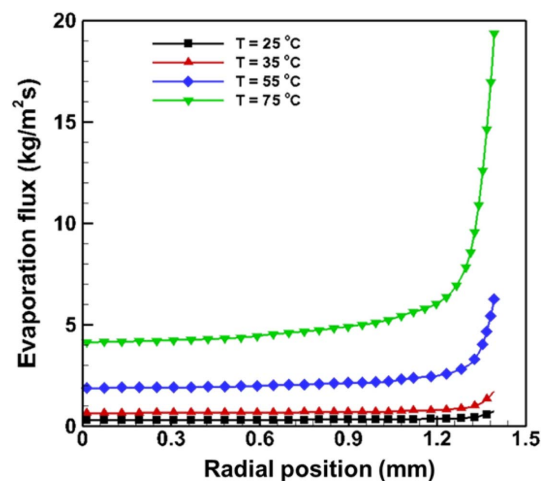


Fig. 7 Evaporation flux distribution along the liquid-vapor interface in case of aluminum substrate

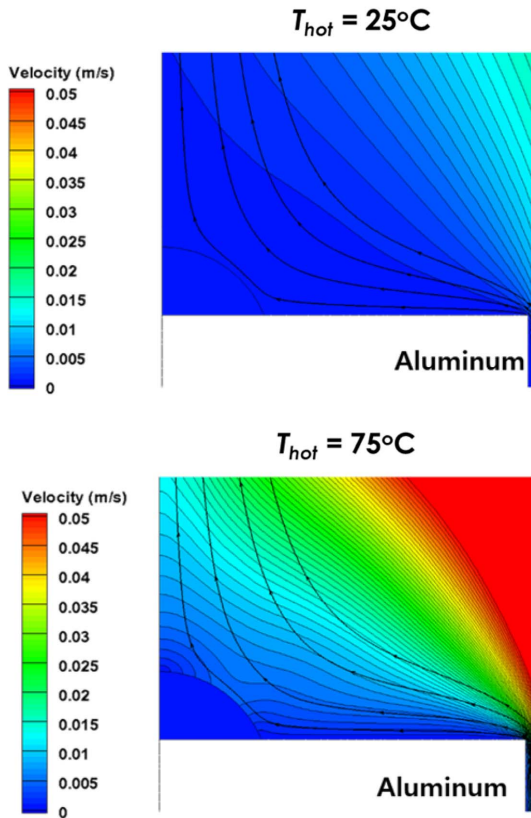


Fig. 8 The contours of velocity distributions

한 국부 증발유속을 비교한 결과이다. $T_{hot} = 25^\circ\text{C}$ 인 경우, 국부 증발 유속 차이는 평균 7.2%로 나타났고, $T_{hot} = 75^\circ\text{C}$ 인 경우에는 평균 12.5%의 차이를 보였다. 또한

국부 증발유속 차이가 액적의 중심부보다 반경 바깥 방향으로 갈수록 더 크게 나타난다. 즉, 자연대류가 증발 유속에 미치는 영향이 액적의 중심부보다 반경 바깥 방향에서 더 크게 나타남을 의미한다. 정량적인 분석을 위해, 유체의 확산 수송에 대한 대류에 의한 수송의 비를 나타내는 무차원수인 Peclet 수를 액적의 경계면을 따라 계산하였다. Peclet 수의 정의는 $u(\Delta x \cdot D)$ 이며, 여기서 u 는 경계면과 인접한 셀에서의 속도, Δx 는 셀에서의 격자의 크기를 나타낸다. Fig. 9(a, b)의 파란색 부호는 액체-기체 경계면의 인접한 셀에서의 Peclet 수를 나타낸다. 결과에 따르면 Peclet 수는 액적의 중심부로부터 반경 바깥 방향으로 멀어질수록 점점 커지다가 접촉선 영역에서 다시 작아지는 것으로 나타났다. 그리고 국부 Peclet 수가 상대적으로 큰 영역에서 더 높은 국부 증발 유속에 예측되었다. 이것은 액적이 가열됨에 따라 자연대류에 의한 증기 수송에 의해 증발이 더욱 촉진됨을 나타낸다. 이를 통해 고온 표면에서는 포화증기압의 변화와 자연대류에 의한 유동학적 메커니즘이 증발의 촉진에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 전열면의 열적 특성이 액적 증발에 미치는 영향을 분석하였다. 전열면의 온도와 열전도율 변화를 고려하여 증발률, 증발유속, 및 온도 분포 등을 수치해석을 통해 계산하였다. 상용프로그램을 사용하여 고체-액체-기체 영역의 복합열전달 현상을 수치해석하

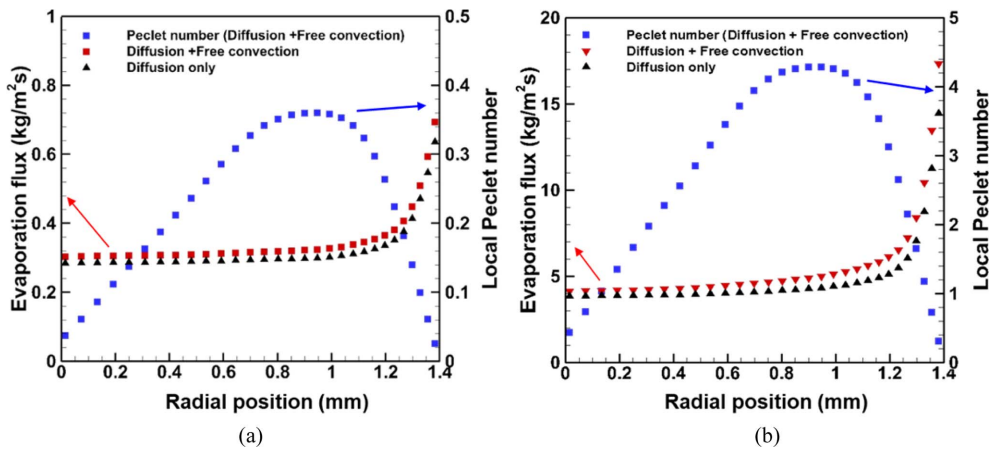


Fig. 9 Evaporation flux and Peclet number distribution along the liquid-vapor interface in case of aluminum substrate (a) $T_{hot} = 25^\circ\text{C}$ and (b) $T_{hot} = 75^\circ\text{C}$

고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 표면 온도가 높을수록 시편의 열전도율이 액적의 증발률에 미치는 영향이 증가하였다. 고온 표면의 경우 열전도율이 높은 구리와 알루미늄에 비해 열전도율이 낮은 철은 시편의 온도 구배가 상대적으로 크게 나타났다. 이로 인해 철 시편의 경우 액체-기체 경계면의 온도가 낮게 나타나고 증발률이 감소한다.

(2) 전열면의 온도가 증가할수록 액적의 포화증기압이 증가하고 자연대류에 의한 영향도 증가한다. 액체-기체 경계면을 따라 국부적인 Peclet 수를 비교하여 자연대류에 의한 영향을 판단하였으며, 증발유속이 증가한 지점에서 Peclet 수가 크게 나타나는 것을 확인하였다. 또한, 표면온도가 높을수록 밀도 구배가 증가하여 자연대류가 증발에 미치는 영향이 증가하게 된다.

(3) 고온표면에서는 증기의 확산과 자연대류에 의한 물질 전달을 고려해야한다. 또한, 본 수치해석 결과를 통해 고체 시편의 열적 특성이 액적의 증발에 미치는 영향을 파악하였고, 이러한 결과는 액적 증발에 대한 열/물질 전달 메커니즘을 이해하는데 기여할 수 있다.

후 기

본 연구는 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 (No. NRF-2020R1F1A1072600)의 지원을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

- (1) D. Y. Zang, S. Tarafdar, Y. Y. Tarasevich, M. D. Choudhury, and T. Dutta, "Evaporation of a droplet: from physics to applications", *Phys Rep*, Vol. 804, 2019, pp. 1~56.
- (2) D. Brutin and V. Starov, "Recent advances in droplet wetting and evaporation", *Chem Soc Rev*, Vol. 47, 2018, pp. 558~585.
- (3) R. D. Deegan, O. Bakajin, T. F. Dupont, G. Huber, S. R. Nagel, and T. A. Witten, "Contact line deposits in an evaporating drop", *Phys Rev E*, Vol. 62, 2000, pp. 756~765.
- (4) W. Bou-Zeid and D. Brutin, "Effect of relative humidity on the spreading dynamics of sessile drops of blood", *Colloid Surface A*, Vol. 456, 2014, pp. 273~285.
- (5) J. H. Moon, S. M. Lee, C. K. Choi, and S. H. Lee, "Modeling of the evaporation rate of liquid droplets on anodized heated surfaces", *Int Commun Heat Mass*, Vol. 98, 2018, pp. 209~215.
- (6) B. Sobac and D. Brutin, "Thermal effects of the substrate on water droplet evaporation", *Phys Rev E*, Vol. 86, 2012.
- (7) F. Carle, B. Sobac, and D. Brutin, "Experimental evidence of the atmospheric convective transport contribution to sessile droplet evaporation", *Appl Phys Lett*, Vol. 102, 2013.
- (8) P. L. Kelly-Zion, C. J. Pursell, N. Hasbamrer, B. Cardozo, K. Gaughan, and K. Nickels, "Vapor distribution above an evaporating sessile drop", *Int J Heat Mass Tran*, Vol. 65, 2013, pp. 165~172.
- (9) P. L. Kelly-Zion, C. J. Pursell, S. Vaidya, and J. Batra, "Evaporation of sessile drops under combined diffusion and natural convection", *Colloid Surface A*, Vol. 381, 2011, pp. 31~36.
- (10) G. J. Dunn, S. K. Wilson, B. R. Duffy, S. David, and K. Sefiane, "The strong influence of substrate conductivity on droplet evaporation", *J Fluid Mech*, Vol. 623, 2009, pp. 329~351.
- (11) H. Hu and R. G. Larson, "Evaporation of a sessile droplet on a substrate", *J Phys Chem B*, Vol. 106, 2002, pp. 1334~1344.
- (12) Z. H. Pan, J. A. Weibel, and S. V. Garimella, "Transport mechanisms during water droplet evaporation on heated substrates of different wettability", *Int J Heat Mass Tran*, Vol. 152, 2020.