방해물이 존재하는 평판 위 충돌 액적 거동에 관한 연구

양우종* · 강보선†

A Study on the Behavior of an Impacting Droplet on a Wall Having Obstacles

W. J. Yang and B. S. Kang

Key Words: Coalescence(병합), Impacting droplet(충돌 액적), Stationary droplet(정지 액적), Step edge(계단형 모서리)

Abstract

In this paper an experimental study is presented to investigate the effect of a step edge and a stationary droplet on the dynamic behavior of impacting droplet on a wall. The main parameters are the distance from the edge and the center-to-center distance between two droplets. Photographic images are presented to show coalescence dynamics, shape evolution and contact line movement. The emphasis is on presenting the spreading length of droplet for the step edge and two coalescing droplets along their original centers. It is clarified that the droplet exhibits much different dynamic behavior depending on the location of the step edge. The momentum of impacting droplet was better transferred to the stationary droplet as the center-to-center distance between two droplets was reduced, which results in more spreading of coalescing droplet.

1. 서 론

단일 액적이 고체 벽면과 충돌하는 현상은 분무 냉각, 분무 도장, 내연기관의 연료 분사, 잉크젯 프린팅, 분무 성형, 스프링클러의 화재 소화 등 다양한 분야에서 응용되고 있다^(1,2). Rein⁽³⁾, Yarin⁽⁴⁾, Moreira 등⁽⁵⁾은 이 주제에 대한 종합적인 내용을 소개하였으며, 이 외에도 여러 연구자들에 의해 많은 연구가 수행되었다⁽⁶⁻⁸⁾. 하지만 실제 응용 분야에서 쉽게 접할 수 있는 현상인 충돌 액적 주변에 존재하는 방해물이나 정지 액적에 의해서 충돌 액적 거동이 어떻게 영향을 받는지에 대한 연구는 매우 적은 편이다.

충돌 액적 주변에 존재하는 방해물에 의한 충돌 액

적 거동에 대해서 Josserand 등⁽⁹⁾은 접착테이프 층을 쌓아 방해물의 높이를 변화시켜가며 충돌 액적이 방해물 가장자리에서 액막 형태로 퍼져나가는 현상을 실험적, 수치해석적으로 분석하였다. Bussmann 등⁽¹⁰⁾은 높이 1 mm인 계단형 모서리에 떨어지는 액적에 대해 수치해석하였으며 그 결과는 실험결과와 비교적 잘 일치하였다.

고체 표면에 액적(용융 금속, 고분자, 용융 왁스 등)을 침착시키는 현상은 잉크젯 프린팅, 미세 성형, 쾌속 성형, 전자 패키징 등에서 많이 활용되고 있다. 이러한 응용 분야에서는 액적을 정확하게 위치시켜 원하는 선이나 패턴이 끊기지 않게 연결되는 것이 중요하다. 하지만 인접한 액적들이 서로 접촉하게 되면 표면장력에 의해서 예측하기 어려운 유동이 발생되어 선이 끊기거나 선의 두께가 불규칙하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 인접 액적 사이의 병합 현상에 대한 많은 연구가 수행되었다. Menchaca-Rocha 등⁽¹¹⁾은 유리 표면 위 두 수는 액적이 합쳐지며 변하는 형태를 연구하여 병합목 부분이 법칙을 잘 따름을 관찰하였다. Ristenpart 등⁽¹²⁾

(2012년 2월 6일 접수 ~ 2012년 3월 7일 심사완료, 2012년 3월 12일 게재확정)

*회원, 전남대학교 대학원 기계공학과

†책임저자, 회원, 전남대학교 기계시스템공학부

E-mail : bskang@jnu.ac.kr

TEL : (062)530-1683 FAX : (062)530-1689

도 친수성이 매우 높은 표면에서의 두 액적간 병합 현상을 연구하여, 병합 목 부분 폭의 변화가 시간에 대해 지수함수적으로 증가함을 보여주었다. 이러한 연구들은 대부분 액적의 관성력이 낮아서 표면장력과 점성의 효과만이 지배적인 상황이지만, 실제 응용 분야에서는 병합하는 액적의 관성력, 표면의 친수성, 액적간 간격 등의 영향도 매우 크다고 볼 수 있다. 관성력의 영향을 고려한 연구로 Roisman 등⁽¹⁴⁾은 Re 수와 We 수가 높고, 액적간 상호작용이 적을 경우에 해당되는 관성력 지배적인 충돌에 대한 액적 병합 모델을 정립하였으며, 실험 결과와도 잘 일치하였다. Li 등⁽¹⁵⁾은 정지 액적과 병합하는 충돌 액적의 거동에 대해 실험을 수행하여 최대, 최소 확산 길이를 측정하고 이 길이를 예측할 수 있는 실험적 상관식을 제안하였다.

본 연구에서는 고체 표면 위에 충돌 액적의 확산-수축 과정을 방해하는 요소가 존재하는 경우에 대해 시간 지연촬영법으로 충돌 액적의 거동을 가시화하고 확산-수축되는 액적의 직경을 측정하여 방해물의 영향을 분석하였다. 첫 번째는 계단형 모서리가 존재하는 경우에 충돌 액적과 모서리와의 거리를 변화시키며 실험을 수행했으며, 두 번째는 정지 액적 주변에 충돌하는 액적이 정지 액적과 병합되는 현상을 충돌 액적과 정지 액적 간의 간격을 변화시키며 병합되는 액적 형태의 변화를 관찰하였다.

2. 실험장치 및 조건

액적의 평판 위 충돌 거동을 가시화하기 위하여 시간 지연촬영법을 사용하였다. 시간지연촬영법은 떨어지는

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 2 Impacting droplet near the step edge

Fig. 3 Two coalescing droplets (a) before impact (b) after impact

액적을 광센서가 감지하여 감지 순간부터 지연시간을 다르게 하면서 충돌 액적을 촬영하는 기법이다. 실험 장치의 구성은 Fig. 1에 나타내었으며 실험은 계단형 모서리에 충돌하는 액적 실험(Fig. 2)과 정지 액적과 병합하는 액적 실험(Fig. 3)을 수행하였다. D_0 는 충돌 액적의 직경, D_s 는 정지 액적의 직경, V 는 충돌 액적의 속도, H 는 시편의 턱 높이, L_1 은 턱과 충돌 액적 중심 사이의 거리, L_2 는 충돌 액적과 정지 액적 사이의 거리, L_t 은 충돌 액적 중심에서 병합 액적 좌측의 길이, L_r 은 정지 액적 중심에서 병합 액적 우측의 길이, L_c 는 병합 액적의 총 길이를 나타낸다.

액적은 시린지 펌프에서 공급되는 유체(물)에 의해 주사바늘 끝에서 떨어지며, 바늘은 계단형 모서리 실험의 경우 $ID = 0.394$, $OD = 0.711$ mm, 정지 액적과 병합하는 실험의 경우 $ID = 0.292$, $OD = 0.559$ mm이다. 떨어지는 액적을 광센서가 센싱하여 신호를 펄스발생기로 보내면, 원하는 지연시간 뒤에 CCD 카메라로 신호가 보내져서 충돌 액적의 거동을 촬영하게 된다. 액적이 충돌하는 평판의 재질은 알루미늄이며, 계단형 모서리의 높이 $H = 0.1$ mm이다. 충돌 액적의 크기와 직경은 평판 충돌

Table 1 Experimental conditions

<div></div>	L_1, L_2 (mm)	V (m/s)	Do (mm)	We	Re
Step edge experiment					
Case 1	$L_1 = -3$	2.91	3.54	410	10,260
Case 2	$L_1 = 0$				
Case 3	$L_1 = 3$				
Coalescence experiment					
Case 4	$L_2 = 4.5$	3	3.1	381	9,263
Case 5	$L_2 = 3.0$				
Case 6	$L_2 = 1.5$				

직전에 촬영한 두 이미지를 분석하여 계산하였으며, 실험 조건은 Table 1에 나타내었다. 계단형 모서리 충돌 실험에서는 모서리로부터 측정된 길이 $L_1 = -3, 0, 3$ mm인 경우에 대해, 정지 액적과 병합하는 실험의 경우는 충돌 액적과 정지 액적 사이 거리인 $L_2 = 4.5, 3.0, 1.5$ mm인 경우에 대해 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 계단형 모서리 충돌 실험

고체 표면과 충돌하는 액적은 관성력에 의하여 빠르게 퍼져 나가다가, 초기에 액적이 가지고 있던 에너지 중 일부는 액적 내부유동에 의하여 소산되며, 나머지는 액적과 액적, 액적과 공기 및 액적과 고체 표면 사이의 계면을 형성하면서 표면에너지로 변환되고, 표면장력의 힘이 지배적으로 작용하게 된다. 이후 점점 감소되는 속도로 퍼짐과 수축을 반복하다가, 결국 액적이 가지고 있던 모든 운동에너지가 소산된 이후에는 최종상태에 도달하게 된다.

Figs. 4~6은 액적의 충돌 후 거동을 보여 주고 있다. $L_1 = -3.0$ mm인 경우(Fig. 4)에는 확산-수축 액적의 우측 선단부가 고체 표면과 닿지 않기 때문에 표면의 마찰력 효과가 없어진다. 즉, 확산-수축 액적의 왼쪽은 표면 마찰력에 의해 확산-수축 과정이 방해받지만, 우측 선단부는 방해를 받지 않게 된다. 이는 사진 이미지에서 왼쪽과 오른쪽의 비대칭성으로부터 확인할 수 있다. 또한, 액적의 수축과 확산과정에서 관성과 표면장력에 의해

Fig. 4 The behavior of impacting droplet on the step edge for the case of $L_1 = -3$ mm

Fig. 5 The behavior of impacting droplet on the step edge for the case of $L_1 = 0$ mm

Fig. 6 The behavior of impacting droplet on the step edge for the case of $L_1 = +3$ mm

모서리 턱 아래로 액막이 떨어지지 않고 있음을 확인할 수 있다.

$L_1 = 0.0$ mm인 경우(Fig. 5)에는 모서리 중앙에 액적이 충돌하는 경우이며 모서리로 인해 확산 과정에서 거의 양쪽으로 분리되지만, 수축 과정에서 다시 합쳐지며, 대체적으로 좌우 대칭성이 유지되고 있다. $L_1 = +3.0$ mm인 경우(Fig. 6)에는 모서리 턱의 우측 낮은 고체 표면에서 충돌이 일어난다. 확산 액적의 왼쪽은 벽으로 인해 확산 과정이 방해받으며, 벽을 넘어서 확산되면서 액막 가장자리의 작은 액적들이 분리되고 있음을 알 수 있다.

확산 액적의 시간에 따른 직경 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 직경은 확산하는 액적 이미지의 좌측 끝부터 우측 끝까지의 길이를 측정하였다. 직경 측정의 오차는 길이 측정시 ± 2 화소 오차를 가정하면, 확산계수에 의해 ± 0.1 mm가 되고, 초기 직경으로 무차원화시킨 값은 ± 0.03 이다. 충돌 직후 확산 초기에는 모든 경우에 직경 변화가 큰 차이 없이 비슷한 형태를 보이다가 최대 직경부터 수축 과정에는 차이를 보이며 진행되었다. 모서리 중앙에 떨어지는 경우($L_1 = 0.0$ mm)가 대체적으로 가

장 넓게 확산되었으며, 충돌 액적의 좌측에 벽이 있는 경우($L_1 = +3.0$ mm)가 벽으로 인한 확산 방해로 인해 확산 직경이 가장 적었다.

3.2 정지 액적과의 병합 실험

Figs. 8~10은 충돌 액적이 확산되면서 정지 액적과 병합되는 거동을 보여 주고 있다. $L_2 = 4.5$ mm인 경우(Fig.

Fig. 8 Coalescence of two droplets for the case of $L_2 = 4.5$ mm

Fig. 7 Time history of spreading diameter

Fig. 9 Coalescence of two droplets for the case of $L_2 = 3.0$ mm

Fig. 10 Coalescence of two droplets for the case of $L_2 = 1.5$ mm

8), 확산 액적의 우측이 정지 액적과 접촉하면서 우측으로의 확산 과정이 방해 받는다. 수축 과정에서는 정지 액적 내부의 유체도 좌측 속도를 가지면서 충돌 액적 쪽으로 이동하여 최종적으로 왼쪽이 더 커진 형태를 보여 주고 있다.

$L_2 = 3.0$ mm인 경우(Fig. 9), 확산 과정에서 정지 액적의 유체가 확산하는 액막의 가장자리 림 쪽으로 더 많이 이동하는 것을 볼 수 있다. 최종적으로도 정지 액적의 왼쪽으로의 흐름이 더 많아져 정지 액적의 일부가 남아 있던 이전 경우와 다르게 완전히 합쳐진 모습을 볼 수 있다. 액적간 간격이 더 좁아지면($L_2 = 1.5$ mm, Fig. 10), 정지 액적의 충돌 액적으로의 흐름이 더욱 더 많아져 확산 과정에서 정지 액적의 대부분이 충돌 액적과 합쳐져 그 이후에는 거의 단일 액적처럼 수축되는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 충돌 액적 중심에서 병합 액적 좌측끝까지의 길이인 L_l 을 충돌 액적의 반지름으로 무차원화한 결

Fig. 11 Time history of left edge displacement from the center of impacting droplet

Fig. 12 Time history of right edge displacement from the center of stationary droplet

Fig. 13 Spread length evolution of two coalescing droplets

과이다. 정지 액적과의 접촉과 병합으로 인하여 충돌 액적의 좌측으로의 확산도 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 액적 간 거리가 가장 먼 경우에는 충돌 전 반지름의 3.5 배 이상 확산되었지만, 가장 가까운 경우는 2 배 정도까지 밖에 확산되지 못했다.

Fig. 12는 정지 액적 중심에서 병합 액적 우측끝까지의 길이인 L_r 을 정지 액적의 초기 반지름으로 무차원화한 결과이다. 액적간 거리가 가장 먼 경우에는 충돌 액적의 운동에너지가 정지 액적으로 많이 전달되지 않아 우측으로의 확산이 많이 일어나지 않지만, 가장 가까운 경우에는 충돌 액적으로 인해 우측으로 상당히 많이 확산되었음을 알 수 있다.

Fig. 13은 병합 액적의 총 길이 L_t 를 충돌 액적과 정지 액적의 반지름, 액적간 거리를 합한 길이로 무차원화시킨 결과이다. 액적 간 거리가 먼 경우에는 충돌 액적이 정지 액적에 전달하는 운동에너지의 양이 적어 초기 대비 많이 확산하지 못하였으며, 두 액적 사이의 거리가 가까울수록 전달하는 운동에너지의 양이 많아지면서 초기 대비 더 많이 확산하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 고체 표면 위에 충돌 액적의 확산-수축 과정을 방해하는 계단형 모서리나 정지 액적이 존재하는 경우에 대해, 시간지연촬영법으로 충돌 액적의 거동을 가시화하고 확산-수축되는 액적의 직경을 측정하여 방해물의 영향을 분석하였다.

계단형 모서리 실험에서는 모서리 중앙에 떨어지는 경우가 대체적으로 가장 넓게 확산되었으며, 충돌 액적

의 좌측에 벽이 있는 경우 벽에 의해 확산이 방해받으면서, 되튐 현상을 보여주었다. 정지 액적과의 병합 실험에서는 충돌 액적의 좌측은 정지 액적과의 거리가 멀수록 자유롭게 확산할 수 있어 확산길이 큰 반면, 정지 액적의 우측은 두 액적간 거리가 가까울수록 충돌 액적의 운동에너지가 많이 전달되어 우측으로 더 확산되었다. 두 효과가 합쳐진 병합되는 액적의 전체 길이는 두 액적간 거리가 짧을수록 더 많이 퍼졌다가 수축되었다.

참고문헌

- (1) C. Crowe, M. Sommerfeld and Y. Tsuji, "Multiphase Flows with Droplets and Particles", CRC, Boca Raton, 1998.
- (2) A. H. Lefebvre, "Atomization and Sprays", Hemisphere, New York, 1989.
- (3) M. Rein, "Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces", Fluid Dyn. Res., Vol. 12, 1993, pp. 61~93.
- (4) A. L. Yarin, "Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding, bouncing", Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 38, 2006, pp. 159~192.
- (5) A. L. N. Moreira, A. S. Moita and M. R. Pana, "Advances and challenges in explaining fuel spray impingement: How much of single droplet impact research is useful?", Prog. in Energy and Comb. Sci., Vol. 36, 2010, pp. 554~580.
- (6) S. Chandra and C. T. Avedisian, "On the collision of a droplet with a solid surface", Proc. R. Soc. London, Series A, Vol. 432, 1991, pp. 13~41.
- (7) C. Mundo, M. Sommerfeld and C. Tropea, "Droplet-wall collisions: Experimental studies of the deformation and breakup process", Int. J. Multiphase Flow, Vol. 21, 1995, pp. 151-173.
- (8) R. Rioboo, M. Marengo and C. Tropea, "Time evolution of liquid drop impact onto solid, dry surfaces", Exp. in Fluids, Vol. 33, 2002, pp. 112-124.
- (9) C. Josserand, L. Lemoyne, R. Troeger and S. Zaleski, "Droplet impact on a dry surface: triggering the splash with a small obstacle", J. Fluid Mech., Vol. 52, 2005, pp. 47~56.
- (10) M. Bussmann, J. Mostaghimi and S. Chandra, "On a three-dimensional volume tracking model of droplet impact", Phys. of Fluids, Vol. 11, 1999, pp. 1406~1417.
- (11) A. Menchaca-Rocha, A. Martinez-Davalos and R. Nunez, "Coalescence of liquid drops by surface tension", Phys. Rev. E, Vol. 63:046309, 2001.
- (12) W. D. Ristenpart, P. M. McCalla, R. V. Roy and H. A. Stone, "Coalescence of spreading droplets on a wettable substrate", Phys. Rev. Lett., Vol. 97:064501, 2006.
- (13) I. V. Roisman, B. Prunet-Foch, C. Tropea and M. Vignes-Adler, "Multiple drop impact onto a dry solid substrate", J. of Colloid and Interface Sci., Vol. 256, 2002, pp. 396~410.
- (14) R. Li, N. Ashgriz, S. Chandra, J. R. Andrews and S. Drappel, "Coalescence of two droplets impacting a solid surface", Exp. in Fluids, Vol. 48, 2010, pp.1025~1035.