

산화 구리표면에서 액적의 막비등에 관한 실험적 연구

김 영 찬[†]

Experimental Study on Film Boiling of Liquid Droplets on Oxidized Copper Surface

Yeung Chan Kim

Key Words: Liquid droplet(액적), Film boiling(막비등), Evaporation(증발), Heat transfer(열전달), Leidenfrost temperature(라이덴프루스트 온도)

Abstract

In the present study, experiments on the film boiling of liquid droplets on oxidized copper surface was conducted. The shape of pure water droplets was observed, and the evaporation rate of them was measured during the film boiling evaporation process. The droplet of initial volume 16~30 μl was applied onto the oxidized copper surface heated up to 300~500°C, then the shape of the droplet was analyzed during the film boiling evaporation. Experimental results showed that there was good correlation between dimensionless volume and dimensionless time. However, a significant difference in evaporation rate for small and large droplets discussed in previous study was not found.

기호설명

A : 접촉면적 [m^2]
C_{pv} : 증기의 비열 [$\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$]
D : 전열면의 직경[m]
f : 수정계수
g : 중력가속도 [m/s^2]
h : 열전달계수 [$\text{W/m}^2^\circ\text{C}$]
k_v : 증기의 열전도계수 [$\text{W/m}^\circ\text{C}$]
T_l : 액체(액적)의 온도 [$^\circ\text{C}$]
T_s : 전열면의 온도 [$^\circ\text{C}$]
t : 증발시간 [sec]
t* : 무차원 증발시간
V : 액적의 부피 [m^3]

V* : 액적의 무차원 부피
V_i : 액적의 초기부피 [m^3]
V_i* : 액적의 무차원 초기부피
 σ : 액체의 표면장력 [N/m]
 ΔT : 온도차이(= T_s - T_l) [$^\circ\text{C}$]
 θ_s : 액적의 접촉각 [$^\circ$]
 λ : 액체의 증발잠열 [kJ/kg]
 λ^* : 액체의 수정 증발잠열
 μ_v : 증기의 점성계수 [N/m]
 ρ_l : 액체의 밀도 [kg/m^3]
 ρ_v : 증기의 밀도 [kg/m^3]

1. 서 론

액체의 포화온도 이상으로 가열된 물체와 액체가 접촉할 때 비등(boiling)현상이 발생한다. 또한 비등현상은 표면의 온도가 증가함에 따라 핵비등(nucleate boiling), 천이비등(transition boiling), 막비등(film boiling)이 차

(Received: 3 Mar 2020, Received in revised form: 21 Apr 2020, Accepted: 22 Apr 2020)

[†]책임저자, 회원, 안동대학교 기계자동차공학과
E-mail : yeung@anu.ac.kr
TEL : (054)820-6013 FAX : (054)820-5092

례로 나타나게 되며, 핵비등영역과 천이영역의 경계에 임계열유속(critical heat flux, CHF), 천이영역과 막비등 영역의 경계에 최소열유속(minimum heat flux, MHF)이 존재하는 것이 Nukiyama⁽¹⁾의 연구에 의해 밝혀졌다. 특히 막비등은 액체와 전열면 사이에 얇은 증기막을 통해 열전달이 발생하는 현상이며, 고온의 물체를 냉각하는 산업현장에서 흔히 관찰할 수 있는 학문적으로 매우 중요한 현상이다. Nukiyama의 연구 이후에 Bromly⁽²⁾, Berenson⁽³⁾, Klimenko⁽⁴⁾ 등은 다양한 조건에서 액체의 막비등 열전달을 예측할 수 있는 상관식을 보고하였다.

액체를 미립화(atomization)하여 고온의 물체에 접촉할 경우에 있어서도 이와 유사한 현상이 발생한다. 액적(droplet)이 고온의 물체와 접촉할 경우 액체와 마찬가지로 액적과 물체 사이에 증기막이 형성되고 이 증기막을 통해 열전달이 발생하는데, 이러한 현상을 Leidenfrost 현상이라고 정의하기도 한다. 이 현상은 금속재료의 분무 냉각, 연료분사장치 뿐만 아니라 극저온 유체를 사용하는 다양한 산업분야에서 중요성이 강조되어 오래전부터 많은 연구가 이루어져 왔다^(5,7). Gottfried 등⁽⁸⁾은 물, 에탄올, 벤젠 등 다양한 액체를 사용하여 액적의 Leidenfrost 온도 및 증발시간에 대한 연구를 수행하였다. 또한 Baumeister 등^(9,10)은 증발과정에 있는 액적의 형상과 막비등 열전달에 관한 이론분석을 통하여 액적의 증발시간을 예측하고 실험을 통하여 검증하였다. 이후에도 Chandra 등⁽¹¹⁾은 액체질소를 이용하여 액적의 증발시간을 실험적으로 측정하여 Baumeister 연구결과와 비교하여 비교적 잘 일치하고 있음을 보고하였다. 그러나 액체의 종류와 크기, 전열면의 표면상태 등과 같이 액적의 막비등 열전달에 영향을 미치는 요소가 증발과정에 있어서 액적의 형상과 열전달계수를 정확히 예측하기에는 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 산화된 구리 표면에서 액적의 막비등에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 액체는 순수 물을 사용하였으며, 액적의 초기부피는 약 16~30 μl , 표면온도는 약 300~500°C의 범위에서 실험을 수행하였다. 액적의 막비등 증발과정을 카메라로 촬영하여 증발과정에 있어서 액적의 부피, 접촉직경(base diameter), 높이 등을 측정하고 이 값을 이용하여 액적의 평균적인 증발속도를 산출하였다. 또한 이 결과를 기존의 연구결과⁽⁹⁾와 비교하고 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

Figure 1에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 실험장치 및 방법은 선행연구⁽¹²⁾와 동일하므로 간략히 설명하

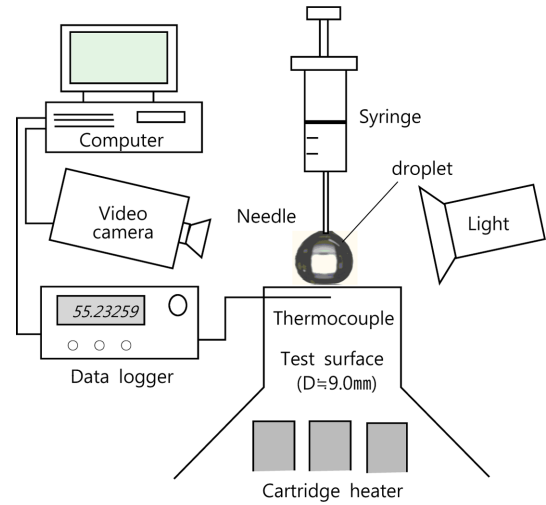


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

기로 한다. 전열면은 직경이 약 9 mm인 원통형 구리로 제작하였다. 전열면 후면의 구리블록에는 용량이 220W인 카트리지 히터를 9개 장착하여 전열면의 온도를 300~500°C의 범위에서 조절하였다. 전열면의 표면으로부터 약 1.0 mm 아래에 직경이 0.5 mm인 K Type 열전대를 설치하였으며, 전열면의 온도는 이 지점에서 측정된 온도와 열전도 방정식을 이용하여 계산하였다. 전열면은 #2000 샌드페이퍼로 연마하여 실험에 이용하였으나, 전열면이 높은 온도로 가열됨에 따라 구리 특유의 광택이 없어지고 표면에서 산화가 발생하여 점차 검게 변하는 것을 확인하였다. #2000 샌드페이퍼로 연마한 전열면의 평균 표면조도와 접촉각은 각각 $R_a = 0.23 \mu\text{m}$, $\theta_s = 81^\circ$ 정도로 측정되었으며, 높은 온도로 가열 후에 전열면의 표면조도는 거의 변화가 없고 산화층의 영향으로 접촉각 $\theta_s = 75^\circ$ 로 약간 작아지는 경향이 있음을 선행연구로부터 알 수 있었다.⁽¹³⁾ 본 연구에서는 이와 같이 고온으로 가열되는 과정에 있어서 자연스럽게 형성되는 산화구리 표면에서 액적의 막비등 현상에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 선행연구와 마찬가지로 액적의 형상분석을 위해 독일 Krüss사의 분석장비(DSA100)를 활용하였다. 실험은 우선 전열면의 카트리지히터의 전원을 조절하여 표면온도를 일정하게 유지시킨 후, 전열면에 약 16~30 μl 의 순수 물 액적을 공급하고 증발과정을 촬영하였다. 그리고 기록된 영상을 분석하여 액적의 부피, 접촉직경, 높이 등을 산출하는 방법으로 진행하였다. 그리고 이 측정결과를 이용하여 액적의 증발속도를 계산하였다. 실험이 수행되는 동안에 초음파 가습기를 이용하여 실험실의 상대습도를 일

정하게 유지하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Figure 2에는 온도가 약 300°C인 전열면에서 막비등 현상이 발생하고 있는 대표적인 액적의 형상을 나타내었다. 그림으로부터 액적과 전열면 사이에 얇은 증기막이 형성되어 있고 열전달은 이 증기막을 통하여 발생하고 있음을 분명히 알 수 있다. 또한 액적은 회전 타원체(spheroid) 형상을 유지하고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 3에는 초기부피가 23.9 μl 인 액적이 300°C 표면온도에서 증발하고 있는 과정을 촬영하여 12초 간격으로 나타내었다. 위에서 언급한 바와 같이 액적이 막비등으로 인해 증발하는 동안 액적의 부피, 접촉직경, 높이를 측정하여 나타내었다. Fig. 3으로부터 액적의 부피가 비교적 큰 경우에는 액적이 회전타원체 형상을 유지하고 있으나, 액적의 부피가 작아질수록 구형(sphere)에 가까워지는 것을 알 수 있다. 본 실험에서는 액적의 부피가 작아질수록 니들(needle)에 영향을 크게 받아 측정오차가 커질 우려가 있으므로 액적의 부피가 약 4~5 μl 이하에서 측정을 중단하였다.

Figure 4에는 초기부피가 16~30 μl 액적을 대상으로 액적의 부피변화를 측정하여 나타내었다. 또한 Fig. 4에는 전열면의 표면 온도를 각각 300°C, 400°C, 500°C로 변화시켜 실험한 결과를 (a), (b), (c)에 각각 나타내었다. Fig. 4(a)에서 알 수 있듯이 액적의 초기 부피가 작을수록 액적의 증발시간이 감소하고 있음을 알 수 있다. 300°C 표면온도에서 액적의 부피가 28 μl 에서 4 μl 까지 감소하는데 걸리는 시간은 약 60초 정도로 측정되었으며, 액적의 부피가 20 μl 에서 4 μl 까지 감소하는데 걸리는 시간은 약 49초 정도로 측정되었다. 이와 같은 단순한 방법으로 실험결과를 모두 계산하여 각 표면온도에서 평균값을 산출한 결과, $T_s \approx 300^\circ\text{C}$ 에서는 0.362 $\mu\text{l}/$

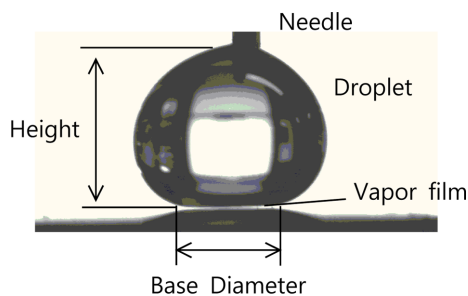


Fig. 2 Photography of water droplet shape

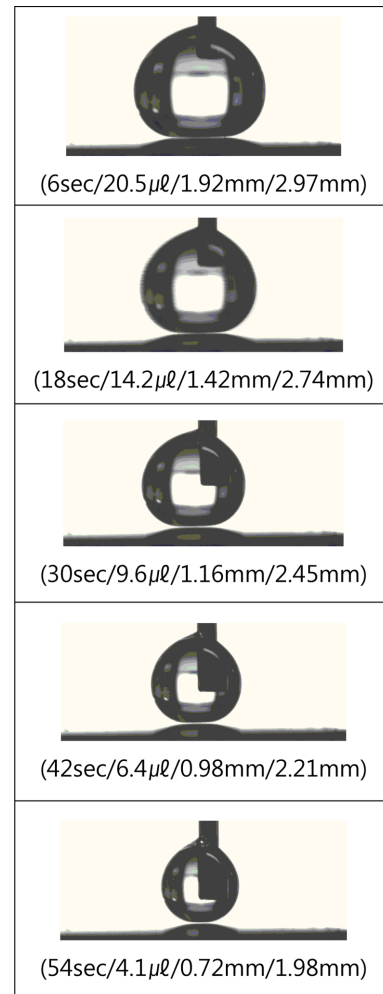


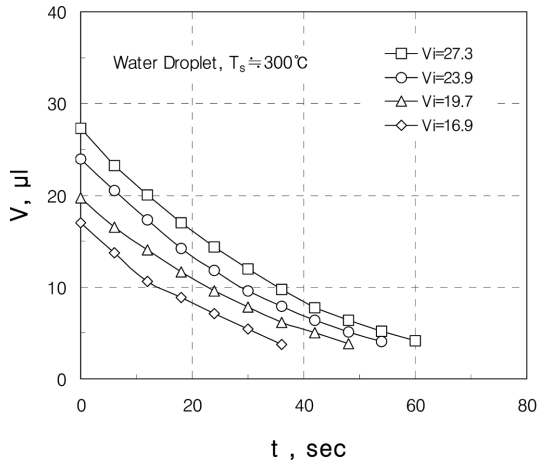
Fig. 3 Time history of water droplet shapes. $V_i \approx 23.9 \mu\text{l}$, $T_s \approx 300^\circ\text{C}$ (Time/Volume/Base Dia./Height)

sec, $T_s \approx 400^\circ\text{C}$ 에서는 0.472 $\mu\text{l}/\text{sec}$, $T_s \approx 500^\circ\text{C}$ 에서는 0.649 $\mu\text{l}/\text{sec}$ 의 증발속도(evaporation rate)를 나타내고 있는 것을 알 수 있었다.

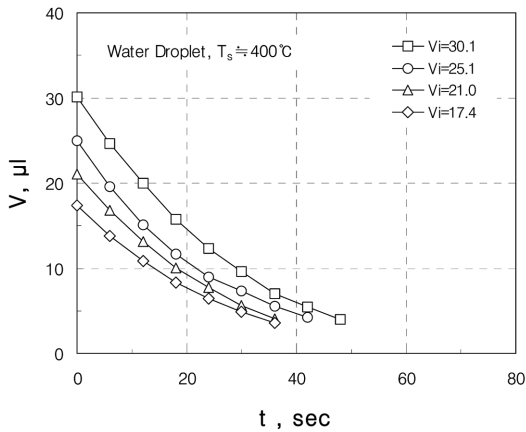
Figure 5에는 액적의 초기부피가 비슷한 경우의 실험 결과를 각기 다른 표면온도에 대하여 나타내었다. 위에서 언급한 바와 같이 표면온도가 증가할수록 액적이 빠르게 증발하고 있음을 분명히 알 수 있다.

Figure 6에는 Fig. 4에 나타난 실험결과를 액적의 무차원 체적과 무차원 증발시간에 대하여 나타내었다. 무차원 부피와 무차원 증발시간은 다음과 같이 정의한다.

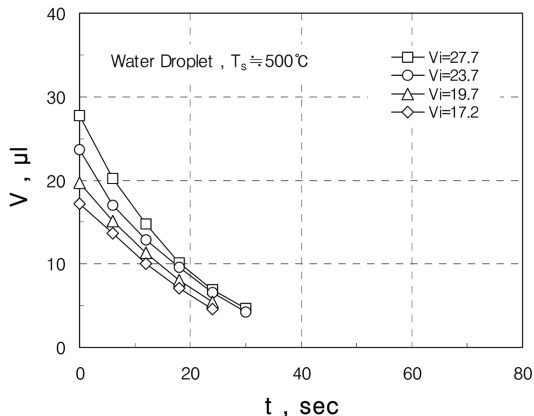
$$V^* = V / \left(\frac{\sigma}{\rho g} \right)^{3/2} \quad (1)$$



(a) $T_s \approx 300^\circ\text{C}$



(b) $T_s \approx 400^\circ\text{C}$



(c) $T_s \approx 500^\circ\text{C}$

Fig. 4 Variations of water droplet volume for different initial volume, $V_i \approx 16 \sim 30 \text{ ml}$

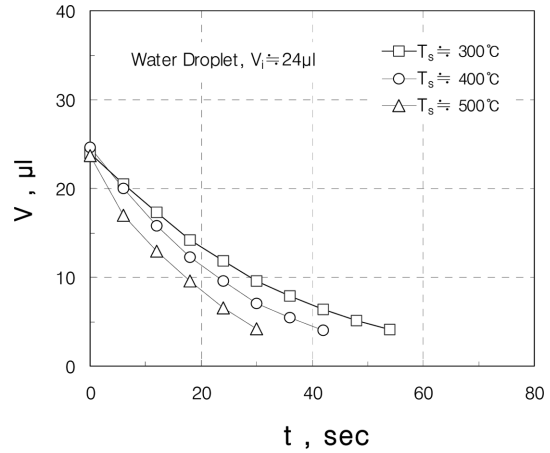


Fig. 5 Variations of water droplet volume for different surface temperature, $T_s \approx 300 \sim 500^\circ\text{C}$

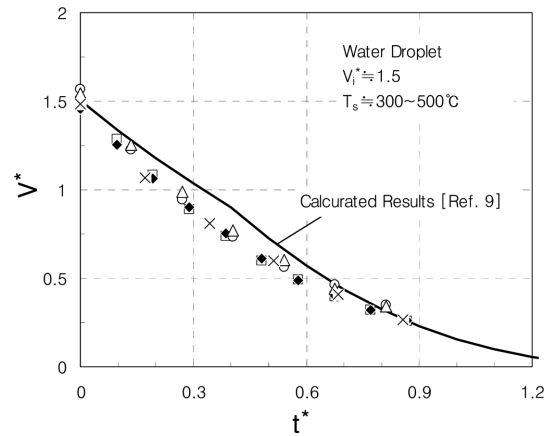


Fig. 6 Correlation between V^* and t^*

$$t^* = t/f \left(\frac{\rho_l^{1/2} \mu_v \lambda^4 \sigma^{5/2}}{k_v^3 g^{7/2} \lambda^* \rho_v \Delta T^3} \right)^{1/4} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 이용하여 무차원 부피와 증발시간을 계산함에 있어서 액체는 물의 포화온도에서 물성값 (property)를 이용하였으며, 증기는 증기온도, $T_v = (T_l + T_s)/2$ 에서의 물성값을 이용하였다. Fig. 6에는 본 실험 결과 이외에도 Baumeister의 상관식⁽⁹⁾을 이용하여 액적의 증발속도를 계산한 결과를 실선으로 나타내어 본 실험결과와 비교하였다. 액적이 증발하는 동안 에너지 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda \rho \frac{dV}{dT} = hA\Delta T \quad (3)$$

Baumeister 등은 이론해석을 통하여 얻은 막비등 열

전달계수 h 와 접촉면적 A 를 식 (3)에 대입하여 적분하고, 식 (1)과 (2)에 나타난 무차원수를 도입함으로써 아래의 상관식을 얻을 수 있었다.

$$V^{*1/3} = V_i^{*1/3} - 0.448t^* \text{ for } V^* \geq 0.8 \quad (4)$$

$$V^{*5/12} = V_i^{*5/12} - 0.826t^* \text{ for } V^* < 0.8 \quad (5)$$

단, 위 식을 이용하여 계산을 수행함에 있어서 무차원 초기부피 V_i^* 를 1.5로 설정하였다. Fig. 6으로부터 본 실험결과는 식 (1)과 (2)에 나타난 무차원 부피와 무차원 증발시간을 이용하여 잘 정리할 수 있음을 알 수 있다. Baumeister 등⁽⁹⁾은 액적의 크기를 $V^* = 0.8$ 을 기준으로 큰 액적(large droplet)과 작은 액적(small droplet)으로 구분하여 이론해석을 수행하여 식 (4)와 (5)를 얻을 수 있었으나, 본 실험결과에서는 이에 대한 명확한 구분을 확인할 수 없었다. 또한 Fig. 6으로부터 $V^* = 1.5 \sim 0.5$ 구간에서 액적의 막비등 증발속도가 상관식을 이용하여 계산한 결과보다 약간 빠르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 본 실험에서 얻은 액적의 증발속도가 기존의 상관식을 이용한 계산결과보다 약간 빠른 것은 구리표면에 형성된 산화막이 영향을 미쳤을 것으로 추측되지만 이에 대한 명확한 결론을 내리기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 전열면을 가열하는 과정에서 자연스럽게 산화된 구리표면에서 액적의 막비등에 대한 연구를 수행하였다. 액체는 순수 물을 사용하였으며, 액적의 초기부피는 $16 \sim 30 \mu\text{l}$, 표면온도는 $300 \sim 500^\circ\text{C}$ 의 범위에서 설정하여 실험을 수행하였다. 액적의 막비등 증발과정을 카메라로 촬영하여 증발과정에 있어서 액적의 부피, 그림 설명에서 접촉직경, 높이 등을 측정하고 이 값을 이용하여 액적의 평균적인 증발속도를 산출하였다. 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 본 실험결과는 무차원 부피와 무차원 증발시간을 이용하여 잘 정리할 수 있음을 알 수 있었다. 다만, 기존의 연구에서 논의된 큰 액적과 작은 액적의 증발속도 차이에 대한 명확한 구분은 확인할 수 없었다. 본 실험에서는 초기구간에서 액적의 증발속도가 상관식을 이용하여 계산한 결과보다 약간 빠르게 나타나고 있는 경향이 있으며, 이는 구리표면에 형성된 산화막의 영향으로 추측된다.

후 기

이 논문은 2019년도 안동대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) S. Nukiyama, "The Maximum and Minimum Values of Heat Transmitted from Metal to Boiling Water Under Atmosphere Pressure", J. of Japan Society of Mech. Eng., Vol. 37, 1934, pp. 367~374.
- (2) L. A. Bromly, "Heat Transfer in Stable Film Boiling", Chemical Engineering Progress, Vol. 46, 1950, pp. 221~227.
- (3) P. J. Berenson, "Film Boiling Heat Transfer from a Horizontal Surface", ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 83, 1961, pp. 351~358.
- (4) V. V. Klimenko, "Film boiling on horizontal plate-new correlation", Int. J. Heat & Mass Transfer, Vol. 24, 1981, pp. 69~79.
- (5) H. Ohkubo and S. Nishio, "Study on Mist Cooling for Heat Treatment of Metals", J. of Materials Processing & Manufacturing Science, Vol. 2, 1993, pp. 14~27.
- (6) D. B. Spalding, "The Combustion of Liquid Fuels", Fourth Symposium on Combustion, 1953, pp. 847~864.
- (7) G. Aguilar, G. Wang and J. S. Nelson, "Dynamic Behavior of Cryogen Spray Cooling: Effects of Spurt Duration and Spray Distance", Lasers in Surgery and Medicine, Vol. 32, 2003, pp. 152~159.
- (8) B. S. Gottfried, C. J. Lee and K. J. Bell, "Leidenfrost Phenomenon: Film Boiling of Liquid Droplets on a Flat Plate", Int. J. of Heat & Mass Transfer, Vol. 9, 1966, pp. 1167~1187.
- (9) K. J. Baumeister, T. D. Hamill and G. J. Schoessow, "A Generalized Correlation of Vaporization Times of Drops in Film Boiling on a Flat Surface", Proceedings of the 3rd Int. Heat Transfer Conference. Vol. 6, 1966, pp. 66~73.
- (10) K. J. Baumeister and F. F. Simon, "Leidenfrost Temperature - Its Correlation of Liquid Metals, Cryogenes, Hydrocarbons and Water", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 95, 1973, pp. 166~173.
- (11) S. Chandra and S. D. Aziz, "Leidenfrost Evaporation of Liquid Nitrogen Droplets", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 116, 1973, pp. 999~1006.

(12) Y.C. Kim, "Experimental Study on Evaporative Heat Transfer of Single Droplet on Heated Surface", J. of ILASS-Korea, vol. 19-1, 2014, 15-18.

(13) Y.C. Kim, "Effect of surface Roughness on Contact Angle of Nanofluid Droplet", Trans. of the KSME(B), Vol. 37-6, 2013, pp. 559~566.