

가열된 표면에 고착된 한 쌍의 액적 증발 특성

이형주* · 황원영* · 김정호* · 최창경*** · 이성혁†

Evaporation Characteristics of Paired Sessile Droplets on a Heated Substrate

Hyung Ju Lee, Won Yeong Hwang, Jing Hao Jin, Chang Kyoung Choi, and Seong Hyuk Lee

Key Words: Paired droplets evaporation(한 쌍 액적 증발), Vapor accumulation(증기 축적), Heated substrate(가열된 표면), Total evaporation time(총 증발시간)

Abstract

This study investigates the evaporation characteristics of paired sessile droplets on a heated substrate. In particular, the evaporation time and contact line behaviors were analyzed based on the droplet-to-droplet distance and substrate temperature. The contact line behavior and volume variations were visualized using the shadowgraph method. It was observed that the contact diameter and contact angle exhibited similar behavior for both single and paired droplets regardless of the droplet-to-droplet distance and substrate temperature. The paired droplets demonstrated a longer evaporation time than the single droplet due to the vapor accumulation between the droplets. Furthermore, the scaled lifetime, defined as the ratio of evaporation time between paired and single droplets, increased as the droplet-to-droplet distance decreased and decreased as the substrate temperature increased, attributed natural convection.

1. 서 론

액적 증발은 상변화 현상으로 잠열로 인해 현열보다 높은 열전달률을 가지며, 분무 냉각, 표면 코팅, 의학 진단 등 다양한 산업 현장에 적용되고 있다^(1,2). 액적 증발에 의한 열 물질 전달은 고체표면으로부터의 열전도, 주변 대기의 대류, 액적 내부 유동, 증발 잠열 등과 같이 다양한 현상을 고려해야 한다^(3,4). 액적 주변에 형성된 증기는 확산과 대류에 의해 대기로 전달되며, 일반적으로 확산이 주된 증기 전달 메커니즘이다⁽⁵⁾. 그러나, 가열

된 표면에서 액적이 증발하는 경우 온도 차이에 의한 부력이 발생하며, 자연 대류가 액적의 증발에 영향을 미치게 된다⁽⁶⁾.

Sobac과Brutin⁽⁷⁾은 가열된 표면에서 젖음성 특성에 따른 액적의 증발 특성을 비교하였다. 또한, 그들은 확산 방정식을 기초로 하여 제시된 이론 모델은 가열된 표면에서 큰 오차를 보이고, 이러한 차이는 자연 대류에 의한 것으로 보고하였다. Pan 등⁽⁸⁾은 액적의 증발 메커니즘을 분석하기 위해서 확산, 증발 잠열, 대류를 고려한 수치해석을 수행하였다. 그들의 연구에 따르면, 가열된 표면의 온도가 증가함에 따라서 부력에 의한 자연대류가 액적 주변의 증기 수송을 증가시키고 액적 주변에 형성된 증기 분포가 액적의 증발률에 영향을 미친다.

특히, 여러 개의 액적이 증발하는 경우에는 액적 사이에 증기가 축적되어 국부적으로 증기의 밀도가 높게 나타난다⁽⁹⁾. 이러한 현상에 의해서 증발 유속이 국부적으로 감소하는데 이것을 증기 차폐 효과(vapor shielding

(Received: 9 Jun 2023, Received in revised form: 19 Jun 2023, Accepted: 20 June 2023)

*중앙대학교 기계공학과

**Michigan Technological University, Mechanical Engineering-Engineering Mechanics

†책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학과

E-mail : shlee89@cau.ac.kr

TEL : (02)820-5254 FAX : (02)814-9476

effect)라고 한다. 증기 차폐 효과에 의해서 단일 액적이 증발하는 경우에 비해 총 증발시간은 증가한다. Hatte 등⁽¹⁰⁾은 다중 액적의 증발 특성을 분석하고, 액적의 인접한 거리 변화에 따른 증발시간과 내부 유동을 비교하였다. 액적의 인접한 거리가 감소함에 따라 증발시간이 점차 증가하였으며, 그들은 확산 모델을 기반으로 하여 증발률 예측 모델을 제안하였다. 특히, 다중 액적 사이에 축적된 증기로 인해 증발 유속이 감소하며, 내부 유동에 영향을 미치는 것을 확인하였다. Lee 등⁽¹¹⁾은 다중 액적의 증발 수치해석을 통해 액적 주변에 형성된 증기 분포와 국부적인 증발 유속을 비교하였으며, 액적의 인접 거리가 감소함에 따라서 증기의 밀도가 증가하고 국부적인 증발 유속이 감소하는 것을 확인하였다. 이 외에도, 상온 표면에서 다중 액적의 증발 특성을 비교하고 증발률과 증발시간을 예측하는 다양한 이론 모델들이 제시된 바 있다⁽¹²⁻¹⁴⁾.

그러나, 상기에서 언급된 다중 액적의 증발에 관한 대부분의 연구들은 상온에서 발생하는 증발 특성을 고찰하였고 가열된 표면 온도에 따른 증발차폐 현상은 거의 보고된 바가 없다. 또한, 다중 액적의 증발 특성을 분석하여 표면 코팅, 전자 인쇄 분야 공정을 최적화하는 것이 필수적이며, 냉각 분야에 적용하기 위해서는 가열된 표면의 다중 액적의 증발 메커니즘을 이해해야 한다. 특히, 다중 액적에서 나타나는 증기 축적과 고온 표면에서 자연 대류가 액적 증발 특성에 미치는 영향을 분석하는 것이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 가열된 표면에서 한 쌍 액적(Paired droplets)에 대한 증발 특성을 고찰하고 액적간 인접 거리와 표면 온도에 따른 접촉선거동과 체적 변화 등을 분석하였다.

2. 실험방법

Figure 1은 본 연구에서 사용한 실험장치를 나타낸다. 단일 액적과 한 쌍 액적의 증발 특성을 상호 비교하기 위해서 탈이온수(Deionized water)를 커버슬립(Cover slip)에 고착하였다. 또한, 액적 사이의 거리에 따른 영향을 비교하기 위해서 한 쌍 액적 중심 사이의 간격(L)을 3.7 mm와 4.2 mm로 변화하였으며, 멀티 실린지 펌프(Longer Pump, LSP04)와 2개의 25 게이지 노즐을 이용하였다. 표면 온도 변화에 따른 단일 액적과 한 쌍 액적의 증발 특성을 비교하기 위해서 커버슬립의 온도를 변화시켰으며, Table 1과 같이 상온(24°C), 40°C, 그리고

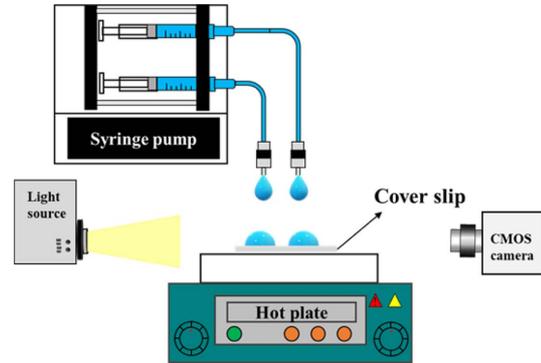


Fig. 1 Schematic of experimental setup

Table 1 Experimental cases

	Substrate temperature (°C)	Droplet distance (mm)
Single droplet	24°C, 40°C, 60°C	∞
Paired droplets		3.7 mm
		4.2 mm

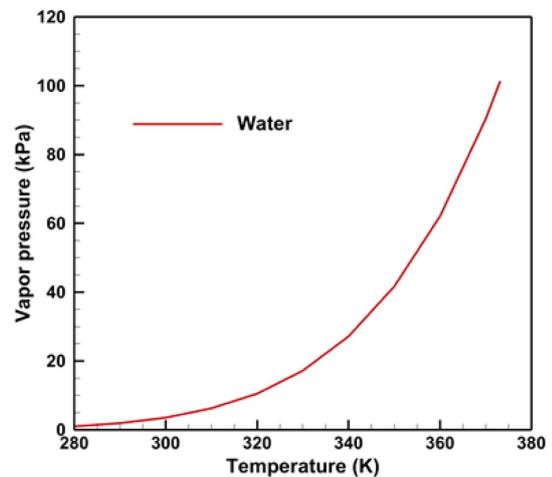


Fig. 2 Saturation vapor pressure of water

60°C 세 경우에 대해 실험을 수행하였다. Fig. 2는 물의 포화 증기압을 나타낸다. 물의 온도가 증가함에 따라 포화 증기압이 증가하며, 액적의 증발시간은 감소하게 된다. 전열판(Lab companion, T-17R) 위에 서멀 그리스(Thermal grease)를 이용하여 커버슬립을 부착하였고, 커버슬립의 표면 온도 측정을 위해 열전대(Thermocouple K-type)를 부착하였다. 액적의 형상 변화를 가시화하기 위해서 Shadowgraph 기법을 이용하였으며, 0.5 배율의

렌즈가 부착된 CMOS camera(JENOPTIK)와 광원(Fiber-lite, FOK-150W)을 Fig. 1과 같이 구성하였다. 또한, 촬영한 액적 이미지는 상용 프로그램인 Image J와 Matlab R2019b를 이용하여 분석하였다. 우선, 액적의 영상을 2진 데이터로 변환한 후, 액체와 기체의 경계면의 픽셀(pixel)을 도출하여 액적의 접촉 직경과 접촉각을 계산할 수 있다. 액적의 부피는 식 (1)과 같이 접촉각과 접촉 직경으로부터 계산할 수 있다.

$$V = \frac{\pi D^3 (2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta)}{24 \sin^3 \theta} \quad (1)$$

여기서, D 는 접촉 직경이고 θ 는 접촉각이다. 각 액적의 부피는 $2 \pm 0.06 \mu\text{L}$ 이며, 실험은 4회 반복하였다. 측정값의 오차는 95%의 신뢰 구간을 갖는 표준편차 $\pm 2\sigma$ 로 나타내었다. 또한, 대기온도는 $24.0 \pm 0.3^\circ\text{C}$, 상대습도는 $47 \pm 1\%$ 로 일정하게 유지하였다.

3. 결과 및 분석

Figure 3은 상온 표면에서 단일 액적과 한 쌍 액적의 인접한 거리에 따른 측면 촬영 이미지를 나타낸다. 액적의 증발시간(t)을 총 증발시간(t_{total})으로 나누어 표기하였다. 상온 표면에서 단일 액적의 경우 총 증발시간(t_{total})은 914 초이며, 한 쌍 액적의 평균 총 증발시간은 각각 1169 초($L = 3.7 \text{ mm}$), 983 초($L = 4.2 \text{ mm}$)로 나타났다. 한 쌍 액적은 단일 액적에 비해 증발시간이 증가하며, 인접한 거리가 가까울수록 증발률이 감소한다. 이것은 액적의 인접한 영역에서 증기가 축적되어 국부적으로 증발률을 감소시키는 증기 차폐에 의한 영향으로 판단된다^(10,11). 또한, 일반적으로 알려진 단일 액적의 접촉선 거동과 유사하게 액적은 고착 직후 피닝(Pinning) 상태를 유지하며, 일정 시간이 지난 후 디피닝(Depinning)되는 것을 알 수 있다⁽¹⁵⁾.

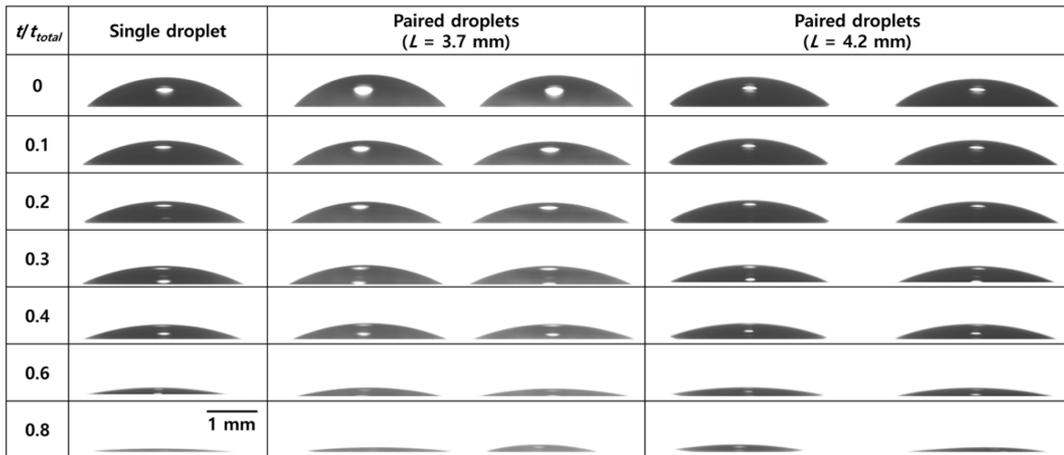


Fig. 3 Side-view images of a single droplet and paired droplets

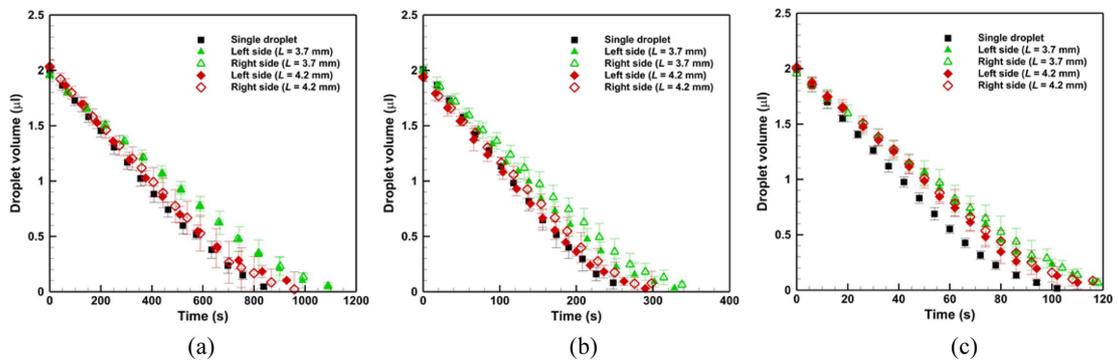


Fig. 4 Droplet volume variations at different substrate temperatures: (a) 24°C , (b) 40°C , and (c) 60°C

Figure 4는 단일 액적과 한 쌍 액적의 표면 온도 변화에 따른 액적의 체적 변화를 나타낸다. 표면 온도가 증가함에 따라 액적의 증발시간이 점차 감소하는 것을 확인할 수 있다. 표면 온도가 40°C인 경우, 단일 액적의 총 증발시간은 262 초이며, 한 쌍 액적의 평균 총 증발시간은 각각 340 초($L=3.7$ mm), 300 초($L=4.2$ mm)로 나타났다. 또한, 표면 온도가 60°C인 경우 단일 액적의 총 증발시간은 106 초이며, 한 쌍 액적의 평균 총 증발시간은 각각 120 초($L=3.7$ mm), 117 초($L=4.2$ mm)로 나타났다. 고체 표면의 온도가 증가하더라도 한 쌍 액적의 경우, 단일 액적에 비해 상대적으로 총 증발시간은 증가하게 된다. 그러나 표면 온도가 증가함에 따라서 단일 액적과의 증발시간 차이는 점점 감소한다. 표면 온도가 40°C인 경우, 인접한 거리에 따라 총 증발시간은 각각 29.8%, 14.5% 로 증가하였고, 표면 온도가 60°C인 경우에는 각각 13.2%, 10.3% 만큼 증가하였다. 이러한 현상은 고체표면 온도가 증가함에 따라 부력에 의한 자연대류의 영향이 증가하기 때문이다. 다시 말해, 표면 온도가 증가함에 따라 증기 축적에 의한 영향을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

단일 액적과 한 쌍 액적의 접촉선 거동을 정량적으로 비교하기 위해 촬영한 이미지를 후처리 하여 접촉 직경과 접촉각을 분석하였다. 고체 표면 위에 고착된 액적은 $Bo = \rho g h R / \gamma > 0.25$ 보다 작은 경우, 구형 캡(Spherical cap) 형상으로 가정할 수 있다⁽¹⁶⁾. 여기서, ρ 는 액체의 밀도, g 는 중력가속도, h 는 액적의 초기 높이, R 은 액적의 초기 접촉 반지름, γ 는 액체의 표면장력을 나타낸다. 단일 액적과 다중 액적의 경우, $Bo = 0.1 \sim 0.11$ 의 범위 내에 있기 때문에 본 연구에서는 구형 캡 형상으로 가정하였다. Fig. 5는 표면 온도 변화에 따른 단일 액적과 한 쌍 액적의 접촉 직경 변화를 나타낸다.

단일 액적과 한 쌍 액적은 증발하는 동안 피닝 상태를 유지하다가 디피닝 되는 것을 알 수 있으며, 이러한 물리 현상은 표면 온도의 증가와 상관없이 나타남을 확인하였다. 단일 액적과 다중 액적이 상온의 커버슬립 표면에서 증발하는 경우 피닝 시간(t_{pin})과 총 증발시간(t_{total})의 비율은 약 $t_{pin}/t_{total} = 0.6 \sim 0.7$ 을 나타내는 것으로 알려져 있다^(11,15). 이러한 경향은 표면온도가 증가하더라도 유사하게 나타났으며, Fig. 5에서 단일 액적과 한 쌍 액적의 경우 표면 온도에 관계없이 피닝 시간과 총

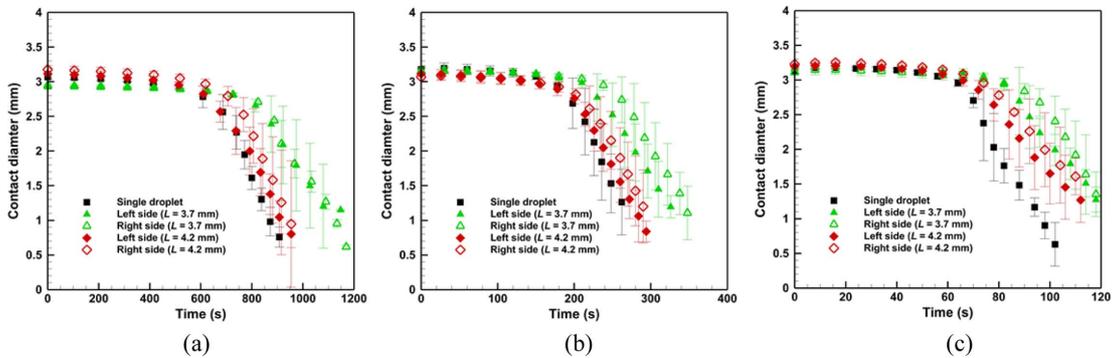


Fig. 5 Evolution of contact diameter for the cases of (a) 24°C, (b) 40°C, and (c) 60°C

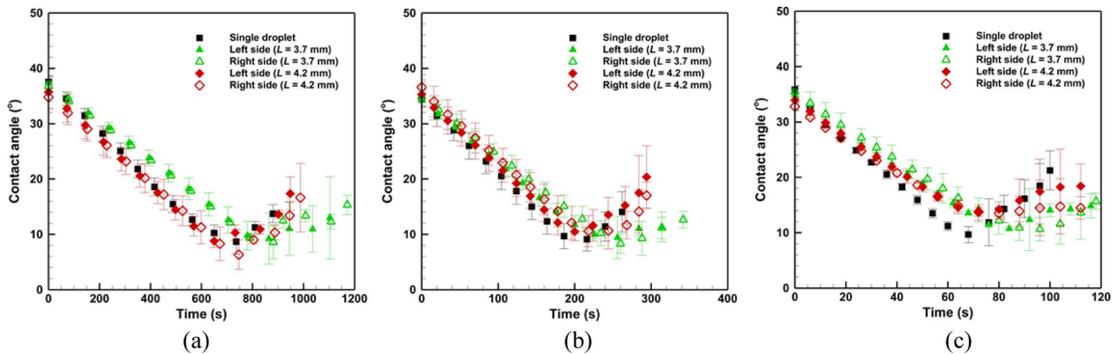


Fig. 6 Contact angle variation of evaporating droplets at different substrate temperatures: (a) 24°C, (b) 40°C, and (c) 60°C

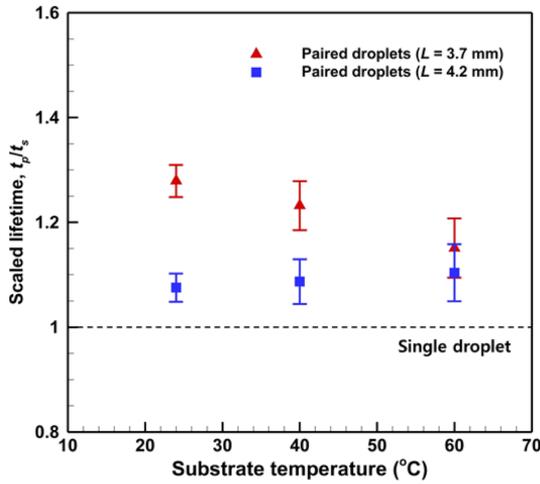


Fig. 7 Scaled lifetime of paired droplets

증발시간의 비율은 약 $t_{pin}/t_{total} = 0.6\sim 0.7$ 의 범위인 것을 알 수 있다. Fig. 6은 단일 액적과 한 쌍 액적의 접촉각 변화를 나타낸다. 고체 표면위에 액적을 고착한 이후 접촉 직경은 일정하게 유지되고 접촉각은 서서히 감소하므로, 일정한 접촉 반경(CCR: constant contact radius) 모드로 볼 수 있다. 디피닝이 발생한 직후에는 액적의 직경이 급격하게 감소하고 액적의 접촉각은 증가하게 된다. 이것은 표면 온도와 한 쌍 액적의 인접거리에 관계없이 동일하게 나타난다. 즉, 액적 사이에 증기 축적으로 인해 증발 속도는 감소하지만, 액적의 접촉선 거동에는 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다.

한 쌍 액적의 표면 온도 변화에 따른 단일 액적과의 증발률을 비교하기 위해 액적 생애시간(Droplet lifetime)을 비교하였다. Fig. 7에서 나타난 한 쌍 액적의 lifetime은 단일 액적의 총 증발시간을 이용하여 정규화되었고, 한 쌍 액적의 총 증발시간(t_p)과 단일 액적의 총 증발시간(t_s)의 비율로 정의한다. 액적 사이의 증기 축적으로 인한 국부적인 증발 유속 감소로 인해서 액적의 인접한 거리가 감소함에 따라 lifetime이 증가함을 알 수 있다^(10,11). 그러나, 액적의 인접한 거리가 3.7 mm인 경우, 표면 온도가 증가함에 따라서 lifetime이 점점 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이것은 액적의 인접한 거리가 가까울수록 액적 사이에 증기 축적으로 인해서 국부적인 증기의 밀도가 증가하고, 표면 온도 차이에 의한 부력으로 인해 증발된 증기가 대기중으로 빠르게 전달되기 때문이다. 본 연구 결과는 가열된 표면에서 한 쌍 액적에 대한 증발 특성을 비교하였으며, 향후 분무 냉각 및 표면 코팅 분야에

기초 연구로서 기여할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 가열된 표면에서 단일 액적과 한 쌍 액적의 증발 특성을 분석하고 액적 간 거리와 고체 표면 온도 변화에 따라 접촉선 거동과 lifetime을 정량적으로 비교 분석하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 한 쌍 액적은 단일 액적에 비해 증발시간이 증가하며, 인접한 거리가 감소할수록 액적의 증발률은 감소하게 된다. 이것은 액적 사이의 증기 축적으로 인해 국부적인 증발률이 감소하기 때문이다.

(2) 단일 액적과 한 쌍 액적의 경우, 인접한 거리와 표면 온도에 관계없이 고착 직후 pinning현상이 발생함을 관찰하였고, 두 경우 모두 depinning이 발생하는 시점은 $t_{pin}/t_{total} = 0.6\sim 0.7$ 로 유사하게 나타남을 확인하였다.

(3) 액적의 인접한 거리가 가까울수록 scaled lifetime은 증가하고, 표면 온도가 증가함에 따라서 lifetime이 감소한다. 이것은 밀도 차이에 의해 발생하는 부력으로 인해 자연대류의 영향이 증가하기 때문이다.

후 기

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 연구임(No. NRF-2021R1A2C3014510). 또한, 본 연구는 산업통상자원부 에너지수요관리핵심기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 한국에너지기술평가원의 연구비 (과제번호: 20212020800270) 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) D.Y. Zang, S. Tarafdar, Y.Y. Tarasevich, M.D. Choudhury, T. Dutta, "Evaporation of a droplet: from physics to applications", Physics Reports, Vol. 804, 2019, pp. 1~56.
- (2) K.S. Kolegov, L.Y. Barash, "Applying droplets and films in evaporative lithography", Adv. Colloid Interface Sci., Vol. 285, 2020, pp. 102271.
- (3) M. Parsa, S. Harmand, K. Sefiane, "Mechanisms of pattern formation from dried sessile drops", Adv. Colloid

- Interface Sci., Vol. 254, 2018, pp. 22~47.
- (4) Z. Wang, D. Orejon, Y. Takata, K. Sefiane, "Wetting and evaporation of multicomponent droplets", Physics Reports, Vol. 960, 2022, pp. 1~37.
- (5) J.M. Stauber, S.K. Wilson, B.R. Duffy, K. Sefiane, "Evaporation of droplets on strongly hydrophobic substrates", Langmuir, Vol. 31, 2015, pp. 3653~3660.
- (6) S. Dash, S.V. Garimella, "Droplet evaporation on heated hydrophobic and superhydrophobic surfaces", Physical Review E, Vol. 89, 2014, pp. 042402.
- (7) B. Sobac, D. Brutin, "Thermal effects of the substrate on water droplet evaporation", Physical Review E, Vol. 86, 2012, pp. 021602.
- (8) Z.H. Pan, J.A. Weibel, S.V. Garimella, "Transport mechanisms during water droplet evaporation on heated substrates of different wettability", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 152, 2020, pp. 119524.
- (9) A.J. Shaikkea, S. Basu, "Insight into the evaporation dynamics of a pair of sessile droplets on a hydrophobic substrate", Langmuir, Vol. 32, 2016, pp. 1309~1318.
- (10) S. Hatte, K. Pandey, K. Pandey, S. Chakraborty, S. Basu, "Universal evaporation dynamics of ordered arrays of sessile droplets", J. Fluid Mech., Vol. 866, 2019, pp. 61~81.
- (11) H.J. Lee, C.K. Choi, S.H. Lee, "Vapor-shielding effect and evaporation characteristics of multiple droplets", Int. Commun. Heat Mass Transf., Vol. 144, 2023, pp. 106789.
- (12) A.W. Wray, P.S. Wray, B.R. Duffy, S.K. Wilson, "Contact-line deposits from multiple evaporating droplets", Phys Rev Fluids, Vol. 6, 2021, pp. 073604.
- (13) H. Chen, Q.R. An, H.Y. Zhang, C.S. Li, H.S. Fang, Z.P. Yin, "Predicting the lifetimes of evaporating droplets in ordered arrays", Physics of Fluids, Vol. 34, 2022, pp. 082010.
- (14) D.J. Fairhurst, "Predicting evaporation rates of droplet arrays", J. Fluid Mech., Vol. 934, 2022, pp. F1-1~F1-4.
- (15) D.H. Shin, S.H. Lee, J.Y. Jung, J.Y. Yoo, "Evaporating characteristics of sessile droplet on hydrophobic and hydrophilic surfaces", Microelectron. Eng., Vol. 86, 2009, pp. 1350~1353.
- (16) R.G. Larson, "Transport and deposition patterns in drying sessile droplets", AIChE J., Vol. 60, 2014, pp. 1538~1571.