

나노 구조가 형성된 열전달 표면에서의 임계 열유속 증진 메커니즘

김 동 역^{*†}

* 경북대학교 정밀기계공학과

Critical Heat Flux Enhancement Mechanism on a Surface with Nano-Structures

Dong Eok Kim ^{*†}

* Dept. of Precision Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

(Received March 21, 2014 ; Revised May 21, 2014 ; Accepted May 21, 2014)

Key Words: Critical Heat Flux(임계 열유속), Boiling(비등), Nano-Structures(나노 구조), Vapor Recoil Force(증기 반동력), Surface Adhesion Force(표면 접착력)

초록: 나노 구조가 형성된 열전달 표면에서 유체의 비등 시 임계 열유속 값이 나노 구조가 없는 표면보다 현저히 증가한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 다수의 물리적 메커니즘들이 이러한 나노 구조에서의 임계 열유속 증진 현상을 설명하기 위해 제안되어 왔다. 하지만 지금까지 대부분의 연구들은 정성적인 결과를 제시해 왔으며, 이러한 현상을 일반적으로 설명할 수 있는 이론은 아직 확립되지 않았다. 본 연구에서는 나노 구조가 형성된 표면에서의 임계 열유속 증진에 관한 정량적인 메커니즘을 증기 반동력 및 표면 접착력에 기초하여 제안하고자 한다. 특히, 본 연구에서는 임계 열유속 증진 현상을 표면에 형성된 나노 구조로 인한 액체, 증기, 고체의 삼중선 길이의 증가 및 나노 구조와 액체 사이의 접착력에 근거하여 설명하였다.

Abstract: The critical heat flux (CHF) on a heat transfer surface with nanostructures is known to be significantly better than that on flat surfaces. Several physical mechanisms have been proposed to explain this phenomenon. However, almost all studies conducted so far have been qualitative, and a generalized theory has not yet been established. In this study, we developed a quantitative mechanism for CHF enhancement on a surface with nanostructures, based on vapor recoil and surface adhesion forces. We focused on the increase in the length of the triple contact line owing to the formation of nanostructures and the adhesion force between them and the liquid.

1. 서 론

비등 현상은 전기발전 시스템 및 전자칩 냉각과 같은 고 열유속을 갖는 시스템들에서 열원으로부터 유체로 열을 효율적으로 전달 시킬 수 있는 매력적인 메커니즘이다. 임계 열유속은 이러한 비등 현상의 상한을 제시하는 값이다. 그러므로 임계 열유속 값의 정확한 예측 및 나아가 그 값의 증진은 고효율 비등 시스템의 개발에 본질적인 요소라고 할 수 있다. 임계 열유속은 기본적으로 핵비등 영역에서 막비등 영역으로 천이되는 지점에서 나타난다. 액체에서 증기로의 상변화를 통해 열을

전달하던 열원 표면이 증기로 덮이게 되면 증기의 상대적으로 낮은 열전달 능력으로 인해 열원 표면에서 10 K 에서 100 K 오더의 급격한 온도상승이 수반된다. 이것이 번아웃(Burn-out) 현상이다(Fig. 1).

이러한 임계 열유속 현상에 대한 이론적 설명은 Zuber 의 Kelvin-Helmholtz 불안전성(instability)에 기반을 둔 수력학적(hydrodynamic) 이론에 의해 처음으로 이루어졌다.⁽¹⁾ 이 이론은 열원 표면에서의 활발한 비등 현상 시 상승하는 증기 기둥과 중력에 의해 하강하는 액체 사이의 상대속도 차이에 의해 액체-증기 계면이 깨지는 현상을 임계 열유속 시점으로 정의한다. Liter 와 Kaviany⁽²⁾는 이러한 Zuber 의 이론에 기초하여 히터표면에 변조된 다공성 층(Modulated porous layer)를 코팅함으로써

† Corresponding Author, dekim@knu.ac.kr

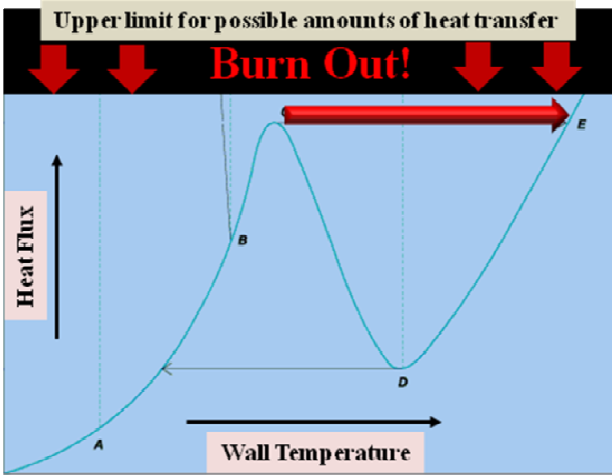


Fig. 1 Boiling curve and burn-out phenomenon description

Kelvin-Helmholtz 불안정성 파장을 기하학적으로 조절하여 임계 열유속의 증진효과를 얻었다. 그러나 이러한 수력학적 이론은 이후에 젖음성(wettability)를 향상시키기 위해 표면 개질을 통해 얻어진 히터 표면에서의 임계 열유속 현상을 예측하는데 본질적인 한계를 가지고 있다. 다수의 연구들이 이러한 히터 표면에서의 젖음성이 임계 열유속에 미치는 영향을 연구하기 위하여 수행되어졌다.^(3~7) 이 중 Kandlikar의 연구⁽⁵⁾에서는, 임계 열유속 현상을 증기 반동력(Vapor recoil force)에 의한 표면에서의 증기 기포의 퍼짐(spreading)현상으로 정의하고, 이에 따른 이론적인 임계 열유속 상관식을 도출하였다. 또한 이 연구에서는 기존의 임계 열유속 데이터와의 비교를 통해 이론 상관식의 타당성을 입증하였다.

사실, 임계 열유속에 대한 증기 반발력 메커니즘은 Nikolayev 등^(8,9)에 의해 최초로 제안되었다. 그들은 액체-증기 계면에서 증발하는 유체 분자들이 계면에 반동력을 유발한다고 제안하였다. 또한 이러한 힘이 로켓 엔진에서 가스가 방출될 때 발생하는 반동력과 유사한 힘이라고 설명하였다.

평판 열원에 의한 수조 비등상황에서 증기 반동력은 기포주위의 액체 방향으로 액체-증기 계면을 밀어내는 힘으로 작용한다[Fig. 2(a)]. 단위 면적당 증기 반동력은 식 (1)과 같이 표현된다.⁽⁸⁾

$$P_r = \eta^2 (\rho_v^{-1} - \rho_l^{-1}) \quad (1)$$

여기서, η 는 단위 면적당 증발 질량, ρ_v 및 ρ_l 은 각각 증기 및 액체의 밀도이다.

임계 열유속 상황에서, 증기 반동력이 계면으로부터의 증발이 가장 활발한 가열 표면 근처에서

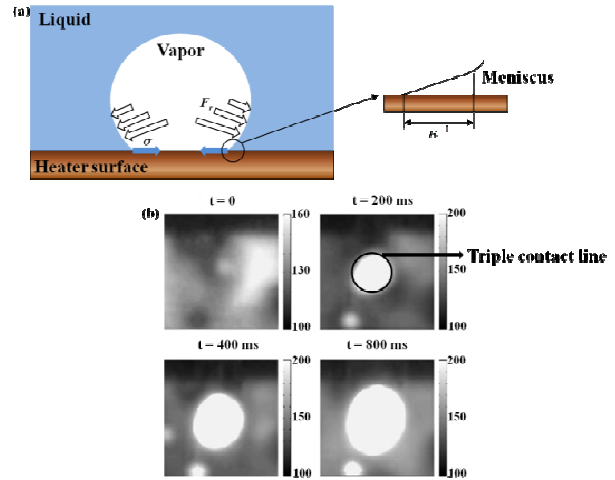


Fig. 2 Vapor spreading mechanism due to the relationship between the vapor recoil and surface adhesion forces. (a) Vapor recoil force (F_r) and surface tension (σ) in an evaporating vapor-liquid interface. (b) Vapor spreading phenomena in a visualization study of the bottom of a boiling heater⁽⁶⁾

최대로 작용한다고 가정하면, 증기 반발력 및 액체-증기 계면과 평판이 접하는 삼중선(Triple line)에서의 표면 접착력을 다음과 같은 식으로 비교할 수 있다.

$$P_r \kappa^{-1} \approx \left(\frac{q^*}{h_{fg}}\right)^2 (\rho_v^{-1} - \rho_l^{-1}) \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \approx const. \times \sigma \quad (2)$$

$$q^* \approx const. \times h_{fg} \rho_v^{0.5} [\sigma g(\rho_l - \rho_v)]^{1/4}$$

여기서, κ^{-1} 은 모세관 길이(capillary length), q^* 은 평판에서의 열유속, h_{fg} 은 증발 잠열, g 는 중력 가속도 그리고 σ 는 액체의 표면장력이다.

흥미롭게도, 식 (2)에서 도출된 열유속(q^*)은 앞서 언급한 Zuber의 수력학적 불안정성 모델⁽¹⁾로부터 도출된 임계 열유속과 유사한 형태로 나타난다.

지금까지 언급한 임계 열유속 상황에서 증기 기포의 퍼짐 현상은 수조비등 현상을 히터 표면 바닥에서 가시화한 Theofanous 등⁽⁶⁾의 연구결과에서 잘 나타나 있다[Fig. 2(b)].

하지만 이러한 증기 기포의 퍼짐 현상을 바탕으로 수립된 Kandlikar의 임계 열유속에 관한 이론적 모델⁽⁵⁾은 최근의 나노 유체 비등에 관한 실험적 연구들^(10,11)에서의 임계 열유속 값을 정확하게 예측하지 못하는 것으로 나타났다. 이 모델은 Fig. 3에 나타나는 나노 구조가 형성된 표면들에서의 임계 열유속 값을 현저히 낮게 예측하였다.

이러한 나노구조가 형성된 열원 표면에서의 임계 열유속 현상을 물리적으로 설명하기 위해 거대

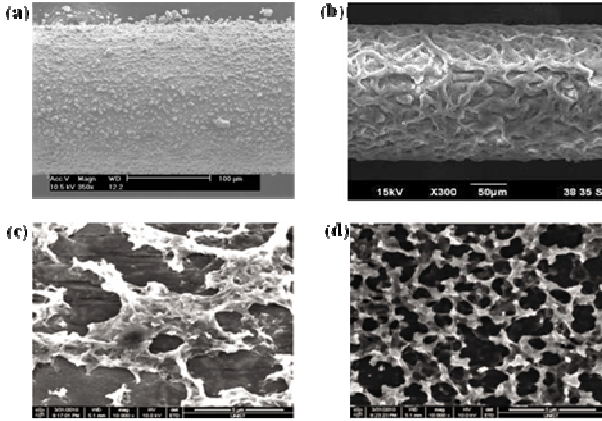


Fig. 3 Scanning electron microscope images of a heater surface coated with nanoparticles. (a) Kim and Kim's TiO₂-coated surface⁽¹³⁾ (b) Kim and Kim's SiO₂-coated surface⁽¹³⁾ (c) Park et al.'s graphene-coated surface⁽¹¹⁾ (d) Park et al.'s graphene oxide-coated surface⁽¹¹⁾

층 고갈 모델(Macrolayer dry-out model),⁽¹²⁾ 열원에서의 열확산 현상,⁽¹¹⁾ 모세관 위킹(capillary wicking) 및 Rayleigh-Taylor 파장의 변화⁽¹¹⁾ 등의 메커니즘들이 여러 연구자들에 의해 제안 되었으나 대부분 정성적인 설명이며, 일반화된 이론으로는 정립되지 않아 왔다.

그리하여 본 연구에서는 증기 반동력 메커니즘에 기초하여 나노 구조가 형성된 열원 표면에서의 임계 열유속 증진 메커니즘을 정량적으로 제안하고자 한다.

2. 모델 개발

모델 개발을 위해 Fig. 4(a)에서와 같이 나노 구조가 형성되어 있는 표면에서 증발하는 구형의 기체-액체 계면을 가정할 수 있다.

임계 열유속 현상을 증기 반동력에 의해 기포가 표면 위에서 퍼지는 시점으로 정의하면, 다음의 식과 같이 Fig. 4(a)에 나타난 구형 대칭 기포 좌측에서의 힘의 평형 방정식을 획득할 수 있다.

$$F_r = F_G + F_{\sigma,l} + F_{\sigma,w} \quad (3)$$

여기서, F_r 은 증기 반동력, F_G 는 기포주위 액체로 인한 수두압력에 의한 힘, $F_{\sigma,w}$ 는 표면에서 액체-기체-고체가 접하는 삼중선에 작용하는 액체의 표면 접착력, 그리고 $F_{\sigma,l}$ 는 구형 계면의 중앙 원주를 따라 액체입자 사이에 작용하는 표면장력이다. 앞서 식 (1)에서 언급했던 바와 같이, 증기 반동력 F_r 은 다음의 식으로 표현할 수 있다.

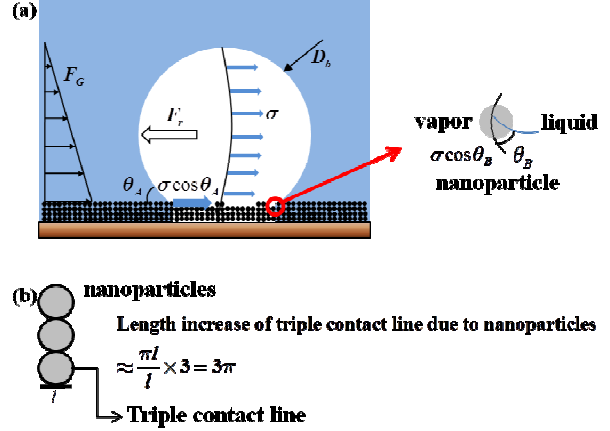


Fig. 4 Schematic diagram of the evaporating interface on nano-structured heater surface. (a) Force components acting on an evaporating vapor bubble (vapor recoil, surface tension, and gravitational forces) (b) An example of the length increase of a triple contact line due to nanoparticles

$$\begin{aligned} F_r &= P_r \times A_{cross} \\ &= \eta^2 (\rho_v^{-1} - \rho_l^{-1}) \times \left(\frac{\pi D_b^2}{4} \times \frac{2\pi - 2\theta_A}{2\pi} + \frac{D_b}{2} \times \frac{D_b}{2} \cos\theta_A \sin\theta_A \right) \\ &= \frac{D_b^2}{4} \left(\frac{q''}{h_{fg}} \right)^2 \left(\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v \rho_l} \right) (\pi - \theta_A + \cos\theta_A \sin\theta_A) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 A_{cross} 는 구형 기포의 중앙을 가로지르는 단면적, D_b 는 기포 직경, 그리고 θ_A 는 표면에 액체가 접촉했을 때 이루는 동적 후진 접촉각(dynamic receding contact angle)이다.

다음으로 기포주위 액체의 수두압력으로 인해 발생하는 힘 F_G 은 표면에서 기포 상단까지의 액체의 높이 중간에서 발생하는 수두 압력이 전체 기포 단면적(A_{cross})에 평균적으로 작용한다고 가정하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_G &= \frac{1}{2} (\rho_l - \rho_g) \times \frac{D_b}{2} (1 + \cos\theta_A) \times A_{cross} \\ &= \frac{D_b^3}{16} (\rho_l - \rho_g) (1 + \cos\theta_A) (\pi - \theta_A + \cos\theta_A \sin\theta_A) \end{aligned} \quad (5)$$

그리고 구형 기포의 계면의 중앙 원주를 따라 액체입자 사이에 작용하는 표면장력 $F_{\sigma,l}$ 은 다음의 식으로 간단히 표현할 수 있다.

$$F_{\sigma,l} = \sigma \times \pi D_b \times (2\pi - 2\theta_A) / 2\pi = \sigma D_b (\pi - \theta_A) \quad (6)$$

다음으로 삼중선에 작용하는 액체의 표면 접착

력 $F_{\sigma,w}$ 를 계산하기 위해서는 액체-기체-고체가 접하는 삼중선의 길이에 대한 정보가 필요하다. 특히 구조가 존재하지 않는 평평한 표면에서 기포 좌측면의 삼중선의 길이(L_p)는 구형 기포의 기하학적 형상 및 접촉각을 이용하여 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$L_p = (\pi D_b \sin \theta_A) / 2 \quad (7)$$

하지만 나노 구조가 형성되어 있는 표면의 경우, 이러한 삼중선의 길이는 현저하게 증가할 수 있다. 예를 들어, Fig. 4b 에서와 같이 3 개의 구형 나노 입자가 표면에 순서대로 적층되어 있고, 이러한 입자에 액체가 접촉할 수 있다면, 결과적으로 삼중선의 길이는 식 (8)의 ΔL_p 만큼 증가할 것이다.

$$\Delta L_p = (\pi D_b \sin \theta_A) / 2 \times \pi \times 3 \quad (8)$$

또한 이러한 나노 구조-액체-증기로 이루어 지는 새로운 삼중선에서 발생하는 표면 접촉력을 계산하기 위해서는 액체와 나노 구조간의 동적 후진 접촉각 θ_B 를 도입해야 한다. 이러한 표면 접촉력은 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{\sigma,w} = \sigma \cos \theta_A \times \frac{\pi D_b \sin \theta_A}{2} + \sigma \cos \theta_B \times \frac{\pi D_b \sin \theta_A}{2} \times R_p \quad (9)$$

$$R_p = \frac{\Delta L_p}{L_p}$$

여기서 R_p 는 나노 구조가 없는 평평한 표면에서의 삼중선 길이에 대한 나노 구조로 인해 증가한 삼중선 길이의 비이다.

식 (4)에서 사용된 열유속 q^* 은 표면에서 기포가 생성된 후 완전히 성장했을 때까지의 액체-증기 계면에 인가되는 평균 열유속으로 정의할 수 있다. Kandlikar⁽⁵⁾의 접근법에 따라, 히터 표면에서 인가되는 열유속을 산출하기 위해 기포의 발생과 성장에 영향을 주는 영역의 직경을 $2\sqrt{2}D_b$, 기포의 평균 직경을 $D_b/2$ 로 근사할 수 있다. 그리하여 히터 표면으로부터 인가되는 열유속 q_s^* 는 다음의 식과 같이 q^* 및 θ_A 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$q_s^* \times \frac{\pi(2\sqrt{2}D_b)^2}{4} = q^* \times \left\{ 2\pi \left(\frac{D_b}{4} \right)^2 + 2\pi \frac{D_b}{4} \times \frac{D_b}{4} \cos \theta_A \right\} \quad (10)$$

$$q_s^* = \frac{1 + \cos \theta_A}{16} q^*$$

그리고 임계 열유속 시점 부근에서 기포의 직경 D_b 는 Zuber 의 연구⁽¹⁾에서 사용되었던 Rayleigh-Taylor 불안정성에서의 임계 파장인 λ_T 를 도입하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_b = \frac{\lambda_T}{2} = \frac{1}{2} \times 2\pi \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} = \pi \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \quad (11)$$

그리하여 식 (4)-(11)을 사용하여 식 (3) 힘의 평형 방정식에서 각 힘의 성분들을 대입하면 최종적으로 다음과 같은 나노 구조가 형성된 열원 표면에서의 임계 열유속에 관한 상관식을 획득할 수 있다.

$$q_{CHF}^* = \frac{1 + \cos \theta_A}{16} \left[\frac{\rho_l \rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right]^{1/2} h_{fg} \left[\frac{\pi(1 + \cos \theta_A)}{4} + \frac{4}{\pi} \frac{\pi - \theta_A + \pi \sin \theta_A (\cos \theta_A + R_p \cos \theta_B) / 2}{\pi - \theta_A + \sin \theta_A \cos \theta_A} \right]^{1/2} \times [\sigma g(\rho_l - \rho_g)]^{1/4} \quad (12)$$

식 (13)는 앞서 언급한 Kandlikar 의 연구⁽⁵⁾에서 개발된 임계 열유속에 관한 상관식을 나타낸다. 식에 볼 수 있는 것처럼 이 상관식은 본 연구에서 개발된 상관식(식 (12))과 달리 삼중접촉선의 길이 왜곡 및 액체와 나노 구조간의 상호관계에 대해서는 고려하지 않고 있다.

$$q_{CHF}^* = h_{fg} \rho_g^{1/2} \left(\frac{1 + \cos \theta_A}{16} \right) \left[\frac{2}{\pi} + \frac{4}{\pi} (1 + \cos \theta_A) \right]^{1/2} \times [\sigma g(\rho_l - \rho_g)]^{1/4} \quad (13)$$

3. 모델의 적용

본 절에서는 식 (12)로 표현된 임계 열유속 모델을 이용하여 기존의 나노 구조가 형성된 표면에서의 임계 열유속 증진 메커니즘에 대해 설명하고자 한다.

Kim 등⁽¹⁵⁾에 의해 제작된 ZnO 나노 기둥이 단층구조로 코팅된 히터 표면에서 R_p 는 근사적으로 $(1030 \text{ nm} \times 2 + 60 \text{ nm}) / 60 \text{ nm} = 35.3$ 으로 계산된다(Fig. 5b). 히터 표면에서의 접촉각 $\theta_A = 10^\circ$ 및 ZnO 표면에서의 접촉각 $\theta_B = 83^\circ$ 을 사용하여 식 (12)를 통해 임계 열유속 값을 계산하면 1910.4 kW/m^2 의 값을 획득할 수 있고, 이 값은 실험값인 2003 kW/m^2 와 유사한 값을 나타내고, 이는 모델의 예측 값이 실험값을 잘 예측하는 결과라고 판단할 수 있다. 또한 본 연구를 통해 개발된 상관식은

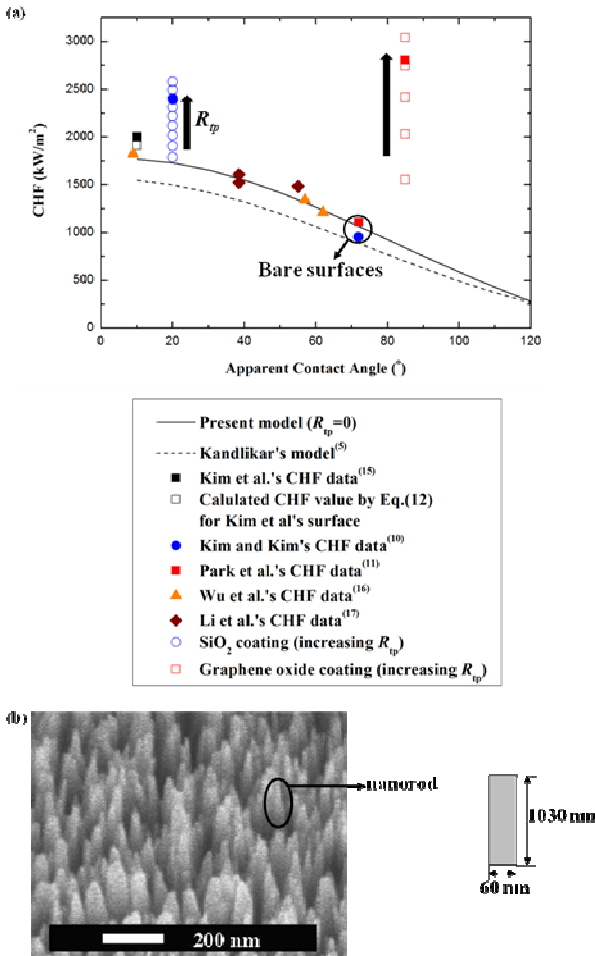


Fig. 5 Comparison between our model, Kandlikar's model⁽⁵⁾ and existing experimental CHF data^(10,11,15-17) (a) Experimental CHF data and predictions of Eq. (12); increasing R_p , the present model predictions give identical CHF values to those of Kim and Kim's⁽¹⁰⁾ SiO₂-coated surface and Park et al.'s⁽¹¹⁾ graphene oxide surface at $R_p = 13$ and 40, respectively. (b) Scanning electron microscope image of Kim et al.'s⁽¹⁵⁾ surface coated with ZnO nanorods and estimation of R_p

Kandlikar⁽⁵⁾에 의해 개발된 상관식[식 (13)]에 비해 Wu 등⁽¹⁶⁾의 구리 표면, TiO₂/SiO₂ 코팅 표면 및 Li 등⁽¹⁷⁾의 구리 나노 기둥 표면의 임계 열유속 데이터를 상대적으로 정확하게 예측하고 있는 것을 볼 수 있다

Kim 과 Kim⁽¹⁰⁾ 및 Park 등⁽¹¹⁾에 의해 제작된 나노 구조 표면에서 실험을 통해 획득된 임계 열유속 값은 Fig. 5(a)에서 확인할 수 있는 것처럼 나노 구조로 인한 삼중선 길이의 증가를 무시했을 때 ($R_p = 0$), 식 (12)의 임계 열유속 예측값 보다 현저히 높다. 하지만 삼중선 길이의 증가 및 나노

입자와 액체 사이의 표면 접촉력을 고려할 경우 이러한 예측 열유속 값은 현저하게 증가할 것이다. Kim 과 Kim⁽¹⁰⁾의 표면에 대해 그들의 연구에서 제공된 접촉각 $\theta_A = 20^\circ$, SiO₂ 표면에서의 접촉각 $\theta_B = 20^\circ$ 및 $R_p = 13$ 을 식 (12)에 적용하면 실험에서 획득된 임계 열유속 값과 동일한 값을 획득할 수 있다[Fig. 5(a)]. 즉, 본 연구에서 개발된 임계 열유속 모델에 따르면 Kim 과 Kim⁽¹⁰⁾의 실험에서 제작된 나노 구조 표면에서의 삼중선의 길이는 평평한 표면에 비해 13 배 증가한 것으로 계산될 수 있다. 그리고 Park 등⁽¹¹⁾의 연구에서 사용된 그래핀 산화물이 코팅되어 있는 표면에 대해 $\theta_A = 85^\circ$ 및 $\theta_B = 62.8^\circ$ ⁽¹⁴⁾를 활용하여 식 (12)를 적용하면 $R_p = 40$ 일 때 실험에서 획득된 임계 열유속 값과 동일한 값을 모델로부터 획득할 수 있다.

Fig. 3(d)에서 볼 수 있는 것처럼 Park 등⁽¹¹⁾에 의해 제작된 그래핀 산화물이 코팅된 표면은 적층된 나노 다공성 구조물로 이루어져 있고, 이러한 나노 구조는 삼중선의 길이를 현저히 증가시킬 수 있다.

지금까지 본 절에서 설명한 내용을 종합하면, 본 연구에서 수행된 증기 반동력 및 표면 접촉력간의 힘의 균형에 기초한 임계 열유속 모델(식 (12))은 나노 구조가 형성된 열원 표면에서의 임계 열유속 증가를 합리적으로 설명할 수 있는 모델이라고 결론 지을 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 나노 구조가 형성되어 있는 표면에서의 임계 열유속 증진 메커니즘에 대해 살펴보았다. 나노 구조가 형성된 표면에서의 임계 열유속 증진에 관한 정량적인 메커니즘을 증기 반동력 및 표면 접촉력에 기초하여 분석하였고, 이를 통해 정량적인 모델을 제안하였다. 특히, 본 연구에서는 임계 열유속 증진 현상을 표면에 형성된 나노 구조로 인한 액체, 증기, 고체의 삼중선 길이의 증가 및 나노 구조와 액체 사이의 접촉력에 근거하여 설명하였다. 이렇게 개발된 모델을 기존의 연구로부터 획득된 실험 데이터와 비교한 결과 이 모델은 나노 구조 표면에서의 임계 열유속 증진 현상을 합리적으로 설명할 수 있는 모델이라는 것을 확인할 수 있었다. 또한 본 모델은 표면 특성 변화에 따른 임계 열유속에 관한 다른 연구자의 기존 모델⁽⁵⁾에 비해 상대적으로 우수한 실험 데이터 예측능력을 나타내는 것을 확인할 수 있었으며 나노 구조 등에

의한 삼중접촉선의 왜곡 및 액체와 표면 구조간의 상호관계를 반영할 수 있다는 점에서 활용 가능성이 높다고 할 수 있다. 차후 본 모델의 더욱 정밀하고 정확한 검증을 위해 나노 구조로 인한 삼중선의 길이 변화를 정량화할 수 있는 나노 구조 또는 나노 다공성 구조를 가진 표면의 제작 및 이를 이용한 임계 열유속 실험이 요구된다. 그리고 본 연구에서 개발된 모델은 대기압 및 작동유체가 물인 조건의 수조 비등실험 데이터와의 비교를 통해 검증 되었으므로, 향후 모델의 실제 적용을 위해서는 압력 및 작동유체에 따른 임계 열유속 실험데이터와의 비교 및 검증이 필수적이다.

참고문헌 (References)

- (1) Zuber, N., 1959, "Hydrodynamic Aspects of Boiling Heat Transfer," *AECU-4439, Physics and Mathematics, US Atomic Energy Commission.*
- (2) Liter, S.G. and Kaviany, M., 2001, "Pool-boiling CHF Enhancement by Modulated Porous-Layer Coating: Theory and Experiment," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 44, pp. 4287~4311.
- (3) Liaw, S. P. and Dhir, V. K., 1986, "Effect of Surface Wettability on Transition Boiling Heat Transfer from a Vertical Surface," *ASME J. Heat Transfer, Proceedings of the 8th International Heat Transfer Conference*, San Francisco, CA., Vol. 4, pp. 2013~2036.
- (4) Ramilison, J.M., Sadasivan, P. and Lienhard, J.H., 1992, "Surface Factors Influencing Burnout on Flat Heaters," *ASME J. Heat Transfer*, 114, pp. 287~290.
- (5) Kandlikar, S.G., 2001, "A Theoretical Model to Predict Pool Boiling CHF Incorporating Effects of Contact Angle and Orientation," *ASME J. Heat Transfer*, 114, pp. 1071~1079.
- (6) Theofanous, T. G., Dinh, T. N., Tu, J. P. and Dinh, A. T., 2002, "The Boiling Crisis Phenomenon: Part II: Dryout Dynamics and Burnout," *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, 26, 793~810.
- (7) Tanaka, Y., Hidaka, S., Cao, J. M., Nakamura, T., Yamamoto, H., Masuda, M. and Ito, T., 2005, "Effect of Surface Wettability on Boiling and Evaporation," *Energy*, 30, pp. 209~220.
- (8) Nikolayev, V. S. and Beysens, D. A., 1999, "Boiling Crisis and Non-Equilibrium Drying Transition," *Europhys. Lett.*, 47, pp. 345~351.
- (9) Nikolayev, V. S., Chatain, D., Garrabos, Y. and Beysens, D., 2006, "Experimental Evidence of the Vapor Recoil Mechanism in the Boiling Crisis," *Phys. Rev. Lett.*, 97, 184503.
- (10) Kim H. D. and Kim, M. H., 2007, "Effect of Nanoparticle Deposition on Capillary Wicking that Influences the Critical Heat Flux in Nanofluids," *Appl. Phys. Lett.*, 91, 014104.
- (11) Park, S. D., Lee, S. W., Kang, S., Bang, I. C., Kim, J. H., Shin, H. S., Lee, D. W. and Lee, D. W., 2010, "Effects of Nanofluids Containing Graphene /Graphene-Oxide Nanosheets on Critical Heat Flux," *Appl. Phys. Lett.*, 97, 023103.
- (12) Kim, S. J., Bang, I. C., Buongiorno, J. and Hu, L. W., 2007, "Surface Wettability Change During Boiling of Nanofluids and Its Effect on Critical Heat Flux," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 50, pp. 4105~4116.
- (13) Kim, H. D., 2007, "An Experimental Study on Pool Boiling CHF Enhancement Using Nanofluids," *Ph. D. Thesis*, POSTECH, Korea.
- (14) Moon, I.K., Lee, J. H., Ruoff, R. S. and Lee, H. Y., 2010, "Reduced Graphene Oxide by Chemical Graphitization," *Nat. Commun.*, 1, 73, doi: 10.1038/ncomms1067.
- (15) Kim, S., Kim, H. D., Kim, H., Ahn, H. S., Jo, H., Kim, J. and Kim, M. H., 2010, "Effects of Nano-Fluid and Surfaces with Nano Structure on the Increase of CHF," *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, 34, pp. 487~495.
- (15) Kim, S., Kim, H. D., Kim, H., Ahn, H. S., Jo, H., Kim, J. and Kim, M. H., 2010, "Effects of Nano-Fluid and Surfaces with Nano Structure on the Increase of CHF," *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, 34, pp. 487~495.
- (16) Wu, W., Bostanci, H., Chow, L. C., Hong, Y., Su, M. and Kizito, J. P., 2010, "Nucleate Boiling Heat Transfer Enhancement for Water and FC-72 on Titanium Oxide and Silicon Oxide Surfaces," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 53, pp. 1773~1777.
- (17) Li, C., Wang, Z., Wang, P., Peles, Y., Koratkar, N. and Peterson, G. P., 2008, "Nanostructured Copper Interfaces for Enhanced Boiling," *Small*, 4, pp. 1084~1088.