

산화구리-순수 물 나노유체 액적의 막비등에 관한 실험적 연구

김영찬[†]

Experimental Study on Film Boiling of CuO-Water Nanofluid Droplets

Yeung Chan Kim

Key Words: Nanofluid(나노유체), Droplet(액적), Film boiling(막비등), Heat transfer(열전달), Leidenfrost(라이덴프로스트)

Abstract

An experimental study was conducted on the film boiling of nanofluid droplets at a surface temperature range of 300 to 500°C. The nanofluid was made by mixing pure water with copper oxide powder of diameter of 80 nm. The initial volume of the nanofluid droplet ranged from about 21 to 44 μl , and the volume, base diameter, and time were measured during the evaporation process. It was found that nanofluid droplets evaporate faster as the surface temperature increases. Also experimental results showed the droplets evaporate quickly at the beginning of evaporation, but as the volume of the droplets decreases, the evaporation rate gradually slows down, and this trend becomes stronger as the surface temperature increases. In addition, the evaporation rate of nanofluid droplets was slightly faster than that of pure water droplets, this was believed to be because the contact area of nanofluid droplets increased.

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 [$\text{W/m}^\circ\text{C}$]

L_e : 액적의 형상계수

R_a : 전열면의 표면조도 [μm]

T_l : 액적의 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]

(Received: 11 Jul 2024, Received in revised form: 20 Aug 2024, Accepted: 25 Aug 2024)

[†]책임저자, 안동대학교 스마트모빌리티공학과

E-mail : yeung@anu.ac.kr

TEL : (054)820-6013 FAX : (054)820-5092

1. 서 론

액체와 나노사이즈의 금속 또는 비금속 입자를 혼합한 물질을 나노유체(nanofluid)라고 정의한다. 따라서

나노유체는 첨가하는 나노입자의 종류에 따라 액체의 열물성이 크게 변하는 특징이 있다. 예를 들면 열전도성이 우수한 구리 나노입자를 액체와 혼합할 경우 혼합액체의 열전도성도 향상되며, 이를 MEMS(Micro-Electric Mechanical System), 디스플레이, 광학장치, 전기자동차 등의 열관리 시스템에 효과적으로 활용할 수 있다. Choi et al.⁽¹⁻³⁾은 일련의 연구를 통하여 나노입자 금속을 첨가한 액체의 열전도계수가 순수한 액체의 열전도계수보다 크게 향상되는 사실을 보고하였다. 이후에도 다양한 금속 입자를 첨가한 나노유체에 대한 많은 연구가 진행되어 다양한 산업분야에 활용할 수 있게 되었다. 본 논문의 저자는 선행연구^(4,5)에서 나노유체 액적의 증발과정에 있어서 액적의 접촉각, 부피 등을 관찰하였다. 그 결과 나노유체 액적이 동일한 조건의 순수 물보다 빠르게 증발하였으며, 이는 나노유체의 열전도계수, 접촉각 등과 같은 요인들이 증발에 영향을 미치기 때문인 것으로 파악되었다. Lee 등⁽⁶⁾은 ZnO 나노입자의 크기와 농도를 변화시켜 액적의 증발실험을 수행하여 나노입자의 크기가 작을수록 나노유체 액적의 증발 열전달 성능이 향상됨을 입증할 수 있었다. 이외에도 나노유체를 이용한 분무냉각(spray cooling) 연구^(7,8)를 통하여 비등영역에서 나노유체의 분무냉각 열전달 촉진효과를 파악할 수 있었다. 본 연구에서는 비교적 낮은 표면온도에서 나노유체 액적의 증발을 다룬 선행연구와는 다르게 전열면 표면의 온도를 300~500°C로 설정하여 실험을 수행하였다. 이 온도영역에서 액적과 전열면은 얇은 증기막을 통해 열전달이 이루어지는 막비등(film boiling), 또는 라이덴프로스(Leidenfrost) 현상이 발생한다. 이 현상은 철강재료의 제조 및 생산, 가스터빈 등의 연료분사장치 뿐만 아니라 극저온 유체를 사용하는 산업분야에서 매우 중요하다. 따라서 오래전부터 Gottfried 등⁽⁹⁾, Baumeister 등^(10,11), Chandra 등⁽¹²⁾에 의해 활발히 연구가 이루어져 왔다. 그러나 액적의 종류와 크기, 전열면의 표면상태 등과 같이 막비등에 영향을 미치는 요소가 많아 증발과정을 정확히 예측하기에는 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 나노유체 액적의 막비등 증발과정을 카메라로 촬영하여 증발과정에 있어서 액적의 부피, 접촉면 베이스직경(base diameter), 시간 등을 측정하고 이 값을 이용하여 액적의 증발속도를 산출하였다. 또한 이 결과를 기존의 순수 물을 이용한 연구결과⁽¹³⁾와 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

Figure 1에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 나노유체 액적의 증발과정에 있어서 부피, 베이스직경과 같은 액적의 형상은 독일 Krüss사의 액적형상 분석장치(DSA100)를 활용하여 측정하였다. 일정 부피의 액적을 전열면에 공급하는 주입장치(syringe)와 액적의 영상을 촬영하는 비디오카메라, 그리고 기록된 액적의 부피, 베이스직경 등의 형상을 분석하는 소프트웨어로 구성되어 있다. 본 연구에서는 순수 물에 평균직경 80 nm 크기의 산화구리(CuO) 분말을 부피농도 0.1%로 혼합하여 제조한 나노유체를 실험에 활용하였다. 나노유체는 실험직전에 초음파 진동에 의해 나노입자들을 안정적으로 분산시킨 후 사용하였다. 전열면(heat transfer surface)은 원통형 구리블록을 가공하여 제작하였다. 전열면은 직경이 약 9 mm로 가공하였으며, 전열면의 후면은 용량이 220W인 카트리지 히터를 9개 장착하여 온도를 조절할 수 있다. 전열면으로부터 약 1.0 mm 아래에 직경이 0.5 mm인 K Type 열전대(sensor-tech.)를 장착하였으며, 이 열전대를 이용하여 측정된 온도값을 열전도 방정식에 대입하여 표면온도를 계산하였다. 실험 직전에 #2000 샌드페이퍼로 전열면을 연마하였으나, 높은 온도로 가열됨에 따라 구리 특유의 광택이 없어지고 전열면에서 산화가 발생하여 점차 검게 변하는 것을 확인하였다. 실온에서 #2000 샌드페이퍼로 연마한 전열면의 평균 표면조도와 접촉각은 각각 $R_a = 0.23 \mu\text{m}$, $\theta_s = 81^\circ$ 정도로 측정되었다. 높은 온도로 가열 후에 전열면의 조도

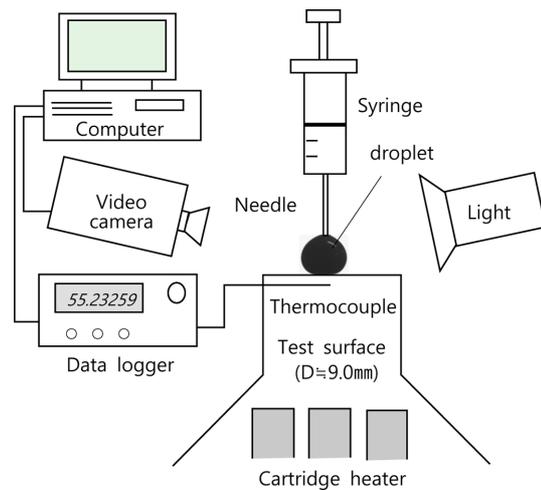


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

는 거의 변화가 없고 산화층의 영향으로 접촉각은 약간 작아지는 경향이 있음을 선행연구⁽⁴⁾로부터 알 수 있었다. 본 연구에서는 이와 같이 자연스럽게 형성되는 산화구리 표면에서 액적의 막비등 현상에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 실험은 우선 전열면의 온도를 일정하게 유지시킨 후, 초기온도 약 26°C, 초기부피 약 21~44 μl 의 나노유체 액적을 전열면에 공급하고 증발과정을 촬영하였다. 그리고 기록된 영상을 분석하여 액적의 부피, 베이스직경, 증발시간 등을 산출하는 방법으로 진행하였다. 또한 실험이 진행되는 동안에 초음파가습기를 이용하여 실험실의 상대습도를 일정하게 유지하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Figure 2에는 전열면의 온도가 400°C이고 초기부피가 약 44.1 μl 에서 조건에서 증발하는 액적의 부피 및 베이스직경의 변화를 12초 간격으로 나타내었다. 베이스직

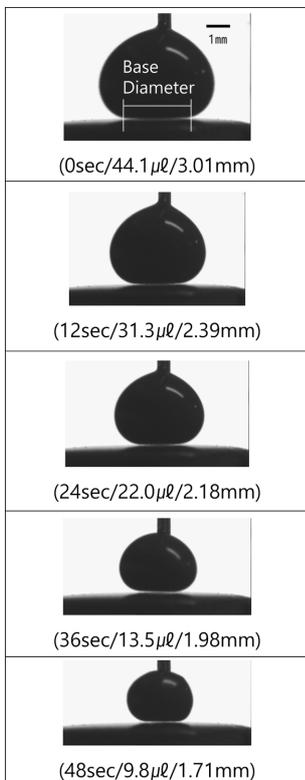


Fig. 2 Time history of nanofluid droplet shapes. $V_i = 44.1 \mu\text{l}$, $T_s = 400^\circ\text{C}$ (Time/Volume/Base Diameter)

경은 액적과 전열면이 얇은 증기막을 통하여 열전달이 이루어지는 영역의 직경을 의미한다. 그림으로부터 나노유체 액적과 전열면 사이에 얇은 증기막이 형성되어 있고, 초기 액적은 회전타원체(spheroid) 형상을 유지하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 막비등 상태에서는 증기막의 형성으로 인해 액적이 전열면에 고정되지 않고 자유롭게 이동하기 때문에 촬영을 통하여 액적의 형상 분석이 어렵게 된다. 따라서 본 실험에서는 증발과정동안 액적이 일정한 위치에 고정될 수 있도록 액체 주입용 니들(middle)에 지지된 상태에서 촬영하였다. 따라서 증발이 진행되어 액적의 부피가 작아질수록 니들의 존재가 액적의 형상에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 이러한 상황을 고려하여 액적의 부피가 약 8 μl 이하에서는 측정을 중단하였다.

Figure 3에는 초기부피가 약 42 μl 액적을 대상으로 전열면의 온도가 각각 300°C, 500°C인 경우의 실험결과를 나타내어 비교하였다. 그림으로부터 부피가 큰 초기 상태에서는 액적이 전형적인 회전타원체를 유지하고 있으나, 증발이 진행되어 부피가 작아질수록 나노유체 내부의 나노입자의 영향으로 인해 불규칙적인 형상을 유지하고 있다. Fig. 3의 실험결과로부터 액체와 전열면이 직접 접촉하지 않는 막비등에서도 전열면의 온도가 높을수록 나노유체 액적의 증발이 빠르게 발생하고 있음을 알 수 있다.

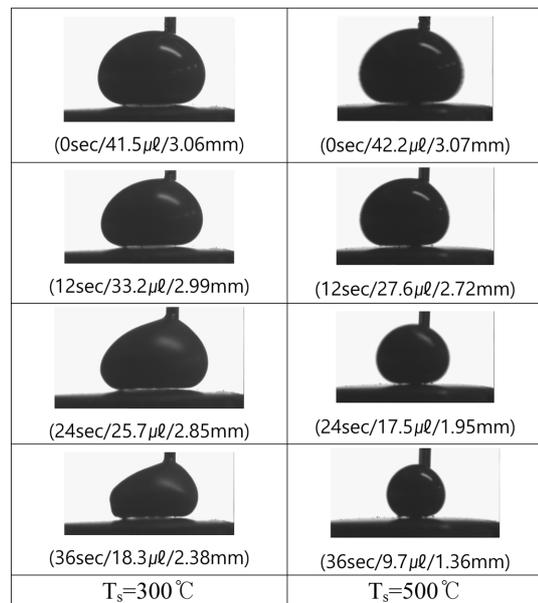


Fig. 3 Time history of nanofluid droplet shapes. $V_i = 41.5 \sim 42.2 \mu\text{l}$, $T_s = 300^\circ\text{C}$ and $T_s = 500^\circ\text{C}$

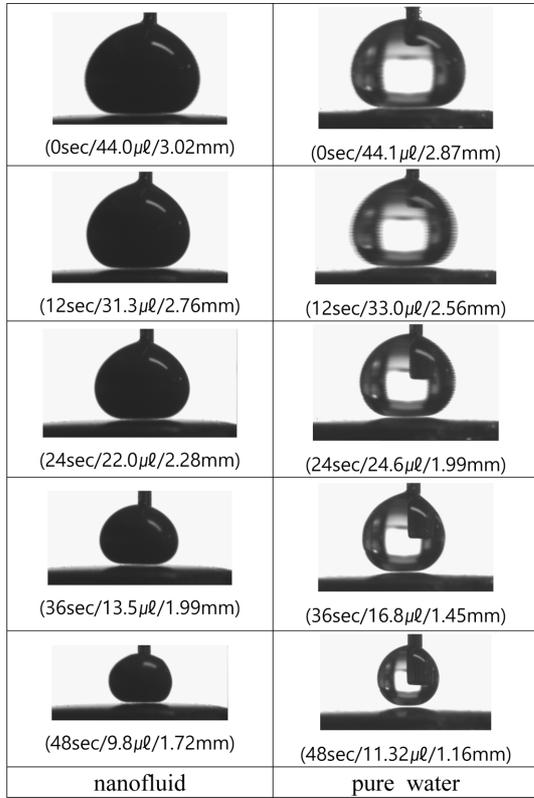
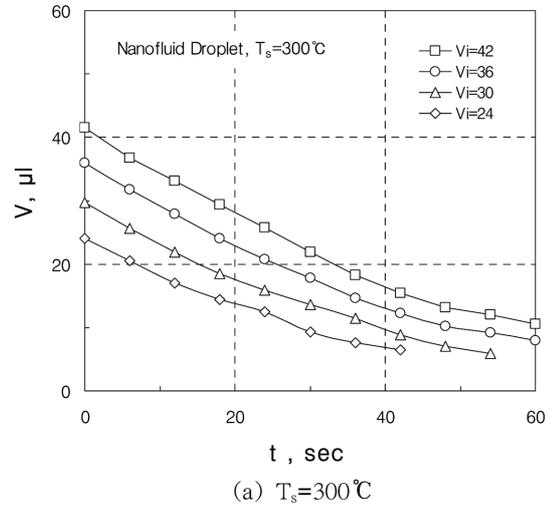


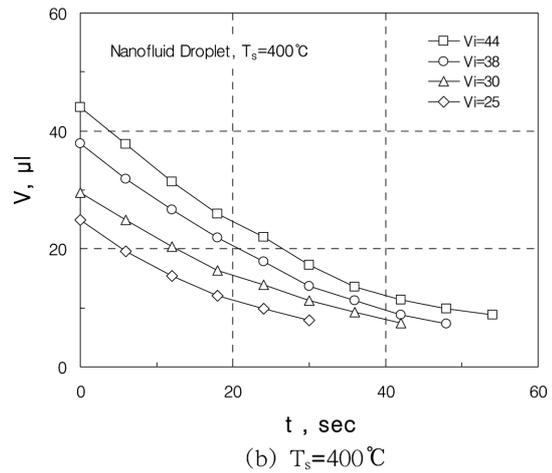
Fig. 4 Time history of nanofluid and pure water droplet shapes. $V_i = 44 \mu\text{l}$, $T_s = 400^\circ\text{C}$

Figure 4에는 초기부피가 동일한 나노유체 액적과 순수 물 액적의 증발과정을 비교하여 나타내었다. 단, 순수물 액적은 선행연구결과⁽¹³⁾를 나타내었다. 비교결과로부터 나노유체 액적의 증발속도가 약간 빠른 것으로 나타났다. 또한 전열면과 액적이 접촉하는 베이스직경이 나노유체 액적의 경우가 약간 증가하는 경향이 있음을 알 수 있다. 나노유체 액적의 베이스직경이 순수 물 액적보다 증가하는 것은 나노유체 액적의 표면장력, 접촉각과 같은 표면에너지에 기인하는 것으로 판단된다. 일반적으로 나노유체의 경우는 액체와 주변 기체 이외에도 유체에 포함된 입자와의 경계면을 형성하는데 에너지가 소모되기 때문에 액체 자체의 응집력이 감소하여 표면장력 또는 접촉각이 감소하게 되고, 이는 고체-액체 또는 액체-기체 간의 접촉면적을 증가시킨다. Fig. 4의 실험결과에서 나노유체의 증발속도가 약간 빠르게 나타나는 것은 베이스직경의 증가로 인해 나노유체 액적의 열전달 면적이 증가하였기 때문인 것으로 판단된다.

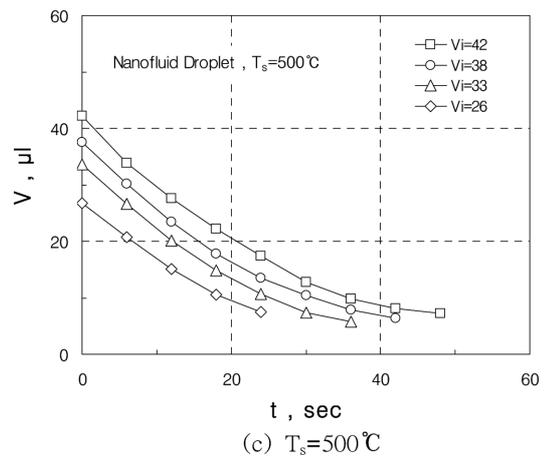
Figure 5에는 초기부피가 21~44 μl 액적을 대상으로



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



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



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

Fig. 5 Variations of water droplet volume for different initial volume, $V_i = 21\sim 44 \mu\text{l}$

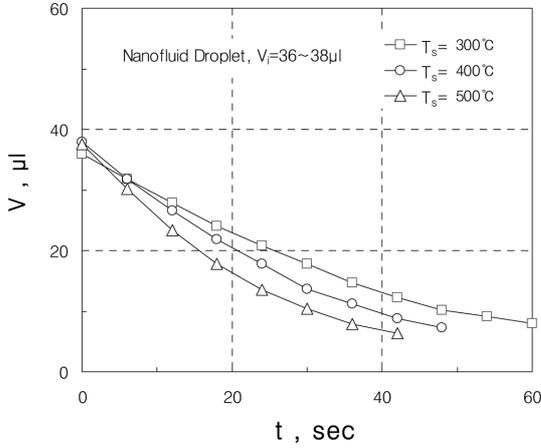


Fig. 6 Variations of water droplet volume for different surface temperature, $T_s = 300\sim 500^\circ\text{C}$

증발이 진행됨에 따라 액적의 부피변화를 표면 온도 (a) 300°C , (b) 400°C , (c) 500°C 에 대하여 나타내었다. 모든 실험결과에서 초기에는 액적이 빠르게 증발하고 있으나 액적의 부피가 작아질수록 증발속도가 점차 느려지고 있음을 알 수 있었다. 이는 액적의 부피가 작아질수록 베이스직경이 감소하고, 또한 액적의 온도가 점차 상승하여 전열면과 온도차이가 감소하기 때문에 증발속도가 점차 느려지는 것으로 파악된다.

Figure 6에는 액적의 초기부피가 비슷한 경우의 실험 결과를 각기 다른 표면온도에 대하여 나타내었다. 표면 온도가 증가할수록 액적이 빠르게 증발하고 있음을 알 수 있으며, 위에서 언급한 바와 같이 초기에는 액적이 빠르게 증발하지만 액적의 부피가 작아질수록 증발속도가 느려지고 있으며, 이러한 경향은 표면온도가 높을수록 강하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Figure 7에는 무차원 초기부피 $V^* = 1.5$ 인 경우에 대하여 본 실험결과와 Baumeister 등의 상관식⁽¹⁰⁾을 이용한 계산결과를 함께 나타내었다. 액적이 증발하는 동안 에너지 방정식과 접촉면에서의 열전달계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda \rho \frac{dV}{dT} = hA\Delta T \quad (1)$$

$$h = 0.68 \left(\frac{k^3 \lambda^* g \rho_l \rho_v}{\Delta T \mu_v L_e} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

Baumeister 등은 액적을 큰 액적과 작은 액적으로 구분하여 각각의 접촉면적을 다음과 같이 정의하였다.

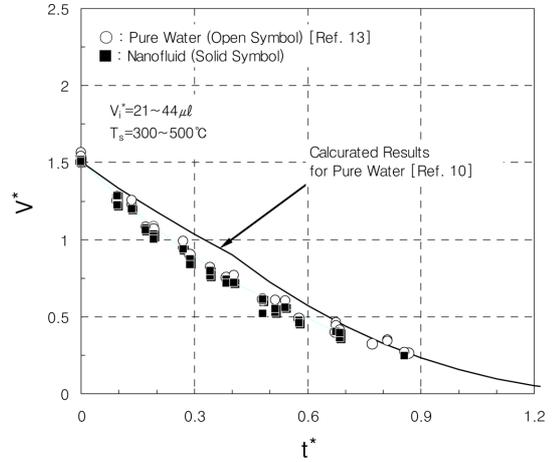


Fig. 7 Correlation between V^* and t^*

$$A = 1.25 \left(\frac{\sigma}{\rho_l g \Delta Y \mu_v L_e} \right)^{\frac{1}{4}} V_i^{*\frac{5}{6}} \quad (3)$$

$$A = 1.5 \left(\frac{3\sqrt{\pi}}{4} \right)^{\frac{2}{3}} V_i^{*\frac{2}{3}} \quad (4)$$

무차원 부피와 증발시간은 다음과 같다.

$$V^* = V_i^* \left(\frac{\sigma}{\rho_l g} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

$$t^* = t/f \left(\frac{\rho_l^{1/2} \mu_v \lambda^4 \sigma^{5/2}}{k_v^3 g^{7/2} \lambda^* \rho_v \Delta T^3} \right)^{1/4} \quad (6)$$

Baumeister 등은 막비등 열전달에 관한 (2)식과 접촉면적에 관한 (3), (4)식을 (1)식에 대입하여 적분하고, (5), (6)식의 무차원수를 도입함으로써 아래의 상관식을 얻을 수 있었다.

$$V^{*1/3} = V_i^{*1/3} - 0.448 t^* \text{ for } V^* \geq 0.8 \quad (7)$$

$$V^{*5/12} = V_i^{*5/12} - 0.826 t^* \text{ for } V^* < 0.8 \quad (8)$$

단, Baumeister 등은 $V^* = 0.8$ 을 기준으로 큰 액적과 작은 액적을 구분하였다. Fig. 7로부터 나노유체 액적의 증발속도가 Baumeister 등의 상관식을 이용하 계산한 증발속도가 약간 빠르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그리고 큰 차이는 아니지만 나노유체 액적의 증발속도가 순수 물 액적의 증발속도보다 약간 빠르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 동일한

액적 부피에서 나노유체 액적의 접촉면적이 증가하기 때문인 것으로 파악된다. 무차원부피와 무차원시간을 이용하여 정리한 연구결과에 있어서도 앞서 언급한 바와 같이 액적의 부피가 큰 증발 초기에서는 증발속도가 약간 빠르고 액적의 부피가 작아질수록 증발속도가 감소하는 경향을 알 수 있었다. 그러나 Baumeister 등이 제안한 큰 액적과 작은 액적의 증발속도 변화에 대한 명확한 경계지점을 파악할 수는 없었다.

4. 결 론

본 연구에서는 표면온도가 300~500°C의 범위에서 나노유체 액적의 막비등에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 나노유체는 평균직경 80 nm의 산화구리 분말에 순수 물을 약 0.1% 부피농도로 혼합하여 제조하였다. 나노유체 액적의 초기부피는 약 21~44 μm 범위이고, 증발과정에 있어서 부피, 베이스직경, 시간 등을 측정하였다. 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 나노유체 액적은 전열면 온도가 증가할수록 빠르게 증발하고 있음을 알 수 있었다. 또한 모든 실험결과에서 증발 초기에는 액적이 빠르게 증발하지만 액적의 부피가 작아질수록 증발속도가 점차 느려지고 있으며, 이러한 경향은 전열면 온도가 높을수록 강하게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 이는 증발이 진행되어 액적의 부피가 작아질수록 베이스직경이 감소하고, 또한 액적의 온도가 상승하여 전열면과 온도차이가 점차 감소하기 때문인 것으로 파악된다. 또한 순수 물 액적보다 나노유체 액적의 증발 속도가 약간 빠르게 나타났으며, 이는 나노유체의 표면에너지 영향으로 인해 동일한 액적 부피에서 나노유체 액적의 접촉면적이 증가하기 때문인 것으로 파악된다.

후 기

이 논문은 국립안동대학교 기본연구지원사업에 의하여 연구되었음.

참고문헌

(1) U. S. Choi, "Enhancing thermal conductivity of fluid

with nanoparticles", ASME FED, Vol. 231, 1995, pp. 99~105.

- (2) S. Lee, U.S. Choi, S. Li and J. A. Eastman, "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 121, 1999, pp. 280~289.
- (3) P. Kebilinski, S. R. Phillpot, U. S. Choi and J. A. Eastman, "Mechanism of heat flow in suspensions of nano-sized particles (Nanofluid)", Int. J. of Heat & Mass Transfer, Vol. 45, 2002, pp. 855~863.
- (4) Y. C. Kim, "Effects of surface roughness on contact angle of nanofluid droplet", Trans. Korean Mech. Eng.(B), Vol. 37-6, 2013, pp. 559~566.
- (5) Y. C. Kim, "Evaporation of nanofluid droplet on heated surface", Advances in Mechanical Engineering, Vol. 7-4, 2015, pp. 1~8.
- (6) H. J. Lee, D. Y. Kim and S. H. Lee, "Influence of particle size on evaporation characteristics of nanofluid droplet", J. of ILASS-Korea, Vol. 22-1, 2017, pp. 36~41.
- (7) B. S. Kang and S. P. Lee, "Comparison of the characteristics of spray cooling between water and nanofluid sprays", J. of ILASS-Korea, Vol. 19-2, 2014, pp. 88~93.
- (8) Y. C. Kim, "Study on spray cooling heat transfer of nanofluid", Trans. Korean Mech. Eng.(B), Vol. 42-11, 2018, pp. 705~710.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) S. Chandra and S. D. Aziz, "Leidenfrost evaporation of liquid nitrogen droplets", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 116, 1973, pp. 999~1006.
- (13) Y. C. Kim, "Experimental Study on film boiling of liquid droplets on oxidized copper surface", J. of ILASS-Korea, Vol. 25-2, 2020, pp. 68~73.