

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2017.41.3.205>ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

고온으로 가열된 고체 표면과 충돌하는 타원형 액적의 퍼짐 거동

윤 성 찬*†

* 한국교통대학교 기계자동차항공공학부

Spreading Dynamics of an Ellipsoidal Drop Impacting on a Heated Substrate

Sungchan Yun*†

* School of Mechanical, Automotive and Aeronautical Engineering, Korea Nat'l. Univ. of Transportation

(Received September 23, 2016 ; Revised October 24, 2016 ; Accepted November 12, 2016)

Key Words: Drop Impact(액적 충돌), Ellipsoidal Drop(타원형 액적), Drop Spreading(액적 퍼짐)

초록: 고온으로 가열된 고체 표면 위를 타원형 액적이 충돌할 때, 구형 액적 충돌 거동과 다른 비축대칭적인 퍼짐 거동이 발생하여 반동 높이 조절이 가능하다고 보고되었다. 본 연구에서는 타원형 액적 종횡비가 퍼짐 거동에 미치는 영향을 조사하였다. 충돌 거동은 동기화된 두 대의 고속카메라를 이용하여 두 측면에서 관찰하였고, 액적의 장축과 단축에서의 액적 퍼짐 너비를 각각 조사함으로써 퍼짐 특성을 분석하였다. 실험 결과에서 종횡비가 클수록, 액적 단축의 최대 퍼짐 너비는 증가하는 데 반해, 액적 장축의 것은 큰 변화가 없는 것으로 나타나는 데, 이는 수축 과정에서 액적 정렬을 촉진하고 반동 억제에 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 추가적으로 액적 종횡비와 충돌 속도가 동시에 큰 영역에서 발생하는 반동 거동과 액적 분열 현상에 대하여 고찰하였다.

Abstract: Unlike spherical drop impact, ellipsoidal drop impact can control the bouncing height on a heated surface by significantly altering impact behavior. To scrutinize the effect of the aspect ratio (AR) of the drop on the bounce suppression, in this study, non-axisymmetric spreading behaviors are observed from two side views and characterized based on the spreading width of the drop for horizontal principal axes. In addition, the maximum spreading width is investigated for various ARs. The results show that as the AR increases, the maximum spreading width of the minor axis increases, whereas that of the major axis shows no significant variation. In the regime of high AR and high impact velocity, liquid fragmentations by three parts are observed during bouncing. These fragmentations are discussed in this work. The hydrodynamic features of ellipsoidal drop impact will help understand bouncing control on non-wetting surfaces for several applications, such as self-cleaning and spray cooling.

1. 서 론

액적이 끓는점 이상의 온도로 가열된 고체 표면 위를 충돌할 때 라이덴프로스트(Leidenfrost) 현상⁽¹⁾이 발생하여 반동(bouncing)을 일으킨다. 이 반동은 액체와 고체 사이에 마찰이 없는 얇은 기체 층(vapor cushion)이 형성되어 액적이 고체표면에 거의 접촉하지 않기 때문에 발생한다. 집중 냉각 방식으로 알려진 분무 냉각(spray cooling)의 경우⁽²⁾

비교적 소량의 냉각수 사용, 소형화 가능성, 높은 냉각 효율의 성능을 가지고 있는 반면, 라이덴프로스트 현상이 발생했을 때 냉각 효율이 급격하게 저하되기 때문에 일시적으로 다량의 냉각수가 요구되며, 액적의 무분별한 반동으로 인하여 냉각수 소실이 생기게 된다.

액적의 반동 억제와 관련된 몇 가지 방법들이 제안되었다. 대표적인 방법 중의 하나가 액적에 소량의 폴리머를 첨가하는 방법인데, 소수성 표면 위에 충돌했을 때 액적 반동을 억제할 수 있다고 보고된 바 있다.^(3,4) 하지만 가열된 표면 위에서는 오히려 액적 반동이 촉진된다는 실험적인 결과가

† Corresponding Author, syun@ut.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

보고되었다.⁽⁶⁾ 이와 다른 방법으로서 본 연구팀은 액적 모양을 비축대칭 타원형으로 변형하여 충돌하는 방법을 제안하였고, 소수성 표면 위에서 액적 침적 조절을 가능하게 하였다.⁽⁶⁾ 기존의 구형 액적 충돌은 액적이 갖고 있는 총 에너지가 충돌 후에도 수직 축으로 수렴하게 되어 반동이 쉽게 일어난다. 이에 반해, 비축대칭 타원형 액적 충돌은 액적 진동(drop oscillation)으로 인하여 총 에너지의 일부를 수평 축의 운동에너지로 분산시키기 때문에 반동이 억제될 수 있다. 타원형 액적 충돌은 표면 개질이나 첨가제 사용에 의존하지 않고도, 효과적인 반동 억제가 가능하다는 것이 장점이다.

가장 최근에 본 연구팀에서 고온으로 가열된 표면에서 반동 높이 조절할 수 있다는 결과를 보고하였다.⁽⁷⁾ 이 연구는 액적 충돌 형상 변화와 반동 높이 조절에 초점을 맞추었고, 반동 억제 메커니즘을 수축(retraction) 과정에서의 운동에너지 비축대칭성으로 설명하였다. 하지만 반동 억제의 근간이 되는 충돌 초기 수평 축 간의 퍼짐의 차이에 대한 분석은 현저하게 부족하였다. 액적 종횡비에 따라 달라지는 축 간의 최대 퍼짐의 차이는 수축 과정에 일어나는 액적 정렬과 진동 유발에 매우 밀접한 연관이 있기 때문에 중요하다. 따라서 타원형 액적 종횡비가 비축대칭 퍼짐 거동에 미치는 영향에 대한 분석에 초점을 맞추어 본 연구를 진행하였다.

본 연구는 액적 충돌 시 두 측면에서의 액적 거동을 동시 고속 촬영을 통하여 관찰하였고, 액적 충돌 속도가 고정되었을 때 각 축에서의 액적 퍼짐 너비를 측정하였다. 또한, 종횡비에 따른 최대 퍼짐을 조사하였다. 마지막으로 액적 종횡비와 충돌 속도가 동시에 큰 영역에서의 액적 충돌 거동 특성을 설명하였다.

2. 실험 방법

타원형 액적은 기존에 잘 알려진 노즐과 고리 전극으로 구성된 정전분무장치를 이용하여 생성하였다.⁽⁶⁾ 고리 전극의 외경은 원형이고, 내경은 타원형으로 관통되어 있다. 시린지 펌프를 이용하여 노즐 끝에 약 4 μL 물방울을 미리 생성하고, 전극 사이에 DC 전압 6 kV를 9 ms 동안 인가하면 액적이 분사된다. 이 때 생성된 비축대칭 전기장으로 인하여 타원형 액적 변형이 형성되고, 특정 주기로 진동하면서 중력에 의해 떨어진다.

액적을 타원형 모양으로 변형시키는 과정은 다음과 같다: 먼저, 전기장이 인가되면 노즐 끝에 매

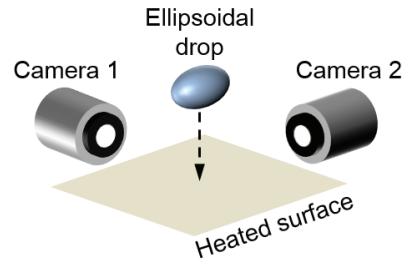


Fig. 1 Experimental setup for ellipsoidal drop impact

달려 있는 액적이 떨어져 나간다. 이 액적은 고리 전극을 통과하면서 타원형 내경의 좁은 간격에서의 강한 전기장에 의한 힘을 받게 되고 결국 비축대칭 형상으로 변형하게 된다. 이 때 타원체로서의 액적 초기 형상이 만들어진다. 액적은 고체표면에 충돌할 때까지 진동하는데, 충돌 직전의 종횡비에 따라 충돌 거동이 달라지고 반동 억제가 결정된다.

충돌할 고체 표면은 거칠기가 약 5 nm 정도의 실리콘 기판을 사용하였고, 표면 온도는 라이덴프로스트 현상의 기체층이 안정적으로 형성되는 젠틀 막비등(gentle film boiling)⁽⁸⁾이 유도될 수 있도록 최대 450 °C까지 가열되었다.

충돌 거동 관찰을 위하여 두 개의 동기화된 고속카메라(Photron, Fastcam SA3)를 이용하여 액적 충돌 지점에서 두 측면에서 거동을 촬영하였다(Fig. 1). 액적 충돌 직전 종횡비를 1.0 ~ 2.0 범위에서 얻기 위하여 정밀한 실험을 진행하였다. 정전분무장치의 높이를 약간씩 조절하면 같은 충돌 속도에서 다양한 종횡비를 얻을 수 있다. 본 연구에서 액적 충돌에 관여하는 무차원 수는 관성력과 표면장력의 상대적인 차이를 나타내는 웨버 수($We = \rho D_0 U_0^2 / \sigma$)이다; 여기서 ρ 는 물의 밀도, D_0 액적 직경(~2 mm), U_0 충돌 속도, σ 표면장력이다. 점성력은 관성력과 표면장력에 비하여 영향력이 거의 없다고 가정하였다. 본 실험에서 종횡비의 영향을 조사하기 위하여 웨버 수는 30 ± 1 로 일정하게 유지하였고, 고속 충돌에서의 액적 분열 현상을 관찰하기 위하여 웨버 수를 47로 증가시켰다.

라이덴프로스트 현상으로 인하여 액체와 고체 사이의 마찰이 거의 없기 때문에 충돌 전의 타원형 액적 진동이 퍼짐 거동에 영향을 미칠 수 있다. 하지만 충돌 전의 진동이 퍼짐 거동에 미치는 영향은 거의 무시할 수 있다. 즉 액적이 충돌할 때 특정 종횡비를 가지고 형상이 변하지 않는다고 가정할 수 있다. 이것은 액적이 고체표면에 모두 닿는 데 걸리는 시간이 진동하는 주기보다 매우 짧

기 때문이다. 액적이 고체표면과 충돌하여 접촉이 끝나는 시간은 $\tau_{imp} \sim D_0/U_0$, 액적이 진동하는 주기⁽⁹⁾는 $\tau_{osc} \sim (\rho D_0^3/\sigma)^{1/2}$ 와 같이 나타낼 수 있다. 두 시간이 비율은 $\tau_{osc}/\tau_{imp} \sim We^{1/2}$ 이고, 만약 We 가 크면 액적이 고체표면에 닿는 시간(τ_{imp})의 영향이 커지게 된다.

3. 결과 및 토의

3.1 액적 종횡비에 따른 퍼짐 거동 관찰

먼저 타원형 액적의 충돌 거동을 종횡비에 따라 조사하였다(Fig. 2). 여기서, 종횡비는 충돌 직전에 측정된 액적의 x - y 단면의 장축(b)과 단축(a)의 비이다($AR = b/a$). 일반적인 구형 액적의 충돌 거동 특성과는 달리, 타원형 액적은 x 와 y 축에서의 고체 표면과의 초기 접촉 너비(contact width)가 서로 다르기 때문에, 충돌 후에 비축대칭적인 퍼짐 현상이 발생한다. Fig. 2(a)에서 충돌 직전($t = 0$)에 액적의 y 축의 너비가 x 축의 것보다 크게 나타나지만($D_y > D_x$), 퍼짐 너비는 이것과 반대로 x 축의 너비가 y 축의 것보다 더 크게 나타난다($D_{mx} < D_{my}$). 이것은 타원 양 끝 계면에서의 곡률반경(R)이 두 축에서 서로 다르기 때문에 모세관 압력($p \sim \sigma/R$) 차이가 발생하는 것으로 설명할 수 있다. 여기서 모

세관 압력(capillary pressure)은 액적을 구 형상으로 복원시키는 라플라스 압력(Laplace pressure)을 의미한다. x - y 단면에서 보았을 때 타원 양 끝의 곡률 반경이 작은 y 축에서 모세관 압력이 더 크기 때문에 퍼짐이 상대적으로 어렵게 되고, 곡률 반경이 큰 x 축에서 모세관 압력이 더 작기 때문에 퍼짐이 쉽게 될 수 있다(이해를 돕기 위해 Fig. 3 ($t = 0$) 삽화를 참고하라).

액적이 최대 퍼짐 길이에 도달한 후에 수축 과정 동안에 x 축으로 액체가 길어지는 현상이 발생한다(Fig. 2의 5.0 ms). 이러한 x 축으로의 액적 정렬 현상(liquid alignment)으로 인하여 액적은 특정 모드의 진동이 유도된다. 그리고 나서 고체 표면으로부터 떨어져 나가는 데, 충돌 전 액적이 갖고 있던 수직 방향으로의 운동에너지가 급격하게 감소

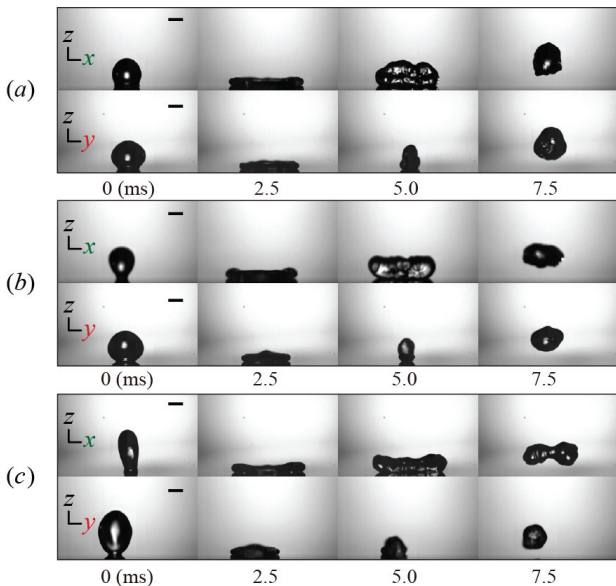


Fig. 2 Impacting dynamics of millimetric ellipsoidal drop upon a heated surface for (a) $AR = 1.23$, (b) $AR = 1.42$, and (c) $AR = 1.72$. Two orthogonal side views of x - z and y - z planes are captured simultaneously for each AR . The Weber number ($We = \rho D_0 U_0^2 / \sigma$) is equal to 30 ± 1 for all cases. The scale bar is 1 mm

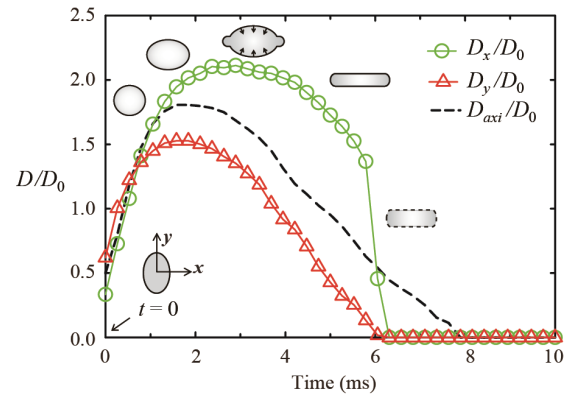


Fig. 3 Temporal evolution of the normalized contact width (D_x/D_0 and D_y/D_0) of the drop for $AR = 1.42$. The drop starts to spread at $t = 0$ and bounces off the surface at $t \sim 6$ ms. The dash line represent the variation in D/D_0 of axisymmetric (spherical) drops. Illustrations of insets represent the spreading behavior viewed from the bottom. The standard deviation of the experimental result is within 7%

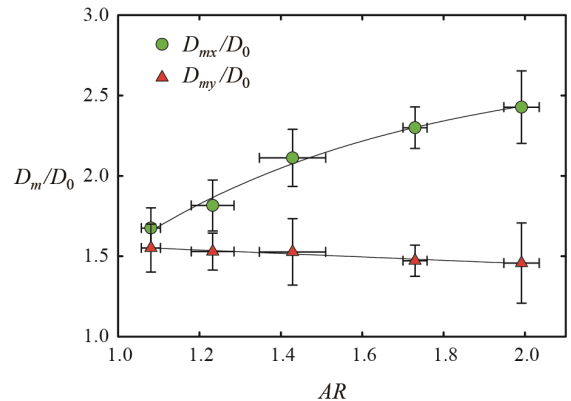


Fig. 4 Normalized maximal spreading widths in the x -axis (D_{mx}/D_0) and y -axis (D_{my}/D_0)

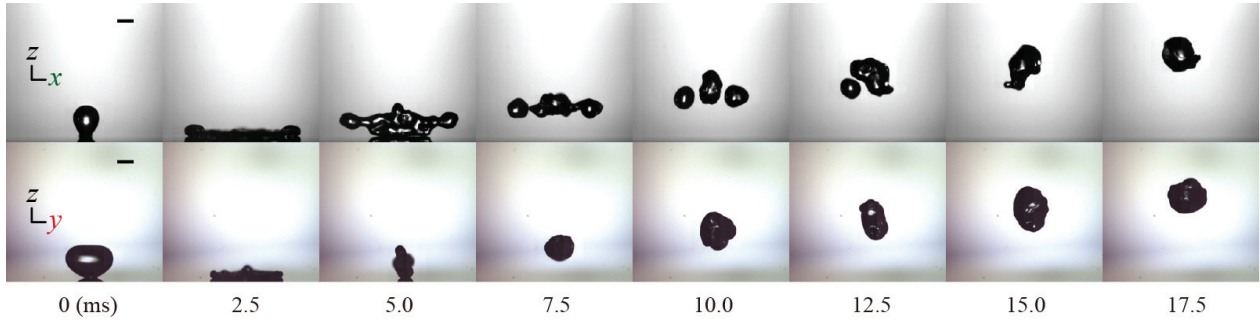


Fig. 5 Splitting of the bouncing drop along the x -axis for high AR (1.86) and high We (47); The scale bar is 1 mm

하면서 반동 높이가 낮아진다고 보고되었다.⁽⁷⁾

3.2 주축에서의 퍼짐 현상

비축대칭 퍼짐을 정량화하기 위하여, 액적의 고체표면과의 접촉 너비의 시간적 변화를 두 축에서 각각 조사하였다(Fig. 3). 구형 액적($AR = 1.00$)과 비교하여, 타원형 액적($AR = 1.42$)은 x 축의 최대 퍼짐(최대 접촉 너비)은 더 크고, y 축의 최대 퍼짐은 더 작다. 또한 Fig. 2(a-c)의 2.5 ms 에서 보면 종횡비가 커질수록 x 축의 접촉 너비는 점점 커지는 데 반해, y 축의 접촉 너비는 큰 변화가 없다는 것을 알 수 있다. 종횡비에 따라 두 축에서의 최대 퍼짐을 조사해보면, 종횡비가 커질수록 x 축과 y 축의 최대 퍼짐의 차이가 커진다는 것을 알 수 있다(Fig. 4). 이 결과는 종횡비가 클수록 x 축으로의 정렬 현상이 두드러지게 나타나게 되고, 더 큰 진폭의 진동이 유도될 수 있다. 즉 종횡비가 클수록 진동으로 인한 x - y 평면으로의 에너지 축 교환이 활발하게 일어나게 된다.⁽¹⁰⁾

3.3 고속충돌 시 액적 분열 현상

액적 종횡비와 충돌 속도가 둘 다 큰 영역에서($AR = 1.86, We = 47$), 흥미로운 충돌 거동이 관찰되었다. 액적이 충돌 한 후 반동하여 고체표면으로부터 떨어져 나갈 때, x 축으로 길어진 액적이 세 부분으로 분열되었고, 병합되었다(Fig. 5). 이것은 기존의 소수성 고체표면 위 액적 충돌에서 관찰되지 않았던 현상이다.⁽⁶⁾ 충돌 웨버 수가 커지면서 각 축에서의 최대 퍼짐이 증가하였고, 이 때 매우 얇은 두께($h \sim D_{mx}^{-1} D_{my}^{-1}$)의 액적 필름이 만들어진다. 액적의 x 축 정렬 과정에서는 양 끝으로 향하는 액체 관성력과 이를 복원하려는 표면장력이 균형을 이룬다. 만일 얇아진 액적 필름의 부분적인 가열로 인하여 표면장력이 급격한 감소하거나, 필름에 균열이 일어나게 된다면⁽¹¹⁾ 이 균형을 유지하기 어렵게 되고 액적이 분열될 가능성이 있다.

높은 종횡비 및 높은 웨버 수 영역의 액적 반동 거동은 향후 심도 있는 연구가 필요할 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서 고온으로 가열된 고체 표면 위를 타원형 액적이 충돌할 때 종횡비가 퍼짐 거동에 미치는 영향에 대해 알아보았다. 타원형 액적 충돌은 구형 액적과는 달리 비축대칭 거동으로 인하여 액적 퍼짐이 주 축에서 달라지게 된다. 종횡비가 커질수록, 주 축에서의 최대 퍼짐 차이가 커지게 되고, 액체 정렬에 영향을 주게 된다. 본 연구 결과는 비습윤(non-wetting) 표면에서의 퍼짐 역학을 이해하는 데 도움을 줄 뿐 아니라, 분무 냉각 등에서 효과적인 액적 반동 조절 기술에 응용될 수 있을 것이다. 향후에는 타원형 액적 충돌 속도가 퍼짐 및 반동 거동에 미치는 영향에 대하여 연구를 진행할 예정이다.

후 기

이 논문은 2016년 한국교통대학교 지원을 받아 수행하였음.

참고문헌 (References)

- (1) Leidenfrost, J. G., 1756, "De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus," Ovensius.
- (2) Deng, W. and Gomez, A., 2011, "Electrospray Cooling for Microelectronics," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, No. 11, pp. 2270~2275.
- (3) Bergeron, V., Bonn, D., Martin, J. Y. and Vovelle, L., 2000, "Controlling Droplet Deposition with Polymer Additives," *Nature*, Vol. 405, No. 6788, pp. 772~775.
- (4) Smith, M. I. and Bertola, V., 2010, "Effect of

- Polymer Additives on the Wetting of Impacting Droplets,” *Physical Review Letters*, Vol. 104, No. 15, p. 154502.
- (5) Bertola, V., 2014, “Effect of Polymer Concentration on the Dynamics of Dilute Polymer Solution Drops Impacting on Heated Surfaces in the Leidenfrost Regime,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 52, pp. 259~269.
- (6) Yun, S., Hong, J. and Kang, K. H., 2013, “Suppressing Drop Rebound by Electrically Driven Shape Distortion,” *Physical Review E*, Vol. 87, No. 3, p. 033010.
- (7) Yun, S. and Lim, G., 2014, “Control of a Bouncing Magnitude on a Heated Substrate via Ellipsoidal Drop Shape,” *Applied Physics Letters*, Vol. 105, No. 24, p. 244108.
- (8) Tran, T., Staat, H. J., Prosperetti, A., Sun, C. and Lohse, D., 2012, “Drop Impact on Superheated Surfaces,” *Physical Review Letters*, Vol. 108, No. 3, p. 036101.
- (9) Rayleigh, L., 1879, “On the Capillary Phenomena of Jets,” *In Proc. R. Soc. London*, Vol. 29, No. 196-199, pp. 71~97.
- (10) Yun, S. and Lim, G., 2014, “Ellipsoidal Drop Impact on a Solid Surface for Rebound Suppression,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 752, pp. 266~281.
- (11) Biance, A. L., Pirat, C. and Ybert, C., 2011, “Drop Fragmentation due to Hole Formation During Leidenfrost Impact,” *Physics of Fluids*, Vol. 23, No. 2, p. 022104.