

비등점의 가열 표면에서 나노유체 액적의 증발 특성

김대윤* · 정정열** · 이성혁*[†]

Characteristics for Nanofluid Droplet Evaporation on Heated Surface at Boiling Temperature of Base Liquid

Dae Yun Kim, Jung-Yeul Jung and Seong Hyuk Lee

Key Words: Nanofluid(나노유체), Droplet(액적), Evaporation(증발), Heated surface(가열 표면), Boiling temperature (비등점)

Abstract

This study aims to experimentally investigate the evaporation characteristics of nanofluid droplet on heated surface at boiling temperature of DI-water. In particular, textured surface was used to examine the effect of wettability on evaporation. At the initial stage of evaporation process, dynamic contact angle (DCA) of nanofluid droplet with 0.01 vol.% concentration on textured surface rapidly increased over its equilibrium contact angle by generated large bubble inside the droplet due to lower wettability. However, contact angle of nanofluid droplet with higher concentration on textured surface decreased with surface tension. In addition, total evaporation time of droplet on textured surface was considerably delayed due to reduction of contact area between droplet and solid surface. Thus, evaporation characteristics were highly affected by the nanofluid concentration and surface wettability.

기호설명

θ : 동적 접촉각, degree
 θ_{ECA} : 평형 접촉각, degree
 ϕ_{area} : 텍스처 홀 면적 비율
 c_v : 수증기 질량 농도, kg/m³
 d : 액적의 접촉 지름, m
 \dot{m} : 증발률, kg/s
 t : 시간, s
 t_f : 액적의 총 증발 시간, s

D : 확산 계수, m²/s
 J_0 : 증발 유량, kg/m²·s
 R : 액적의 접촉 반지름, m

1. 서론

최근에 열전달 성능을 향상시키기 위해 작동 유체에 나노입자를 첨가한 나노유체에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다⁽¹⁾. 나노유체에 관한 실험연구 결과를 플랜트 산업 및 열교환기 등의 분야에 응용한다면 열효율을 증가시키고 에너지를 절감할 수 있다. 또한 나노유체의 증발 현상을 분석하여 다상유동에서 열 및 물질 전달에 대한 이해의 폭을 넓혀 lab-on-a-chip 혹은 DNA관련 분야의 발전에도 기여할 수 있다⁽²⁾. 최근에는 나노유체의 입자 체적율에 따른 총 증발시간, 및 증발률에 대한 실험적 연구가 많이 보고되고 있다⁽³⁾. 나노유체의 농

(Received: 01 Nov 2015, Received in revised form: 27 Nov 2015, Accepted: 28 Nov 2015)

*중앙대학교 기계공학부

**선박해양연구소 해양플랜트산업기술센터

[†]책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부(소속)

E-mail : shlee89@cau.ac.kr

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

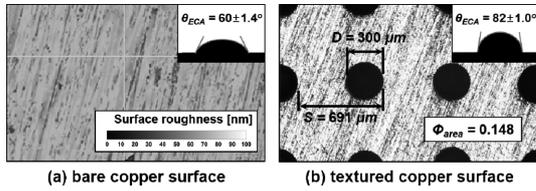


Fig. 1 (a) bare surface and (b) textured surface (with μ -CNC machine) of copper substrate

도에 따라 증발하는 과정에서 유체 내부의 나노입자들의 국부 응집에 관한 연구가 진행되었다⁽⁴⁾. 가열 표면의 온도와 나노유체의 농도에 따른 액적의 거동에 관한 연구도 진행되었다⁽⁵⁾.

나노유체 액적의 증발 거동을 연구하기 위해서는 다양한 인자들을 고려해야 하지만 현재까지 대부분의 연구는 나노입자의 체적율에 따른 영향 파악에만 국한되어 있는 실정이다. 표면 특성에 따라서도 액적의 동적 거동뿐만 아니라 열전달 특성이 변화한다. 액적의 거동과 열전달 특성을 조절하기 위한 표면 처리 기법이 많이 개발되었으나, 비등점의 높은 온도로 가열하고 반복 실험을 진행하여도 신뢰도 있는 표면을 제작하기 위해서 물리적으로 표면에 마이크로-드릴링 기법을 사용하여 정방형 홀을 만들어 텍스처 표면을 제작하였다. 따라서 본 연구에서는 비등점으로 가열된 표면에서 나노유체 액적의 증발 거동에 대하여 표면 특성에 따른 영향을 분석하고 실험적으로 가시화한다. 그리고 증발 과정 동안 액적의 형상 변화를 이미지 분석하여 기존에 정립되어 있는 이론식을 토대로 시간에 따른 액적의 증발률을 계산하여 증발 거동 및 열전달에 관하여 분석하였다.

2. 실험

Figure 1은 증발 실험에서 액적을 고착시킬 표면의 이미지이다. Fig. 1의 (a)시편의 재료는 순도 99.97%의 구리 봉재이며, 높이를 20 mm로 절단하여 SiC 연마지 (#2000)를 이용하여 표면을 제작하였다. Fig. 1의 (b)시편은 (a)와 동일한 시편 표면에 μ -CNC(computer numerical control) 장비를 이용하여 드릴링하였다. 텍스처 홀의 지름은 300 μ m, 피치는 691 μ m이며, 단위 면적당 텍스처 홀은 0.148의 면적 분율을 갖는다. 뉴턴 유체인 탈

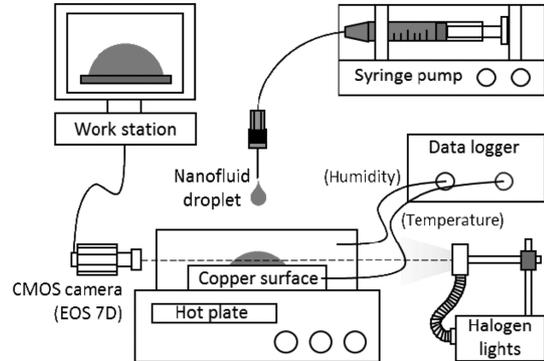


Fig. 2 Schematic of the experimental set-up

이온수(DI-water)를 이용하여 상온에서 액적을 두 가지 표면에 고착시켰을 경우 평형 접촉각은 각각 $60 \pm 1.4^\circ$, $82 \pm 1.0^\circ$ 로 측정되었다.

Figure 2는 본 실험에서 사용한 액적 증발 실험 장치 개략도다. CMOS(Canon, EOS 7D) 카메라를 사용하여 액적의 거동을 촬영하였으며, 광원은 Halogen 램프(Fiber-lite, MI-157)를 사용하였다. 저장된 사진은 한 픽셀당 38 μ m이며, 가시화 장비를 통해 얻은 사진들은 상용프로그램 ImageJ를 이용하여 액적의 지름 및 접촉각을 측정하였다. 시편인 구리 봉재의 반경방향으로 단열재를 설치하였으며, 시편의 높이별로 RTD(resistance temperature detector)센서를 설치하여 온도를 측정하여 측정된 온도와 시편의 열전도도계수를 기준으로 시편 표면의 온도를 추산하였다. 핫플레이트(Lab companion, T-17R)를 일정한 온도 조건으로 설정하여 구리 시편 표면의 온도는 $100 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 유지하였다. 실험 환경은 상대습도 센서(Kimo, TH100)를 사용하여 측정 하였으며 데이터 수집장치(Agilent, 34970A)를 사용하였다. 외기 온도는 $22 \pm 1^\circ\text{C}$, 상대습도는 $32 \pm 3.5\%$ 로 일정하게 유지하여 실험을 진행하였다.

나노유체의 기본유체는 탈이온수를 사용하였으며, 나노입자는 평균 지름이 50 nm인 Al_2O_3 (Sigma Aldrich)를 0.01, 0.1 vol.%로 혼합하였다. 나노입자의 응집을 막고 고르게 유체 내에 분산시키기 위해 초음파장치(Mujigae, SD-200H)를 약 3시간 동안 사용하였다. 본 연구에서는 실린지 펌프(Longer Pump, LSP01)를 이용하여 50 μ L의 나노유체를 자중을 이용해 분리하여 시편 위에 고착시켰다. 각 실험은 10회씩 반복하였으며, 데이터 측정에 의한 불확실성은 3.1%이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 액적 동적 거동 특성

Figure 3은 액적이 고체 표면에 고착된 후 시간이 지남에 따라 증발하는 거동을 이미지로 나타내었다. 가열된 텍스처 표면 위 0.01 vol.% 나노유체 액적의 동적 접촉각이 평형 접촉각보다 더 크게 증가하는 것이 관찰되었다. 이는 비등점으로 가열된 표면에 액적이 접촉하자마자 내부에 생성된 기포가 급격하게 성장하기 때문이다. 그러나 평판 위의 0.01 vol.% 나노유체 액적 내부에서도 기포가 관찰되기는 하지만 기포가 크게 성장하지 못하고 상대적으로 작은 크기로 제한되는 것이 관찰되었다. 동일한 농도의 나노유체가 표면 특성에 따라서 다른 거동을 나타내는 이유는 표면의 젖음성 증가함에 따라 액적과 고체표면의 접촉면적이 증가하여 발생하는 액적의 표면에너지 변화를 야기하기 때문이다. 이와 유사한 Kim⁽⁵⁾의 연구에 따르면, 가열 표면 위의 액적 내부에 기포가 성장하여 액적의 겉보기 부피가 증가하는데, 이 실험에서 평형 접촉각은 72° 이상의 표면에서 실험을 진행하였다. 따라서 액적 내부의 기포가 성장할 수 있는 크기는 액적과 표면의 젖음성에 의해 결정되는 액적의 형상과 관련이 있는 것으로 사료된다. 또한 동일한 텍스처 표면 위에서도 나노유체의 농도에 따라서 액적의 거동이 다르게 나타난다. 문헌에서 보고된 바에 따르면, 나노입자의 체적율이 증가할수록 나노유체 액적의

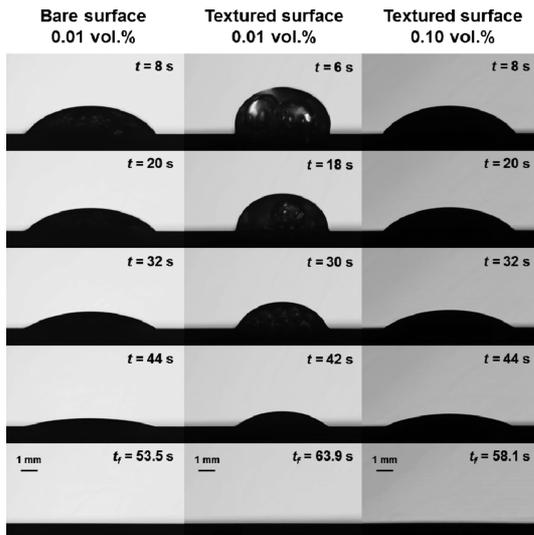


Fig. 3 Evaporation behavior of nanofluid droplet images on a heated solid surface

표면장력이 감소한다⁽⁶⁾. 따라서 0.10 vol.%의 나노유체 액적의 표면장력은 상대적으로 감소하여 젖음성이 증가하게 되어, 텍스처 표면 위에서도 평판 위에서의와 유사한 초기 형상을 보인다.

Figure 4는 이미지 분석을 통해 시간에 따른 액적의 동적 접촉각을 나타낸 그래프다. 가열된 텍스처 표면 위 0.01vol.% 나노유체의 내부에서 초기에 발생한 기포에 의해 접촉각이 90°이상으로 급격하게 증가하고, 이후 서서히 감소한다. 다른 조건의 실험에서는 동적 접촉각의 증가 없이 시간이 지남에 따라 감소하기만 한다.

Figure 5는 시간이 지남에 따라 액적과 고체 표면의 접촉 지름 변화를 나타낸다. 일반적으로 나노유체는

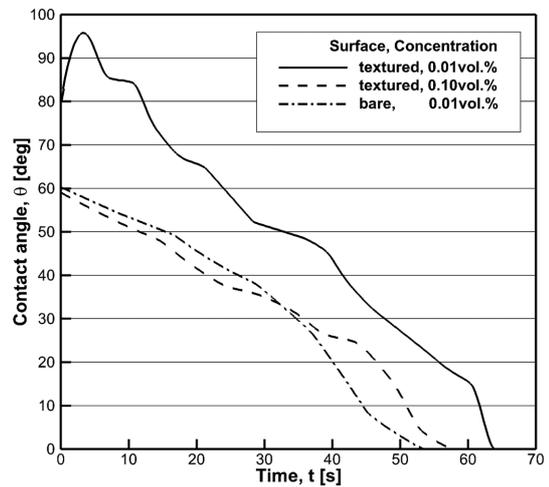


Fig. 4 Contact angle variation with time

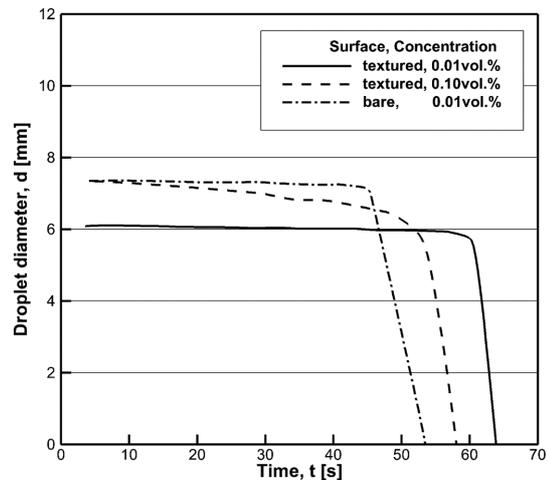


Fig. 5 Droplet diameter evolution with time

pinning effect로 인해 액적과 표면의 접촉선이 유지되는 성질을 가지고 있다⁽⁷⁾. 이러한 성질 때문에 액적의 증발 과정 동안 접촉 지름이 거의 동일하게 유지되다가, 최종 증발 시간의 약 90% 이후부터 접촉 지름이 급격하게 축소한다. 예외적으로 나노유체의 농도가 0.10 vol.%인 경우에는 액적이 고체 표면에 고착된 후 시간이 지남에 따라 서서히 접촉 지름이 감소하며, 상대적으로 농도가 작은 0.01v ol.%의 나노유체 액적에 비해 접촉 지름의 변화량이 크게 나타났다. 나노유체의 농도가 증가함에 따라 액적의 접촉선 부근에 나노입자가 더 많이 축적되면서 유체가 액적의 중심 방향으로 수축하는 depinning effect⁽⁸⁾에 의한 현상으로 사료된다.

3.2 액적 증발 특성

단일 액적의 열전달 특성을 정량화하기 위해서는 온도에 따른 물질 전달 계수, 수증기 농도, 액적의 표면 온도 등의 값들을 정확하게 측정해야 하지만, 이러한 값들을 실험적으로 측정하는 것은 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 기존에 이론적으로 정립된 증발률 식을 사용하여 시간에 따른 액적의 증발특성을 분석하였다. 친수성 표면에서 액적의 접촉각과 접촉지름 값을 알면 고체 표면 위 액적의 부피와 표면적을 예측할 수 있으며, 이를 Hu and Larson이 제안한 다음 식에 대입하여 증발률을 계산 하였다⁽⁹⁾:

$$\Lambda(\theta) = 0.2239(\theta - \pi/4)^2 + 0.3619 \quad (1)$$

$$J_0(\pi/2) = \frac{D(1-H)c_v}{R} \quad (2)$$

$$\frac{J_0(\theta)}{(1-\Lambda(\theta))} = J_0(\pi/2)(0.27\theta^2 + 1.30) \quad (3)$$

$$-\dot{m}(\theta, t) = \frac{\pi R^2 J_0(\theta)}{(1-\Lambda(\theta))} \quad (4)$$

여기서 θ 와 R 은 각각 액적의 접촉각과 반지름을 의미한다. 변수 Λ 는 증발유량과 증발률 식을 간단하게 정리하기 위해 도입하였으며, 시편의 단위 면적당 액적의 표면적과 증발 유량의 불균일도를 반영한다. 식 (2)에서 D 는 물질 전달 계수, $(1-H)c_v$ 는 수증기 농도 편차, J_0 는 증발 유량, \dot{m} 는 증발률을 의미한다.

Figure 6은 시간에 따른 액적의 증발률을 나타내며, 물질 전달 계수와 수증기 농도 편차 항을 소거하기 위해 식 (4)를 무차원화 시켜서 나타냈다. 우선 식 (4)에서 알 수 있듯이, 증발률은 액적의 접촉 반지름의 제곱에

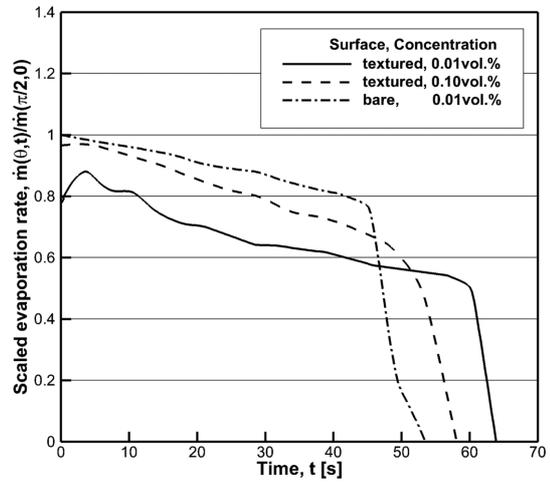


Fig. 6 Scaled evaporation rate variation with time

비례하며, 접촉각의 radian값에 비례한다. 따라서 증발률은 접촉면적과 접촉각의 함수지만, 접촉면적의 영향이 더 지배적 이기 때문에 Fig. 5와 유사한 경향을 나타낸다.

총 증발 시간은 텍스처 표면 위 0.01 vol.%의 나노유체 액적에서 63.9초로 가장 크게 나타났다. 이는 표면의 젖음성이 낮아 액적과 가열표면의 접촉면적도 작아져 총 증발시간이 지연되었기 때문이다. 그리고 접촉 지름의 거동과 유사하게 최종 증발 직전에 급격하게 증발률이 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 액적의 걸보기 형상이 비슷하여 증발률도 비슷하였지만, 텍스처 표면 위의 액적은 실제 가열된 표면과 물리적으로 접촉하는 면적이 작아 가열 표면으로부터 직접적인 열전달량이 감소하게 된다. 따라서 텍스처 표면 위의 액적에서 증발률이 더 작게 나타나며, 최종 증발 시간이 지연된다.

4. 결 론

본 연구에서는 물의 비등점으로 가열한 고체표면에서 나노유체의 증발 실험을 하였고, 이론적으로 정립된 이론들을 토대로 시간에 따른 액적의 증발률을 추산하였다. 고체 표면 특성에 따라 젖음성이 낮으면 액적이 표면에 고착되었을 때, 액적 내부에 급격하게 생성된 기포의 영향으로 액적의 동적 접촉각이 평형 접촉각 이상으로 증가할 수 있다. 또한 Al₂O₃나노유체의 농도가 0.10%로 증가하면 표면장력이 작아지기 때문에, 텍스처 표면 위

에서도 평형 접촉각이 작아지게 되어 나노유체 액적의 거동이 평판 위에서와 유사하다. 그러나 텍스처 표면 위의 액적에서는 텍스처 홀의 존재로 액적과 실제 가열표면의 접촉면적이 평판에 비해 상대적으로 줄어들어 열전달량이 감소한다. 따라서 텍스처 표면에서는 액적의 증발률이 낮게 예측되며 열전달량의 감소로 최종 증발 시간이 지연된다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(No. 2014R1A2A2A01006186), 2015년도 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 출연금 재원으로 수행된 (해양기자재 성능향상을 위한 내식성/방오 표면기술 개발) 연구 결과임(No. PES1970).

참고문헌

- (1) S. U. S. Choi, "Eastman, J. A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles", Proc. ASME-IMECE 1995, Vol. 231, pp. 99105.
- (2) V. Dugas, J. Broutin, E. Souteyrand, "Droplet evaporation study applied to DNA chip manufacturing", Langmuir 2005, Vol. 21, pp. 91309136.
- (3) T. A. H. Nguyen, A. V. Nguyen, "Increased evaporation kinetics of sessile droplets by using nanoparticles", Langmuir 2012, Vol. 28, pp. 1672516728.
- (4) D. H. Shin, C. K. Choi, Y. T. Kang, S. H. Lee, "Local aggregation characteristics of a nanofluid droplet during evaporation", International Journal of Heat and Mass Transfer 2014, Vol. 72, pp. 336-344.
- (5) Y. C. Kim, "Evaporation of nanofluid droplet on heated surface", Advances in Mechanical Engineering 2015, Vol. 7, pp. 1-8.
- (6) J. Chinnam, D. K. Das, R. S. Vajjha, J. R. Satti, "Measurements of the surface tension of nanofluids and development of a new correlation", International Journal of Thermal Sciences 2015, Vol. 98, pp. 68-80.
- (7) R. D. Deegan, O. Bakajin, T. F. Dupont, G. Huber, S. R. Nagel, T. A. Witten, "Contact line deposits in an evaporating drop", Physical Review E 2000, Vol. 62, pp. 756-765.
- (8) X. Zhong, A. Crivoi, F. Duan, "Sessile nanofluid droplet drying", Advances in Colloid and Interface Science 2015, Vol. 217, pp. 13-30.
- (9) H. Hu, R. G. Larson, "Evaporation of a sessile droplet on a substrate", Journal of Physical Chemistry B 2002, Vol. 106, pp. 1334-1344.