

< 논문 >

미세액적의 형상이 증발에 미치는 효과

송현수* · 이용구* · 진송완** · 유정열†
(2007년 2월 7일 접수, 2007년 5월 4일 심사완료)

The Effect of Microdroplet Shape on the Evaporation

Hyunsoo Song, Yongku Lee, Songwan Jin and Jung Yul Yoo

Key Words : Microdroplet(미세액적), Evaporation(증발), Contact Angle(접촉각), Marangoni Flow(마랑고니 유동), Coffee Stain Effect(커피 얼룩 효과)

Abstract

Many studies of microdroplet evaporation from solid surfaces were made with priority given to inkjet printing and dye painting techniques. The objective of these studies is how to evaporate a droplet quickly and uniformly. Also it is necessary to prevent evaporation of a droplet to observe cells in a droplet generated through cell-patterning. In general, an identical volume of a water droplet on hydrophobic surfaces evaporates slower than that on hydrophilic surfaces. In this study, we observe the evaporation process of a droplet on various hydrophobic surfaces and calculated the evaporation rate considering the droplet geometry such as contact angle and height. This study also proposes a new model based on the fact that evaporation mode at the edge of a droplet is different from that at the outer surface of a droplet as the contact angle changes during evaporation. Finally, we reveal the cause for the increase of evaporation flux and show that the ratio of edge evaporation to total evaporation increases with time.

기호설명

A : 대기 중에 노출된 액적의 표면적
 c : 수증기 농도
 c_s : 액적 표면의 수증기 농도
 c_∞ : 대기의 수증기 농도
 D : 수증기 확산계수
 h : 액적의 높이
 J_s : 액적 표면에서의 단위면적당 증발률

J_e : 액적 가장자리에서의 단위면적당 증발률
 $(J_e - J_s) \cdot \lambda$: 액적 접촉선의 단위길이당 증발률
 L : 액적 접촉선의 길이
 m : 액적의 질량
 Q : 증발률
 Q/A : 단위표면적당 증발률
 R : 액적 표면의 곡률 반경
 r : 액적 표면의 곡률 반경방향 거리
 S : 액적 가장자리 부근을 제외한 표면적
 V : 액적의 부피

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부, 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

E-mail: jyyoo@snu.ac.kr

TEL: (02) 880-7112 FAX: (02) 883-0179

* 서울대학교 기계항공공학부

** University of California, San Francisco

그리스문자

γ_e : 액적 전체 증발량에 대한 가장자리 증발량의 비율
 θ : 접촉각
 λ : 액적 가장자리의 영향을 받는 특성 길이

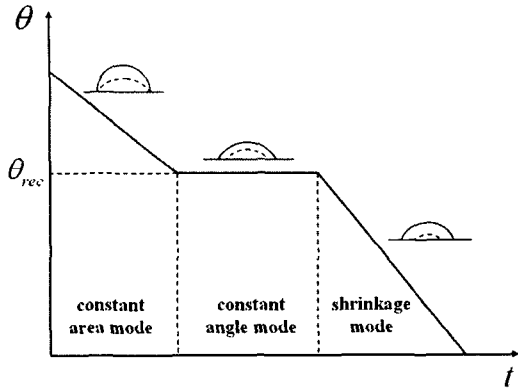


Fig. 1 Three steps of the sessile droplet evaporation

1. 서론

액적의 증발은 오래 전부터 현상학적으로 흥미로운 문제로 다루어져 왔으며, 최근에는 공학적으로도 널리 응용되고 있다. 액적과 관련되어 많은 연구가 이루어진 잉크젯 프린팅(inkjet printing) 기술 분야에서는 액적을 빠르게 증발시키는 것이 중요한 목적이며, 자동차나 선박과 같은 제품에 염료를 페인팅(painting) 할 때는 미세한 액적이 스프레이(spray) 형태로 분사되는데, 이 때 액적이 균일하게 증발해야 표면에 얼룩이 남지 않는다.⁽¹⁾ 또한 최근 활발히 연구되고 있는 세포 패터닝(cell patterning)에서는 세포의 주변 환경을 일정하게 유지하기 위해서 액적의 증발을 억제할 필요가 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 고체 표면 위에 존재하는 액적의 증발 현상을 이해하는 것이 매우 중요하다.⁽²⁾

액적의 증발에 영향을 주는 여러 요인은 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 우선, 대기의 습도, 온도, 압력과 같은 액적 주변 기체의 성질, 그리고 액적의 점도, 휘발성과 같은 액체 고유의 성질, 마지막으로 소수성(hydrophobicity), 친수성(hydrophilicity)과 같이 액적이 부착된 고체 표면의 성질이다.⁽²⁾ 그러나 이러한 성질 중 대기의 습도와 온도 등은 제어하기가 매우 어려우며 습도가 높을수록, 온도가 낮을수록 증발이 천천히 일어난다는 사실은 널리 알려져 있다.

Picknett 과 Bexan⁽³⁾은 고체 표면 위 액적의 증발 과정을 크게 3 단계로 구분하였다. 첫 번째 단계는 3 상접점으로 이루어진 접촉선(TCL, three-phase contact line)은 고정(pinning)되고 접촉각(contact angle)만 감소하는 일정 접촉면적 단계(constant area mode), 두 번째 단계는 접촉각은 일

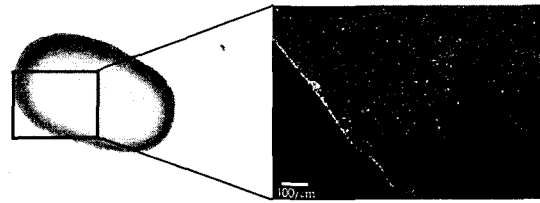


Fig. 2 Coffee stain effect. Particles move to the edge of droplet during evaporation

정하게 유지되고 접촉선만 줄어드는 일정 접촉각 단계(constant angle mode), 그리고 마지막 단계는 액적의 접촉각과 접촉선이 모두 감소하는 수축단계(shrinkage mode)이다(Fig. 1).^(2, 4) 전체 증발 과정에서 일정 접촉면적 단계와 일정 접촉각 단계가 각각 차지하는 비율은 이력현상(hysteresis)에 의해 결정되는데, 이력현상이 큰 경우에는 평형 접촉각(equilibrium contact angle)과 후진 접촉각(receding contact angle)의 차이 역시 크기 때문에 일정 접촉면적 단계가 지배적이라 할 수 있다. 즉, 액적의 증발 과정 중 접촉각이 후진 접촉각과 같아질 때까지 접촉면적이 거의 줄어들지 않는다. 일반적으로 접촉각이 클수록, 표면의 동질성(homogeneity)이 높을수록, 거칠기(roughness)가 작을수록 이력현상이 작다.⁽⁵⁾

액적의 접촉각이 90° 이하인 경우 액적의 기하형상,⁽⁶⁾ 액적 주변의 습도 차이⁽⁷⁾ 등으로 인해 액적의 표면보다 가장자리에서 증발이 활발히 일어난다. 이 현상의 예로 일상 생활에서 쉽게 볼 수 있는 커피 얼룩(coffee stain)을 들 수 있다(Fig. 2).⁽⁸⁾ 커피가루와 같은 작은 입자가 포함된 액적이 증발하여 표면에 얼룩이 남을 때, 얼룩의 가장자리가 가운데 부분보다 더 진한 것을 볼 수 있다. 이는 증발이 활발히 일어나는 가장자리에서 발생하는 손실을 보충하기 위해 중앙에서 원주 방향으로 마랑고니 유동(Marangoni flow)이 생기고 입자 역시 유동을 따라 가장자리로 이동하였음을 의미한다.

Rowan 등⁽⁹⁾은 액적 표면에서 반경 방향으로 균일한 증발이 일어난다고 가정한 후 시간에 따른 접촉각의 변화를 예측하였고, Bourges-Monnier 와 Shanahan⁽¹⁰⁾은 액적 표면에서의 증발이 주변 대기 전체로 균일하게 일어난다고 가정한 후 반구형상의 액적 증발 모델을 제안하였다. Erbil 등⁽¹¹⁾은 액적의 증발 과정 중 일정 접촉각 단계에서 액적의 접촉 반지름의 제곱이 시간에 비례하여 감소함을 실험으로 확인하였다. 그러나 이와

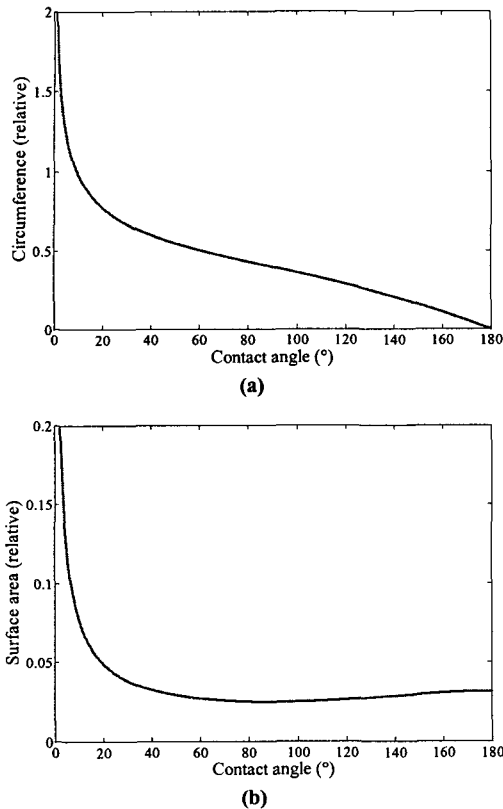


Fig. 3 (a) Circumference and (b) surface area vs. contact angle for volume fixed droplets

같은 기존의 연구에서는 여러 가지 증발 모형을 제시하였으나 증발률 계산에 가장자리에서의 증발 효과를 고려하지 않았다는 한계점이 있다.⁽⁹⁻¹¹⁾

따라서 본 연구에서는 접촉각으로 표현되는 고체 표면의 성질을 고려하여 다양한 소수성 표면 위에서 초순수(deionized water) 액적의 증발 과정을 촬영하고 증발량을 계산하기 위하여 가장자리에서의 증발 효과를 고려한 새로운 모델을 제안한다. 그리고 그 모델을 이용하여 실험 결과를 분석하며 액적의 증발 조건에 대하여 토의하고자 한다.

2. 이론적 배경

부피는 같지만 접촉각이 다른 두 액적의 증발 양상을 살펴보면 접촉각에 따른 액적의 기하형상이 증발에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 우선 액적과 대기 사이의 표면적이 넓을수록 액체와

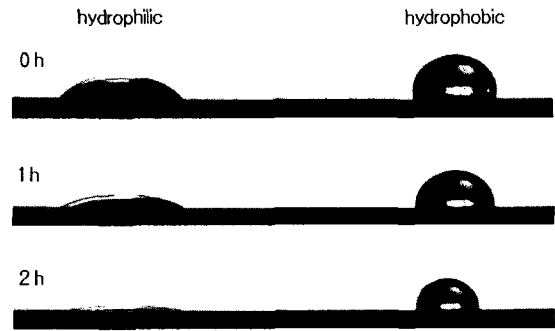


Fig. 4 Simple evaporation test on hydrophilic (contact angle = 40°) and hydrophobic (contact angle = 100°) surfaces

기체 분자가 반응 면적이 넓기 때문에 증발이 빨리 일어남을 예상할 수 있다. 그리고 서론에서 언급하였듯이 액적 가장자리에서의 증발은 표면에서의 증발과 다른 양상으로 나타난다.

2.1 액적의 접촉각

고체 표면 위의 액적은 부피가 같더라도 접촉각에 따라 접촉선의 길이와 대기 중에 노출된 표면적이 다르다. Fig. 3 은 액적의 부피를 일정하게 고정하고 접촉각을 변화시킬 때, 접촉선 길이와 표면적을 계산한 결과이다. 접촉각이 증가함에 따라 접촉선의 길이는 감소하는 반면에, 표면적은 접촉각이 90° 가 될 때까지 감소하다가 90° 이상에서는 서서히 증가함을 알 수 있다.

Figure 4 는 친수성 표면과 소수성 표면이라는 점을 제외한 모든 초기 조건이 동일한 두 액적의 증발 과정을 동시에 촬영한 것이다. 친수성 표면 위의 액적이 소수성 표면 위의 액적보다 더 빨리 증발함을 볼 수 있다. 그 이유는 접촉각의 차이에서 기인하는 액적 형상의 차이가 증발에 영향을 주었기 때문이다.

2.2 액적의 크기

고체 표면 위 액적이 어떤 크기보다 작으면 액적의 형상은 구의 일부(spherical cap)로 가정할 수 있다. 그 이유는 액적의 표면적이 액적과 대기의 계면에너지(interfacial energy)를 최소화 하기 위해 가급적 작아지려는 경향이 있고, 액적과 바닥면 사이의 표면장력에 의해 접촉각이 정해지면 계면을 이루는 최소 면적은 기하학적으로 항상 구의 일부이기 때문이다. 이 때 중력의 영향으로 정확한 원이 되지 않을 수 있는데, 일반적으로 표면장

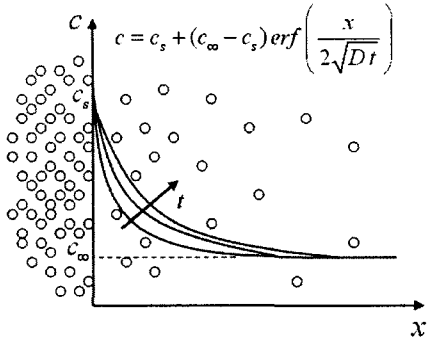


Fig. 5 Transient process of vapor diffusion in semi-infinite space

력과 중력의 비인 본드수(Bond number)가 작을수록 액적의 표면이 구의 일부분에 가깝다.⁽⁷⁾

$$Bo = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d^2}{\sigma} \quad (1)$$

$\Delta\rho$ 는 대기와 액적의 밀도차, g 는 중력 가속도, d 는 액적의 직경, σ 는 표면장력이며, 물로 이루어진 액적의 경우, 지름이 약 2 mm 이하이면 구의 일부로 가정할 수 있다.

3. 모델링

대기 중에서 액적의 증발을 확산(diffusion) 현상의 관점에서 보면 픽의 법칙(Fick's law)에 따라

$$Q = -D \cdot A \cdot \nabla c \quad (2)$$

로 표현된다. Q 는 증발률, D 는 대기 중에서의 수증기 확산계수, A 는 대기에 노출된 액적의 표면적, c 는 수증기 농도이다. 수증기 전달의 매개체인 대기가 무한하다고 가정하면 이는 열전달 분야에서 널리 알려진 반무한 열전도 문제(semi-infinite conduction problem)와 유사하다. 이 문제에 대한 온도 분포는 다음과 같이 알려져 있다.

$$T = T_s + (T_i - T_s) \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \quad (3)$$

T_s 는 표면 온도, T_i 는 열전도가 일어나기 전의 온도, x 는 열전도 방향으로의 길이, α 는 열확산 계수, t 는 열전도 시간이다. 열전도와 확산이 현상학적으로 유사한 과정임을 고찰하면 수증기의

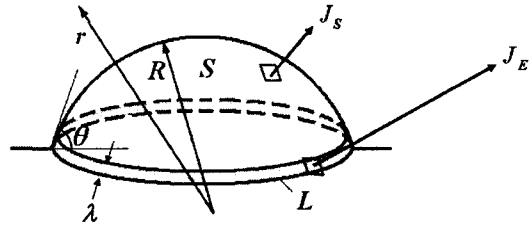


Fig. 6 Schematic of droplet evaporation model, $A = S + \lambda \cdot L$. Magnitude of arrow indicates evaporation flux

농도 분포는 다음과 같이 나타낼 수 있다.(Fig. 5)

$$c = c_s + (c_\infty - c_s) \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (4)$$

c_s 는 액적 표면에서의 수증기 농도로서 100%라 가정하고 c_∞ 는 대기에서의 수증기 농도이다. x 는 수증기 확산 방향으로의 길이, t 는 액적의 증발 시간이다.

식 (4)에서 위치 x 에서의 수증기 농도 c 는 시간 t 에 따라 결정되므로 비정상 상태 문제(unsteady state problem)이지만, 일반적으로 대류가 없는 대기 중에서 액적의 증발은 비교적 천천히 일어나므로 준평형(quasi-equilibrium)의 정상 상태 문제(steady state problem)로 가정할 수 있다. 이는 물질 대류와 물질 확산의 비인 피클렛수(Peclet number)가 1 보다 매우 작을 경우 타당한 것으로 알려져 있는데, 대류가 무시할 수 있을 만큼 작은 경우 대기의 유동 속도 U 는 매우 작으므로 피클렛수 역시 0에 수렴한다.⁽¹²⁾

$$Pe_D = \frac{UL}{D} = O(10^{-9}) \ll 1 \quad (5)$$

Hu와 Larson 등은 접촉각이 90° 이하일 때 가장자리에서의 증발률과 표면에서의 증발률의 차이가 불연속적임을 수치적으로 계산하였다.^(7,13) 이는 액적의 전체 증발량을 액적의 표면과 가장자리 부분으로 나누어 독립적으로 계산할 수 있음을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 6과 같이 액적의 전체 증발량을 표면과 가장자리 부로 나누어 각각의 증발량을 계산한 다음 더하는 방법으로 다음과 같은 식을 제안한다.

$$Q = J_s \cdot S + J_E \cdot \lambda \cdot L = J_s \cdot A + (J_E - J_s) \cdot \lambda \cdot L \quad (6)$$

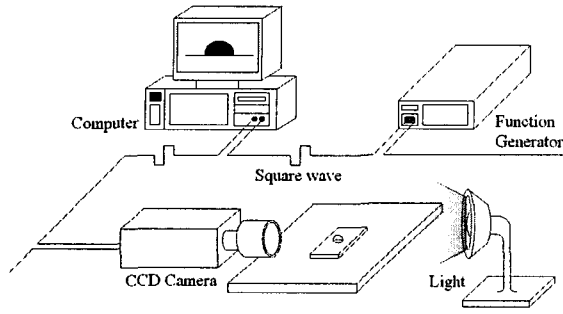


Fig. 7 Schematic of experimental set up

$$J_s = -D \cdot \left(\frac{dc}{dr} \right)_s = \text{constant, independent of } \theta$$

$$J_E = -D \cdot \left(\frac{dc}{dr} \right)_E, \text{ function of } \theta$$

L 은 접촉선의 길이, λ 는 가장자리의 영향을 받는 특성 길이(characteristic length of edge effect)로 액적의 반지름에 비하여 매우 짧아 수 nm ~ μm 의 차원이며 접촉각에 따라 다른 값을 갖는다. J_s 은 액적 표면에서의 단위면적당 증발률, J_E 는 액적 가장자리에서의 단위면적당 증발률이다.

액적 표면에서 특정한 방향 없이 무작위적으로 일어나는 증발이 반경 방향으로 일어나는 증발에 비해 무시할 수 있을 만큼 작다고 가정하면 Q_s 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Q = J_s \cdot (A - \lambda \cdot L) + J_E \cdot \lambda \cdot L$$

$$= J_s \cdot A + (J_E - J_s) \cdot \lambda \cdot L \quad (7)$$

$$= 2\pi R \cdot D \cdot (1 - \cos \theta) \cdot (c_s - c_\infty) + (J_E - J_s) \cdot \lambda \cdot L$$

$$= 4\pi R \cdot D \cdot (c_s - c_\infty) \cdot \left\{ \frac{1 - \cos \theta}{2} + \frac{(J_E - J_s) \cdot \lambda \cdot L}{4\pi R \cdot D \cdot (c_s - c_\infty)} \right\}$$

$$= 4\pi R \cdot D \cdot (c_s - c_\infty) \cdot f(\theta)$$

Rowan 등은 접촉각에 상관없이 액적 가장자리에서 증발과 액적 표면에서의 증발이 같다고 가정하여 $f(\theta) = (1 - \cos \theta)/2$ 을 제안하였다.⁽⁹⁾ 한편 Erbil 등⁽¹¹⁾ 은 Rowan 등의 결과가 접촉각 90° 이하에서는 (-) 오차를 갖고 90° 이상에서는 (+) 오차가 나타난다는 것을 실험적으로 밝혔다. 액적 표면에서의 단위면적당 증발률(J_s)은 접촉각에 상관없이 일정한 반면에 액적의 접촉각이 90° 이하일 때는 가장자리에서의 단위면적당 증발률(J_E)이 액적 표면에서의 단위면적당 증발률(J_s)보다 더 높

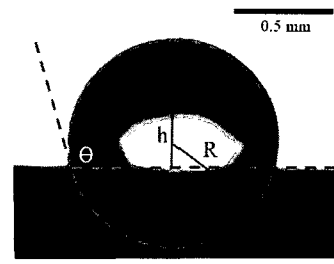


Fig. 8 Circle and line fitting from real image

고 90° 일 때는 같으며,⁽⁷⁾ 90° 이상일 때는 오히려 액적 표면보다 가장자리에서의 단위면적당 증발률이 더 낮다. 따라서 식 (7)에 따르면 접촉각 90° 이하에서는 가장자리에서의 증발이 전체 증발에 (+) 효과를 나타내고 90° 이상에서는 (-) 효과를 나타내므로 Rowan 등의 오차를 설명할 수 있으며,⁽¹⁴⁾ 이를 다음과 같이 수식화할 수 있다.

- (i) $\theta < 90^\circ$
 $J_E > J_s, Q_E > 0$ Positive edge effect
- (ii) $\theta = 90^\circ$
 $J_E = J_s, Q_E = 0$ Zero edge effect
- (iii) $\theta > 90^\circ$
 $J_E < J_s, Q_E < 0$ Negative edge effect

4. 실험장치 및 방법

소수성 표면인 polydimethylsiloxane(PDMS), 파라필름(parafilm), 테플론(Teflon) 위에 초순수로 만든 약 $2 \mu\text{L}$ 의 미세 액적을 떨어뜨렸다. 그리고 역광(back light)을 비춘 상태에서 30 min 동안 20 s 간격으로 액적의 단면을 촬영하였으며, 주변 대기의 온도는 $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, 상대 습도는 $19\% \pm 1\%$ 로 일정하게 유지하였다.(Fig. 7) PDMS, 파라필름, 테플론 위 액적의 접촉각은 약 100° 로 알려져 있으며, 초기 접촉각이 같더라도 이력현상에 의해 표면에 따라 증발 양상은 다르게 나타난다.

$$\theta = \arccos \left(\frac{R-h}{R} \right)$$

$$L = 2\pi R \sin \theta$$

$$A = 2\pi R^2 (1 - \cos \theta) \quad (8)$$

$$V = \frac{\pi}{3} R^3 (1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta)$$

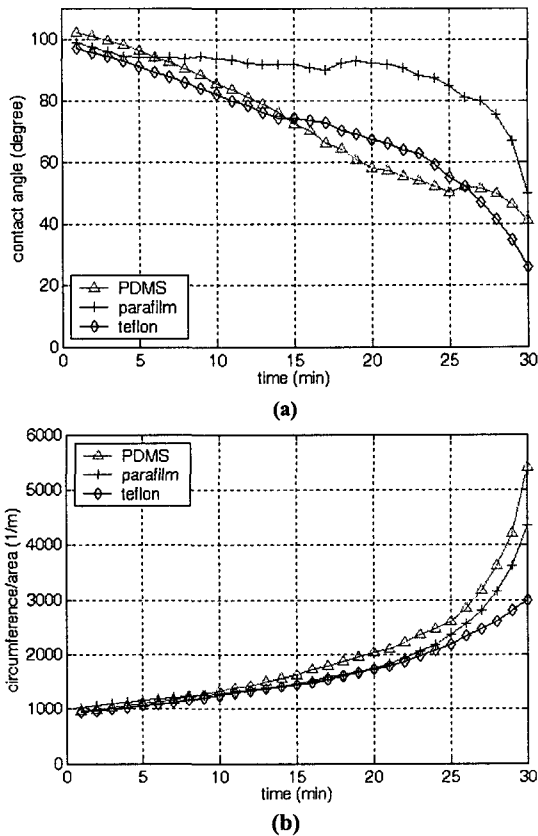


Fig. 9 Variation of the geometry during evaporation of droplet on hydrophobic surfaces: (a) Contact angle, (b) Circumference per unit surface area

Matlab 으로 자체 개발한 프로그램을 이용하여 촬영된 이미지로부터 액적 표면과 대기 사이의 5 개의 경계점, 고체 표면과 대기 사이의 6 개의 경계점을 얻었다. 이를 각각 원과 직선으로 근사(fitting)하여 액적의 곡률반경 (R)과 액적의 높이 (h)를 구하고(Fig. 8), 기하형상을 이용한 식 (8)로부터 접촉각 (θ), 접촉선의 길이(L), 표면적(A), 부피(V) 등을 계산하였다. 그리고 부피의 변화를 3 차 다항식의 회기 곡선으로 근사한 후 미분하여 시간에 따른 증발률(Q)을 구하였다.

5. 실험 결과 및 고찰

액적 표면의 곡률이 증발에 미치는 영향은 고려하지 않아도 되는데, 그 이유는 다음과 같다.

첫째, 곡면으로 인한 물 분자 사이의 구조 변화가 증발에 미치는 영향은 물 분자와 곡률 반경 사이의 상대적인 크기로부터 고려할 수 있다. 수 μm 의 액적이라 하더라도 물 분자($\sim\text{nm}$)에 비해

곡률반경($\sim\mu\text{m}$)이 매우 크므로 평면의 물 분자의 경우와 크게 다르지 않다.

둘째, 곡률에 따른 액적 내부와 외부 압력 차이는 영-라플라스 방정식(Young-Laplace equation)에 의해 곡률과 표면 장력으로부터 계산할 수 있다. 이 때 계산된 압력 차이는 증발에 영향을 미치는 압력의 차원 $O(10\text{ kPa})$ 보다 매우 작다.⁽¹³⁾ 곡률 반경이 1 mm 인 액적에 대해 계산한 결과는 다음과 같다.

$$\Delta P = \sigma \cdot \kappa = \sigma \cdot \frac{2}{R} \quad (9)$$

$$= 0.073 \cdot 2 \cdot 1000 = 146\text{ Pa} \ll 10\text{ kPa}$$

ΔP 는 액적 내부와 외부의 압력 차이, κ 는 액적의 곡률이며, 위 결과로부터 액적 표면의 곡률이 증발에 미치는 영향은 무시할 수 있다.

5.1 액적의 형상

Figure 9(a)는 PDMS, 파라필름, 테플론 위 액적의 증발에 따른 접촉각 변화를 보여준다. 초기 접촉각은 약 100° 로 모두 비슷하지만 액적이 증발함에 따라 PDMS 와 테플론 위 액적의 접촉각은 거의 일정하게 감소하고 이력현상이 작은 파라필름 위 액적의 접촉각은 비교적 천천히 감소하였다. 이러한 접촉각의 차이가 접촉선과 표면적과 같은 액적의 형상을 변화시키고, 궁극적으로 증발에 영향을 줄 것이라 예상할 수 있다.

Figure 9(b)는 액적의 단위면적당 접촉선의 길이 변화를 보여준다. 세 경우 모두 비슷한 양상을 보이며 지수적으로 증가한다. 표면적은 길이의 제곱 차원이기 때문에 액적의 크기가 작아질수록 표면적 대 접촉선 길이의 비율이 증가함을 확인할 수 있다.

5.2 액적의 단위면적당 증발률

식 (6)을 액적의 표면적 A 로 나누면 단위면적당 증발률에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{Q}{A} = J_s + (J_e - J_s) \cdot \lambda \cdot \frac{L}{A} \quad (10)$$

식 (10)에서 액적 표면에서의 단위면적당 증발률 (J_s)은 일정한 반면에 액적이 증발함에 따라 접촉각이 작아질수록 가장자리에서의 단위길이당 증발률($(J_e - J_s) \cdot \lambda$)은 증가한다(edge effect). 그리고 Fig. 9(b)에서 볼 수 있듯이 증발에 의해 액적의 크기가 작아질수록 단위면적당 접촉선의 길이(L/A) 역시 증가한다(size effect). 이 두 값의 증가로 인해

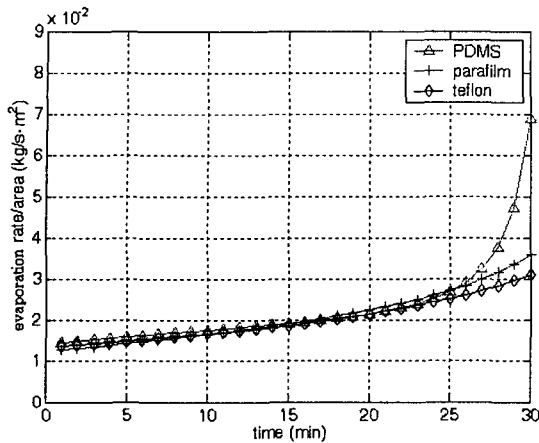


Fig. 10 Evaporation rate per unit surface area during evaporation of droplet on hydrophobic surfaces.

단위면적당 증발률 (Q/A) 역시 증가함을 예상하였고 Fig. 10을 통해 확인할 수 있다.

세 표면 위의 액적 모두 단위면적당 증발률이 초반에는 천천히 증가하다가 후반에는 급격하게 증가한다. 특히 증발 후반에는 단위면적당 증발률이 PDMS, 파라필름, 테플론의 순서대로 높은데 이는 Fig. 9(b)에서 액적 표면의 단위면적당 접촉선 길이의 순서와 일치한다.

5.3 액적의 증발 억제

식 (6)에서 증발률(Q)은 액적 표면에서의 단위면적당 증발률(J_s), 액적의 표면적(A), 가장자리에서의 단위길이당 증발률($(J_e - J_s) \cdot \lambda$), 접촉선 길이(L)의 함수이며, J_s 는 접촉각과 무관하게 일정한 값을 가지므로 친수성 표면에서는 A , $(J_e - J_s) \cdot \lambda$, L 이 작을수록(소수성 표면에서는 $(J_e - J_s) \cdot \lambda$ 가 음수이므로 L 이 클수록), 증발이 천천히 일어난다. 동일한 부피의 액적에 대해 이 세 항은 접촉각의 함수로 결합(coupling)되어 있다.

5.4 액적의 가장자리 효과

가장자리에서의 증발 효과는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\gamma_e = \frac{\text{edge evaporation}}{\text{total evaporation}} = \frac{(J_e - J_s) \cdot \lambda \cdot L}{J_s(A - \lambda \cdot L) + J_e \cdot \lambda \cdot L} \quad (11)$$

전체 증발량 중 가장자리에서 일어나는 증발량의 비율은 Fig. 11와 같이 시간에 따라 증가함을 확인할 수 있다. 비율이 음의 값일 때에는 가장자리

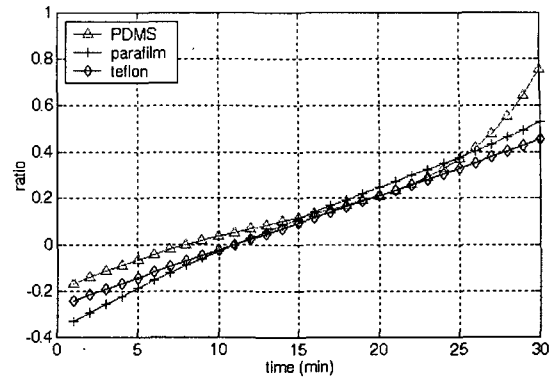


Fig. 11 Ratio of edge evaporation to total evaporation during evaporation of droplet on hydrophobic surfaces.

에서 증발이 더 천천히 일어나고, 0일 때는 접촉각이 90° 부근이어서 가장자리 효과가 나타나지 않음을 의미한다. 또한 증발이 진행되어 접촉각이 감소함에 따라 가장자리에서 일어나는 증발량이 전체 증발량 중 많은 부분을 차지함을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 소수성 표면 위에서 액적의 증발 과정을 관찰하고 기하형상으로부터 증발률을 계산하였다. 그리고 새로 제안한 식으로부터 실험 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

이력 현상에 의한 접촉각의 차이는 액적의 형상을 결정하고, 이러한 기하학적 형상의 차이는 증발에 영향을 준다. 우선 표면 위의 액적이 증발할 때 크기 감소에 의한 효과와 가장자리에서의 증발 효과에 의해 액적 표면의 단위면적당 증발률이 증가한다. 그리고 액적의 표면적이 줄어들수록, 가장자리에서의 증발이 천천히 일어날수록, 친수성 표면에서는 액적 접촉선의 길이가 짧을수록(소수성 표면에서는 액적 접촉선의 길이가 길수록) 증발이 억제되며, 이는 동일한 부피의 액적에 대해 접촉각의 함수로 표현될 수 있다. 마지막으로 액적의 전체 증발은 초반에는 액적 표면에서의 증발에 의해 지배적으로 나타나지만 액적이 증발할수록 점차 액적 가장자리에서의 증발이 지배적으로 나타난다.

후기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-

2005-000-10558-0)와 서울대학교 마이크로 열시스템 연구센터의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Uno, K., Hayashi, K., Hayashi, T., Ito, K., and Kitano, H., 1998, "Particle Adsorption in Evaporating Droplets of Polymer Latex Dispersions on Hydrophilic and Hydrophobic Surfaces," *Colloid Polym. Sci.*, Vol. 276, pp. 810~815.
- (2) Dugas, V., Broutin, J. and Souteyrand, E., 2005, "Droplet Evaporation Study Applied to DNA Chip Manufacturing," *Langmuir*, Vol. 21, pp. 9130~9136.
- (3) Picknett, R. G. and Bexon, R., 1976, "The Evaporation of Sessile or Pedant Drops in Still Air," *J. Colloid and Interface Science*, Vol. 61, No. 2, pp. 336~350.
- (4) Chen, C. T., Tseng, F. G. and Chieng, C. C., 2006, "Evaporation Evolution of Volatile Liquid Droplets in Nanoliter Wells," *Sensors and Actuators A: Physical*, pp. 12~19.
- (5) Soolaman, D. M., and Yu, H. Z., 2005, "Water Microdroplets on Molecularly Tailored Surface: Correlation Between Wetting Hysteresis and Evaporation Mode Switching," *J. Phys. Chem. B*, Vol. 109, pp. 17967~17973.
- (6) Deegan, R. D., Bakajin, O., Dupont, T. F., Huber, G., Nagel, S. R. and Witten, T. A., 2000, "Contact Line Deposits in an Evaporating Drop," *Physical Review E*, Vol. 62, pp. 756~765.
- (7) Hu, H. and Larson, R. G., 2002, "Evaporation of a Sessile Droplet on a Substrate," *J. Phys. Chem. B*, Vol. 106, pp. 1334~1344.
- (8) Deegan, R. D., Bakajin, O., Dupont, T. F., Huber, G., Nagel, S. R., and Witten, T. A., 1997, "Capillary Flow as the Cause of Ring Stains from Dried Liquid Drops," *Nature*, Vol. 389, pp. 827~829.
- (9) Rowan, S. M., Newton, M. I. and McHale, G., 1995, "Evaporation of Microdroplets and the Wetting of Solid Surface," *J. Phys. Chem.*, Vol. 99, pp. 13268~13271.
- (10) Bourges-Monnier, C. and Shanahan, M. E. R., 1995, "Influence of Evaporation on Contact Angle," *Langmuir*, Vol. 11, pp. 2820~2829.
- (11) Erbil, H. Y., McHale, G. and Newton, M. I., 2002, "Drop Evaporation on Solid Surface: Constant Contact Angle Mode," *Langmuir*, Vol. 18, pp. 2636~2641.
- (12) Sultan, E., Boudaoud, A. and Amar, M. B., 2005, "Evaporation of a Thin Film: Diffusion of the Vapour and Marangoni Instabilities," *J. Fluid Mech.*, Vol. 543, pp. 183~202.
- (13) Sefiane, K., 2004, "Effect of Nonionic Surfactant on Wetting Behavior of an Evaporating Drop Under a Reduced Pressure Environment," *J. Colloid and Interface Science*, Vol. 272, pp. 411~419.
- (14) McHale, G., Aqil, S., Shirtcliffe, N. J., Newton, M. I. and Erbil, H. Y., 2005, "Analysis of Droplet Evaporation on a Superhydrophobic Surface," *Langmuir*, Vol. 21, pp. 11053~11060.