

나노입자 크기에 따른 나노유체 액적의 증발 열전달 특성

이형주* · 김대윤* · 이성혁*†

Influence of Particle Size on Evaporation Heat Transfer Characteristics of Nanofluid Droplet

Hyung Ju Lee, Dae Yun Kim and Seong Hyuk Lee

Key Words: Nanoparticle(나노입자), Nanofluid(나노유체), Droplet(액적), Evaporation(증발), Heat transfer(열전달)

ABSTRACT

The present study investigates the evaporation heat transfer characteristics of nanofluid droplet for different nanoparticle sizes. Also, the heat transfer coefficient was measured at different nanoparticle concentrations during evaporation. From the experimental results, it is found that the evaporation behavior of sessile droplet can be considered as constant radius mode due to pinning effect. The total evaporation time of sessile droplet decreases with nanoparticle size up to 7.9% for 0.10 vol% nanofluid droplet. As nanoparticle concentration increases, the clear difference in heat transfer coefficient is observed, showing that the size effect should be examined. This result would be helpful in designing the correlation between the nanoparticle size and the heat transfer characteristics for various applications.

기호설명

- A 액적과 공기의 접촉면적, m^2
- c 비열, $J/kg \cdot ^\circ C$
- h 열전달계수, $W/m^2 \cdot ^\circ C$
- L_v 액체의 증발열, J/kg
- T_s 전열면의 온도, $^\circ C$
- T_∞ 외기 온도, $^\circ C$
- t_f 액적의 최종 증발 시간, s
- V 액적의 체적, m^3
- ρ 밀도, kg/m^3
- ϕ 나노유체의 체적분율

1. 서 론

나노유체란 일반적인 작동유체에 나노 크기의 금속입자를 혼합하여 열전도도 향상을 도모한 것이다. 최근 나노유체의 열전달 성능을 평가하기 위한 연구가 활발하게 보고되고 있다⁽¹⁻⁴⁾. 특히 나노입자의 농도에 따라 시편에 고착된 나노유체 액적이 증발할 때 다양한 동적 특성에 대하여 연구하였다⁽⁵⁾. 나노입자의 다양한 종류에 따라서 나노유체의 열물성에 대하여 연구하였다⁽⁶⁾. 가열 표면에서 온도에 따른 나노유체 액적의 증발 거동에 대한 연구도 진행되었다⁽⁷⁾. 나노입자에 초점을 맞춰, 나노입자의 크기에 따른 증발 이후 나노입자의 얼룩을 분석한 연구들이 있다⁽⁸⁻¹⁰⁾. 또한, 나노입자의 종류와 농도에 따라 증발 이후 coffee ring 효과에 따른 입자 분포에 관한 연구가 진행되었다⁽¹¹⁾. 그러나 나노유체는 무엇보다도 나노 입자의 크기, 농도, 종류에 따라 지배적으로 열물성 특성이 변화하는데, 이를 고려한 증발 특성 연구는 부족한 상황이다. 따라서 실제 산업현장에 적용하기 위해서는 열전달 특성에 미치는 나노입자의 영향을 자세

(Received: 27 Feb 2017, Received in revised form: 22 Mar 2017, Accepted: 22 Mar 2017)

*중앙대학교 기계공학부

†책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부(소속)

E-mail: shlee89@cau.ac.kr

TEL: (02)820-5254, FAX: (02)820-9780

하게 분석하는 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 나노입자의 크기에 따른 나노유체 액적의 증발 열전달 특성을 실험적으로 연구하였다. 또한 ZnO 나노입자의 농도를 변화시켜가면서 액적의 증발 열전달에 미치는 나노입자의 영향도 분석하였다.

2. 실험

Figure 1은 본 연구에서 열전달 평가에 사용될 나노입자의 FE-SEM이미지이다. 나노입자는 평균 지름이 18, 50, 100 nm인 ZnO를 사용하였으며 0.01, 0.10 vol%의 농도로 혼합하였다. 나노입자의 응집을 막고 유체 내에 고르게 분산시키기 위하여 초음파장치를 각 나노유체당 약 3시간씩 사용하였다. 나노유체를 고착시키는 시편은 순도 99%의 구리 봉재이며, SiC 연마지를 이용하여 표면을 제작하였다. 40°C 표면에서 나노입자의 평균지름과 농도를 변화하며 나노유체를 고착시켰을 경우, 평형 접촉각은 18, 50, 100 nm의 평균지름과 0.01 vol%에서 각각 $69.2 \pm 1.6^\circ$, $73.0 \pm 3.2^\circ$, $76.4 \pm 2.4^\circ$ 로 측정되었다. 또한, 0.10 vol%의 농도를 갖는 경우 각각 $56.0 \pm 3.0^\circ$, $66.5 \pm 2.3^\circ$, $67.6 \pm 2.0^\circ$ 로 측정되었다.

Figure 2는 본 연구에서 사용한 액적 증발 실험 장치

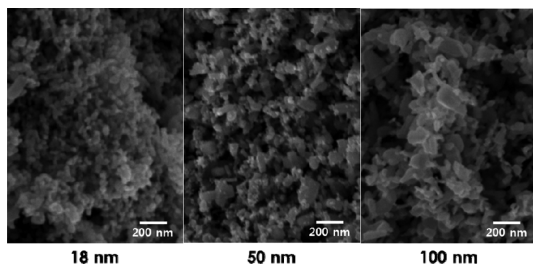


Fig. 1 Particle morphology

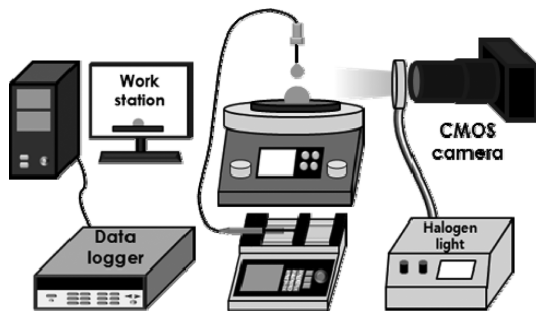


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

를 나타낸 그림이다. CMOS(Canon, EOS 7D) 카메라를 사용하여 액적의 증발 거동을 촬영 하였으며, 광원으로는 할로겐 램프(Fiber-lite, MI-157)를 사용하였다. 저장된 사진의 해상도는 한픽셀당 $3.27 \mu\text{m}$ 이며, 상용 프로그램인 ImageJ를 이용하여 촬영한 사진들을 후처리 하였다. 전열판(Lab companion, T-17R)을 이용하여 시편의 표면 온도를 40°C로 일정하게 유지하면서 증발 실험을 진행하였다. 전열면의 온도는 비등이 발생하지 않고 증발만 발생하도록 설정한 것이다. 시편과 전열면의 상단에 각각 RTD(J&S Sensor, PT100)센서를 설치하여 온도를 측정하였다. 온습도 측정기(Kimo, TH100)와 데이터 수집장치(Agilent, 34970A)를 사용하여 실험의 분위기 조건을 측정하였다. 외기 온도는 $20.2 \pm 0.5^\circ\text{C}$, 상대습도는 $23 \pm 1.6\%$ 로 일정하게 유지하여 실험을 진행하였다.

본 실험에서는 액적을 시편에 고착시키기 위해 실린지 펌프(Longer Pump, LSP01)와 50 gage 미세 바늘(Hamilton, 90310)을 사용하였다. 미세 바늘은 시편으로부터 2.7 mm의 높이에 고정하였으며, $6.4 \mu\text{l}$ 의 탈이온수가 자중에 의해 분리되도록 설정하여 액적의 충돌 속도는 0.08 m/s이다. 각 실험은 10회씩 반복하였으며, 데이터 측정에 의한 불확실성은 6.2%이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 나노유체 액적의 증발 거동

표면 온도와 나노입자의 농도에 따라 나노유체의 열물성치가 변하며 증발 거동에 영향을 줄 수 있다. 나노유체의 체적률이 0.01 vol%, 0.10 vol%인 경우 점성은 40°C의 물(기본 유체)에 비해 각각 0.07%, 0.74% 증가한다⁽¹²⁾. 즉, 본 실험에서 사용한 농도 범위에서 나노유체의 점성 변화는 최대 1% 미만으로 그 영향이 미미하다. 표면장력은 40°C에서 나노유체의 체적률이 0.10 vol%인 경우 약 61.8 mN/m이며, 물의 표면장력에 비해 약 12% 감소한다⁽¹³⁾. 또한, 나노입자의 크기가 감소함에 따라 표면장력은 감소하는 경향을 나타낸다⁽⁶⁾.

Figure 3은 액적이 구리 표면에 고착된 후 시간이 지남에 따라 증발하는 거동을 촬영한 이미지이다. 평형 접촉각 측정 결과와 동일하게 나노입자의 평균지름이 작을수록 액적이 표면에 고착된 후 접촉각이 작게 나타났다. 또한, 농도가 증가할 경우에도 액적의 접촉각이 작게 나타나는 것을 확인하였다. 이는 나노입자의 크기가 작을수록 동일 농도에서 상대적으로 나노입자의 수가 증가

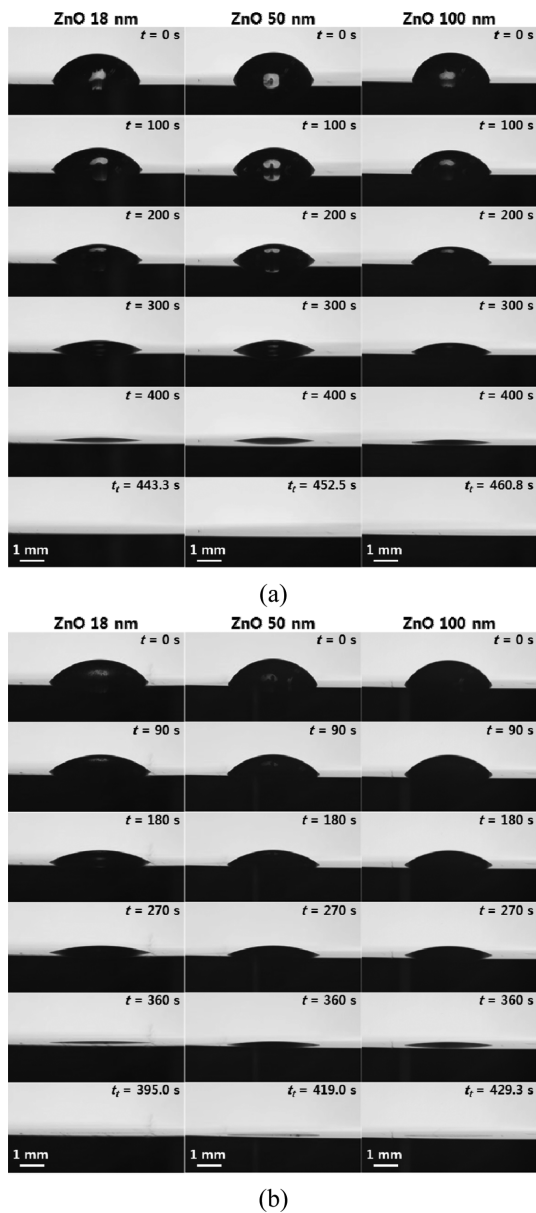


Fig. 3 Droplet images during evaporation for nanofluid concentration of (a) 0.01 vol% and (b) 0.10 vol%

하게 되고 표면장력이 감소하기 때문이다. 따라서 나노입자의 크기가 18 nm이고 농도가 0.10 vol%인 경우 초기 접촉각이 가장 작게 나타난다. 최종 증발시간은 나노유체의 농도가 0.01 vol%의 경우 나노입자의 크기가 증가함에 따라 평균적으로 각각 443.3초, 452.5초, 460.8초로 측정되었으며, 0.10 vol%의 경우 395.0초, 419.0초, 429.3초로 측정되었다. 또한 나노유체 액적 증발이 진행

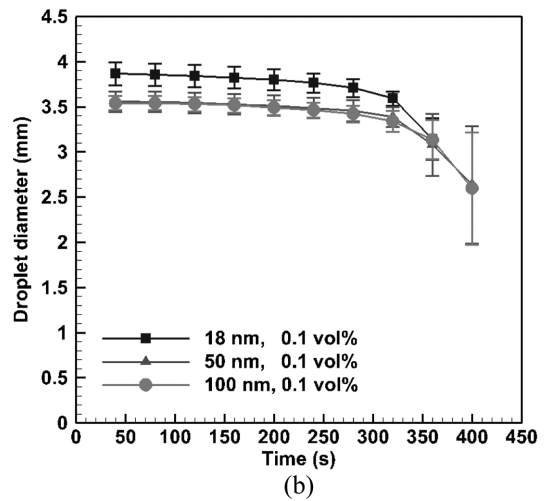
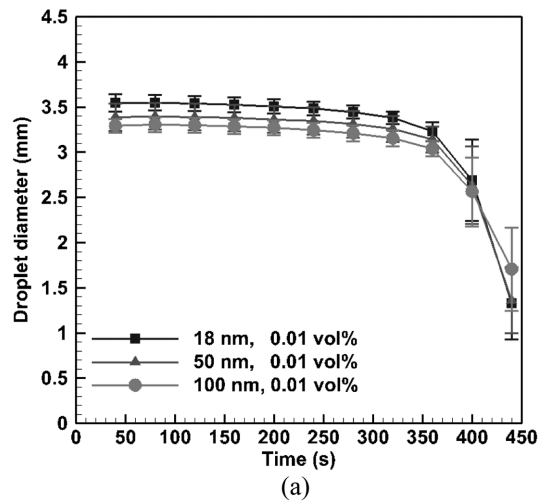


Fig. 4 Droplet diameter variation with time for nanofluid concentration of (a) 0.01 vol% and (b) 0.10 vol%

됨에 따라 접촉각은 거의 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다.

나노유체 액적의 증발 거동을 정량화하기 위해 촬영한 이미지를 후처리 하여 액적의 접촉 각을 측정하였다. Figure 4는 시간에 따른 나노유체 액적의 접촉 각 변화를 나타낸다. 일반적으로 나노유체의 경우 액적이 고착된 후 피닝 효과(pinning effect)가 나타나게 되며, 이로 인해 액적과 표면의 접촉선이 유지되는 성질을 가지고 있다^(14, 15). 이러한 성질 때문에 액적의 증발과정 동안 접촉 각이 거의 동일하게 유지되며, 최종 증발 시간의 약 85% 이후로 접촉 각이 급격하게 축소한다. 나노유체 액적의 각은 0.01 vol%에 비해 0.10 vol%에

서 더 크게 측정되었으며, 나노입자의 평균지름이 18 nm인 경우 다른 입자에 비해 상대적으로 직경이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 최종 증발 직전에는 피닝 효과가 크지 않아 접촉각과 접촉직경이 동시에 감소하며 표준편차가 크게 나타났다. 동일한 농도의 나노유체에서 나노입자의 크기가 작아지면 상대적으로 입자의 개수가 증가한다. 액적 내부에 나노 입자의 개수가 증가하면 유체 분자들과 결합하는 수가 증가하여 표면장력을 약화시키며 액적의 접촉각을 감소시킨다⁽⁶⁾.

Figure 5는 시간이 지남에 따라 나노유체 액적의 체적 변화를 나타낸다. 친수성 표면 액적이 spherical cap 형상을 갖는다고 가정하면, 구리 표면에 고착된 액적의 접

촉직경과 접촉각을 측정하여 기하학적으로 액적의 체적을 계산할 수 있다⁽⁶⁾. 나노유체의 농도가 0.01 vol%의 경우 나노입자의 크기에 상관없이 체적의 변화는 거의 선형적으로 나타났으며, 농도가 증가한 경우 나노입자의 크기가 작을 수록 액적의 체적이 더 빨리 감소 하는 것을 알 수 있다. 이는 농도가 증가함에 따라 나노입자의 수가 상대적으로 크게 증가하여 최종 증발시간이 감소하기 때문이다. 또한 체적 변화의 차이는 나노입자의 농도가 증가할수록 뚜렷하게 나타나며, 나노유체에 포함된 입자의 개수가 증가하여 영향이 더 커지는 것으로 사료된다.

3.2 나노입자에 따른 액적의 증발 열전달

구리 표면에서의 단일 액적의 초기 형상과 최종 증발 시간을 기준으로 열전달계수를 추산하였다. 전열면에서 발생하는 열이 액적의 온도를 높이고 증발시키는 데에 전부 사용된다는 가정으로 다음의 식을 유도하였다⁽¹⁷⁾:

$$h = \frac{c_{nf} \rho_{nf} V (T_s - T_\infty) + \rho_{nf} V L_v}{A (T_s - T_\infty) t_f} \quad (1)$$

여기서 c_{nf} 는 나노유체의 비열, ρ_{nf} 는 나노유체의 밀도, V 는 액적의 체적, T_s 는 전열면의 온도, T_∞ 는 외기의 온도, L_v 는 액체의 증발열, A 는 액적과 공기의 접촉면적, t_f 는 최종 증발 시간을 의미한다. 나노유체의 비열과 밀도는 다음과 같은 식으로부터 얻을 수 있다⁽¹⁸⁾:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_l + \phi \rho_{np} \quad (2)$$

$$(\rho c)_{nf} = (1 - \phi) (\rho c)_l + \phi (\rho c)_p \quad (3)$$

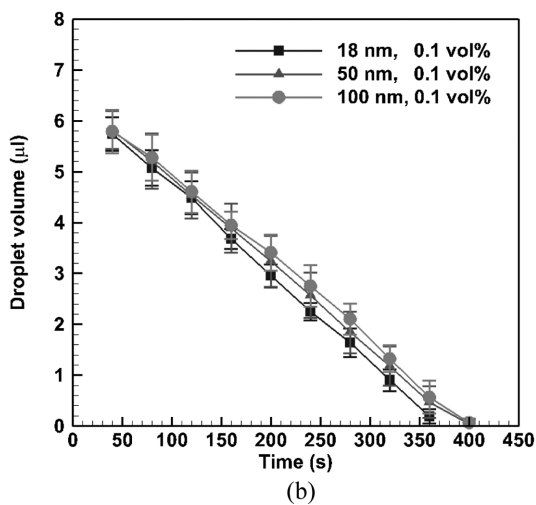
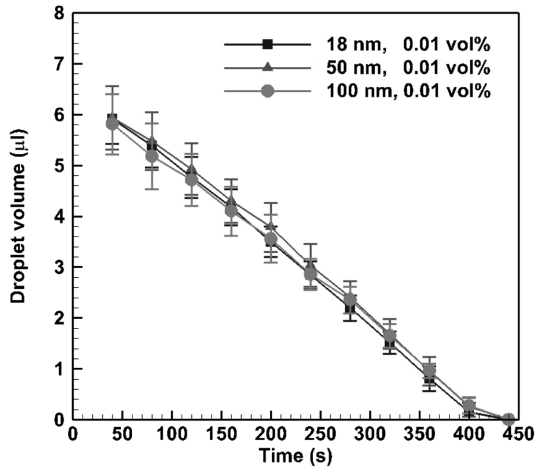


Fig. 5 Droplet volume variation with time for nanofluid concentration of (a) 0.01 vol% and (b) 0.10 vol%

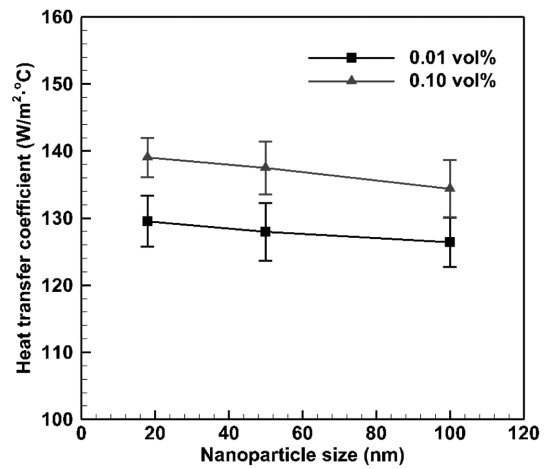


Fig. 6 Heat transfer coefficient with respect to nanoparticle size

여기서 ϕ 는 나노유체의 체적분율, ρ_l 는 액체의 밀도, ρ_{np} 는 나노입자의 밀도, c_l 은 액체의 비열, c_{np} 는 나노입자의 비열을 나타낸다.

Figure 6은 나노입자의 크기 변화에 따른 나노유체 액적의 열전달 계수를 나타낸다. 나노입자의 크기가 작을수록 액적의 증발 열전달 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 이는 동일한 농도에서 나노입자의 크기가 작을수록 액적 내부에 나노입자의 수가 증가하게 되어 액적의 접촉각을 감소시키고, 이로 인해 전열면과의 접촉면적이 증가하기 때문이다. 또한, 나노유체의 농도가 증가할 경우 나노입자의 수가 증가하여 열전달 계수도 증가하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 나노입자의 크기와 농도를 변화시켜가며 액적 증발 실험을 하였고, 이론적으로 액적의 열전달 계수를 도출하였다. 동일한 농도의 나노유체에서 나노입자의 크기가 작아지면 액적의 증발 열전달 성능이 향상된다. 그리고 나노입자의 농도가 증가하면 나노유체 액적 내 입자의 개수가 증가하여 그 차이가 더 극명해진다. 본 실험 결과는 나노입자의 크기가 감소할수록 열전달 성능이 향상됨을 의미하며, 나노입자의 크기와 열전달 성능의 상관관계 정립에 도움이 될 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2014R1A2A2A01006186).

참고문헌

- (1) S.U.S. Choi, "Eastman, J.A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles", Proc. ASME-IMECE 1995, Vol. 231, pp. 99-105.
- (2) 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.
- (3) X. Zhong, A. Crivoi, F. Duan, "Sessile nanofluid droplet drying", Advances in Colloid and Interface Science 2015, Vol. 217, pp. 13-30.
- (4) H. Hu, R.G. Larson, "Evaporation of a sessile droplet on a substrate", Journal of Physical Chemistry B 2002, Vol. 106, pp. 1334-1344.
- (5) T.A.H. Nguyen, A.V. Nguyen, "Increased evaporation kinetics of sessile droplets by using nanoparticles", Langmuir 2012, Vol. 28, pp. 16725-16728.
- (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) Y.C. Kim, "Evaporation of nanofluid droplet on heated surface", Advances in Mechanical Engineering 2015, Vol. 7, pp. 1-8.
- (8) C.H. Chon, S. Paik, J.B. Tipton Jr., K.D. Kihm, "Effect of Nanoparticle sizes and number densities on the evaporation and dryout characteristics for strongly pinned nanofluid droplets", Langmuir, Vol. 23, 2007, pp. 2953-2960.
- (9) A. Askounis, D. Orejon, V. Koutsos, K. Sefiane, M.E.R. Shanahan, "Nanoparticle deposits near the contact line of pinned volatile droplets: size and shape revealed by atomic force microscopy", Soft Matter, Vol. 7, 2011, pp. 4152-4155.
- (10) X. Zhong, A. Crivoi, F. Duan, "Sessile nanofluid droplet drying", Advances in Colloid and Interface Science, Vol. 217, 2015, pp. 13-30.
- (11) H.H. Lee, S.C. Fu, C.Y. Tso, C.Y.H. Chao, "Study of residue patterns of aqueous nanofluid droplets with different particle sizes and concentrations on different substrates", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 105, 2017, pp. 230-236.
- (12) X. Q. Wang, A. S. Mujumdar, "Heat transfer characteristics of nanofluids: a review", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 46, 2007, pp. 1-19.
- (13) S. M. S. Murched, S. H. Tan, N. T. Nguyen, "Temperature dependence of interfacial properties and viscosity of nanofluid for droplet-based microfluidics", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 41, 2008, pp. 085502.
- (14) 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.
- (15) R.D. Deegan, O. Bakajin, T.F. Dupont, G. Huber, S.R.

- Nagel, T.A. Witten, "Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops", *Nature*, Vol. 389, 1997, pp. 827-829.
- (16) M.E.R. Shanahan and K. Sefiane, "Kinetics of triple line motion during evaporation", *Contact Angle, Wettability and Adhesion*, 6th edition, 2009, pp. 19-31.
- (17) 김대윤, 이성혁, "산질화 표면에서 액적의 증발열전달 특성", *한국액체미립화학회지*, Vol. 21, No. 1, 2016, pp. 53-58.
- (18) Y. Xuan, W. Roetzel, "Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, 2000, pp. 3701-3707.