단일 액적의 고체 표면 액막과의 충돌 현상에 관한 연구

고천석* · 유준호* · 최낙완* · 강보선†

A Study on the Phenomena of Droplet Impact onto a Liquid Film

C. S. Ko, J. H. Yu, N. W. Choe and B. S. Kang

Key Words: Impacting Droplet(충돌 액적), Liquid Film(액막), Splashing(튀김)

Abstract

In this paper an experimental study is presented to investigate the dynamic behavior of impacting droplet onto a liquid film. The main parameters are the droplet velocity and the thickness of the liquid film. Photographic images are presented to show the formation of crown, central jet and disintegrating droplet from the central jet. The emphasis is on presenting the time evolution of crown diameter, crown height, central jet height and the size of disintegrating droplet from the central jet. The diameter and height of crown are higher for faster droplet and thinner liquid film. On the other hand, the height of central jet are higher for faster droplet and thicker liquid film. The size of disintegrating droplet from the central jet heavily depends on the droplet velocity; Larger droplet is produced with faster falling droplets.

1. 서 론

단일 액적이 고체 벽면 또는 액체 표면과 충돌하는 현상은 분무 냉각, 분무 도장, 내연기관의 연료 분사, 잉크젯 프린팅, 분무 성형, 스프링클러의 화재 소화 등 다양한 분야에서 응용되고 있으며⁽¹⁻²⁾, Rein⁽³⁾, Yarin⁽⁴⁾, Moreira 등⁽⁵⁾은 이 주제에 대한 종합적인 내용을 소개하고 있다.

이러한 응용 분야에서 액적은 초기에는 고체 벽면과 충돌하지만, 시간이 흐르면서 이전 액적들에 의해 형성된 액막과 충돌하게 된다. 액적의 고체 표면 또는 액막과의 충돌 특성은, 액적의 조건(직경 D_0 , 속도 V , 충돌 각도), 액막의 두께 h , 유체의 특성(밀도 ρ , 점도 μ , 표면 장력 σ), 고체 표면의 거칠기 정도(액막 두께가 얇은 경

우) 등의 변수에 따라 다양하고 복잡한 거동특성을 나타낸다. 이 현상과 관련된 무차원 변수들은 Weber 수 ($We = \rho D_0 V^2 / \sigma$), Ohnesorge 수 ($Oh = We^{1/2} / Re = \mu / (\rho \sigma D_0)^{1/2}$), 무차원 액막 두께 등이다.

액적이 액막 위로 충돌하면, 충돌 액적의 속도가 증가함에 따라, 즉 We 수가 증가하면서 반사(bouncing), 병합(coalescence), 튀김(splashing) 현상이 나타난다. 튀김(splashing) 현상은 충돌에 의해 발생하는 크라운의 액막 모서리에 형성된 다수의 제트에서 수많은 액적들이 분열되는 현상이다. 분무 코팅, 도장, 냉각 등의 응용 분야에서는 분사된 액적이 고체 표면 위에 머물도록 가급적 튀김 현상을 억제해야 하지만, 연료 분무에서는 튀김 현상에 의한 연료의 이차미립화가 바람직하기 때문에 튀김 현상을 촉진하는 것이 좋다.

많은 이전 연구자들이 튀김 현상이 발생하는 영역 조건에 대한 연구를 수행하였으며, We 수와 Oh 수의 조합인 무차원 변수 $K = We \cdot Oh^{-0.4}$ 를 영역 경계를 구분하기 위해 많이 사용하였다⁽⁶⁻⁸⁾. Moreira 등⁽⁵⁾은 이와 관련된 기존 연구들을 분석하여 영역 경계값으로 제안된 식들이 비교적 액막 두께가 얇은 경우($h^* < 2$)에 적용 가능

(2012년 9월 21일 접수 ~ 2013년 1월 22일 심사완료, 2013년 1월 23일 게재확정)

*전남대학교 기계공학부

†책임저자, 회원, 전남대학교 기계공학부

E-mail : bskang@jnu.ac.kr

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

하며, 액막 두께가 이보다 커지는 경우에는 액막 두께의 영향이 크지 않다는 것을 보였다^(9,10).

Okawa 등⁽¹⁰⁾은 튀김 현상에 의해 생성되는 이차 액적들의 질량과 초기 액적 질량의 비에 대해, 무차원 변수 K 를 사용한 실험적 상관식을 제시하였다. Vander Wal 등⁽¹¹⁾은 액막 두께가 충돌 후 액적 거동에 미치는 영향을 조사하여, 얇은 액막($h^* \approx 0.1$)은 튀김 현상을 더 강화시키지만 두꺼운 액막($1 < h^* < 10$)은 튀김 현상을 억제한다는 것을 보였다. Cossali 등⁽¹²⁾은 비교적 얇은 액막($h^* \approx 0.3 \sim 1.1$)에 대해서 튀김 현상에서 생기는 크라운의 직경, 높이, 두께, 제트의 수, 이차 액적의 개수 및 크기 등의 시간 경과에 따른 변화를 분석하였다.

본 연구에서는 단일 액적의 고체 표면 위 액막과의 충돌 현상을 시간지연촬영법으로 가시화하여 거동 특성을 분석하였으며, 튀김 현상으로 발생하는 크라운의 직경, 높이, 중앙에서 형성되는 제트의 높이 등의 시간에 따른 변화 및 중앙에서 형성되는 제트에서 분열되는 이차 액적의 크기를 측정하였다. 실험 변수는 충돌 액적의 속도를 변화시킴으로써 무차원 변수 K 와 액막 두께를 변화시키며, 충돌 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험장치 및 조건

액적의 고체 표면 액막 위 충돌 거동을 가시화하기 위하여 시간지연촬영법을 사용하였다. 시간지연촬영법은 떨어지는 액적을 광센서가 감지하여 감지 순간부터 지연시간을 다르게 하면서 충돌 액적을 촬영하는 기법이다. 실험 장치의 구성은 Fig. 1에 나타내었으며, 두께 h 인 액막에 떨어지는 충돌 액적을 Fig. 2에 나타내었다. 액막과 충돌한 액적은 초기에는 Fig. 3(a)에 나타낸 것

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 2 Impacting droplet onto a liquid film

Fig. 3 Schematic of typical droplet behaviors after impact
(a) crown formation (b) central jet and secondary drop formation

과 같이 크라운을 형성하고 후반에는 Fig. 3(b)에 나타낸 것과 같이 중앙에 제트가 형성이 되면서 이차 액적이 분열된다. 본 연구에서는 시간 경과에 따라 액적의 충돌 거동을 가시화하였고, 가시화 이미지로부터 크라운의 직경 D_c , 크라운의 높이 H_c , 중앙에서 형성되는 제트의 높이 H_j 의 변화를 측정하였고, 중앙 제트에서 분열되는 이차 액적의 직경 D_s 를 측정하였다.

액적은 시린지 펌프에서 공급되는 유체(물)에 의해 주사바늘 끝에서 떨어지며 낙하 높이를 조절하여 충돌 전 액적 속도를 조절한다. 바늘의 ID=0.394 mm, OD=0.711 mm이다. 떨어지는 액적을 광센서가 감지하여 신호를 펄스발생기로 보내면, 원하는 지연시간 뒤에 CCD 카메라로 신호가 보내져서 충돌 액적의 거동을 촬영하게 된다. 액막이 놓인 평판의 재질은 알루미늄이며, 충돌 액적의 크기와 속도는 액막 충돌 직전에 촬영한 두 이미지를 분석하여 속도는 이동 거리와 시간 간격을 활용하여

Table 1 Experimental conditions

	h (mm)	h^*	V (m/s)	We	K
Case 1	2	0.6	2.75	344	4,107
Case 2			4.1	765	9,134
Case 3	10	3.0	2.75	344	4,107
Case 4			4.1	765	9,134
$D_o=3.33$ mm, Oh=0.00203					

계산하였으며, 실험 조건은 Table 1에 나타내었다. 실험 변수로써 액막 두께 $h=2, 10$ mm, 충돌 액적의 속도 $V=2.75, 4.1$ m/s인 경우에 대해 총 4 경우의 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 액적의 거동

Figures 4~7은 액막과 충돌하는 액적의 충돌 후 거동

Fig. 4 The behavior of impacting droplet onto a liquid film for the case of $h=2$ mm, $V=2.75$ m/s

Fig. 5 The behavior of impacting droplet onto a liquid film for the case of $h=2$ mm, $V=4.1$ m/s

Fig. 6 The behavior of impacting droplet onto a liquid film for the case of $h=10$ mm, $V=2.75$ m/s

Fig. 7 The behavior of impacting droplet onto a liquid film for the case of $h=10$ mm, $V=4.1$ m/s

을 보여 주고 있다. 초기에는 확산하는 액적에 의해 밀려나는 액막에 의해 크라운이 형성되면서 가장자리의 돌기로부터 작은 이차 액적들이 분열된다. 후반부에는 수축하는 액적에 의해 중앙에서 제트가 성장하면서 느린 액적 속도와 얇은 액막 두께인 Case 1($V=2.75$ m/s, $h=2$ mm)을 제외하고는 비교적 크기가 큰 이차 액적이 제트 끝으로부터 분열된다. 전반적으로 액적 속도가 높고, 액막 두께가 얇을수록, 크라운 하부 직경이 더 크고, 크라운의 최고 높이도 더 높아진다.

3.2 크라운 직경과 높이의 변화

Figure 8과 9는 시간에 따른 크라운 직경과 높이 변화를 나타내고 있다. 크라운 직경과 높이는 초기 액적 직경으로 무차원화했으며, 시간은 크라운 직경과 높이를 측정하기 시작한 순간을 0 초로 하여 나타내었다. 측정 오차는 길이 측정시 좌, 우측 1 개씩, ± 2 개의 화소 오차를 가정하면, 픽셀 1 개의 실제 길이를 나타내는 환산 계수에 의해 ± 0.1 mm가 된다. 크라운 직경과 높이는 빠른 액적 속도와 얇은 액막 두께인 Case 2($V=4.1$ m/s, $h=2$ mm)가 대체적으로 가장 컸으며, 느린 액적 속도와

Fig. 8 Time history of crown diameter evolution

Fig. 9 Time history of crown height evolution

두꺼운 액막 두께인 Case 3($V=2.75$ m/s, $h=10$ mm)가 가장 낮았다. 액막 두께가 동일한 경우(Case 1과 2, Case 3과 4)에는, 액적 속도가 빠를수록(Case 2와 Case 4) 액적의 운동에너지가 더 커서, 빠른 속도로 확산되는 액적에 의해 형성되는 크라운 직경이 더 크고 높이도 더 높았다. 액적 속도가 동일한 경우(Case 1과 3, Case 2와 4)에는, 액막이 얇을수록(Case 1과 2) 액적이 충돌하면서 밀어내야 하는 액체의 양이 적어져 더 넓게 확산되면서 크라운 높이도 더 높았다.

3.3 중앙 제트 높이 변화와 분열 액적의 직경

Figure 10은 중앙에 형성되는 제트의 시간에 따른 높이 변화를 나타내고 있다. 중앙 제트의 높이는 빠른 액적 속도와 두꺼운 액막 두께인 Case 4($V=4.1$ m/s, $h=10$ mm)가 가장 높았으며, 느린 액적 속도와 얇은 액막 두께인 Case 1($V=2.75$ m/s, $h=2$ mm)가 가장 낮았다. 액막 두께가 동일한 경우(Case 1과 2, Case 3과 4)에는, 액적 속도가 빠를수록(Case 2와 Case 4) 중앙 제트의 높이도 더 높았다. 액적 속도가 동일한 경우(Case 1과 3, Case 2와 4)에는, 액막이 두꺼울수록(Case 3과 4) 현저하게 중앙 제트의 높이가 더 높았다. 액막이 두꺼우면, 액적이 최대 확산 후 수축시 액막 위에서 수축되기 때문에 고체면과 접촉하면서 수축하는 경우보다는 액적의 운동에너지 손실이 감소하여 상승하는 중앙 제트의 높이가 더 높아진다. 이 결과는 액막이 얇을수록 크라운 높이가 더 높은 결과와는 반대이다. 즉, 액적 속도가 동일한 경우 확산시에는 액막 두께가 얇을수록 형성되는 크라운의 높이가 높은 반면, 수축시에 형성되는 중앙 제트는 액막 두께가 두꺼울수록 높이가 더 높아짐을 알 수 있다. Table 2는 모든 실험 경우에 대해 무차원 크라운 직경(D_c/D_0), 높이(H_c/D_0), 중앙 제트 높이(H_j/D_0)의 최대값

Fig. 10 Time history of central jet height evolution

Table 2 Maximum diameter, height of crown and central jet height

	D_c/D_o	H_c/D_o	H_j/D_o
Case 1	7.54	0.98	1.99
Case 2	9.25	1.74	4.63
Case 3	6.50	0.76	6.37
Case 4	8.21	1.13	7.21

Table 3 Diameter of secondary droplet

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
D (mm)	none	3.52	1.53	4.76

을 보여주고 있다.

Table 3은 중앙 제트가 높아지면서 제트 끝에서 분열되는 이차 액적의 직경을 나타내고 있다. 빠른 액적 속도와 두꺼운 액막 두께인 Case 4($V=4.1$ m/s, $h=10$ mm)에서 가장 큰 이차 액적이 형성된다. 액적 속도가 낮은 경우에는 얇은 액막(Case 1)에서 액적이 생성되지 않거나, 두꺼운 액막(Case 3)에서 크기가 작은 액적이 생성되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 고체 표면 위 액막 위에 낙하하는 액적의 충돌 후 거동을 시간지연촬영법으로 가시화하고, 액적 속도 및 액막 두께가 형성되는 크라운의 직경 및 높이, 중앙 제트의 높이, 중앙 제트에서 분열되는 이차 액적의 직경에 미치는 영향을 분석하였다.

액적 속도가 빠를수록, 액막이 얇을수록 크라운 직경이 더 크고 높이도 더 높았다. 중앙 제트의 높이는 액적 속도가 빠를수록, 액막이 두꺼울수록 더 높았다. 중앙 제트에서 분열되는 액적은 빠른 액적 속도에서 비교적 큰 액적이 형성되었으며, 액적 속도가 낮은 경우에는 액적이 생성되지 않거나, 생성되더라도 그 크기가 작았다.

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) A. L. Yarin and D. A. Weiss, "Impact of drops on solid surface: self-similar capillary waves and splashing as a new type of kinematic discontinuity", J. Fluid Mech., Vol. 283, 1995, pp. 141~173.
- (7) G. E. Cossali, A. Coghe and M. Marengo, "The impact of a single drop on a wetted solid surface", Exp. in Fluids, Vol. 22, 1997, pp. 463~472.
- (8) R. L. Vander Wal, G. M. Berger and S. D. Mozes, "The combined influence of a rough surface and thin fluid film upon the splashing threshold and splash dynamics of a droplet impacting onto them", Exp. in Fluids, Vol. 40, 2006, pp. 23~32.
- (9) A. B. Wang and C. C. Chen, "Splashing impact of a single drop onto very thin liquid films", Phys. of Fluids, Vol. 12, 2000, pp. 2155~2158.
- (10) T. Okawa, T. Shiraishi and T. Mori, "Production of secondary drops during the single water drop impact onto a plane water surface", Exp. in Fluids, Vol. 41, 2006, pp. 965~974.
- (11) R. L. Vander Wal, G. M. Berger and S. D. Mozes, "Droplets splashing upon films of the same fluid of various depths," Exp. in Fluids, Vol. 40, 2006, pp. 33~52.
- (12) G. E. Cossali, M. Marengo, A. Coghe and S. Zhdanov, "The role of time in single drop splash on thin film", Exp. in Fluids, Vol. 36, 2004, pp. 888~900.