

수평 와이어와 충돌하는 액적 거동에 관한 연구

강원준* · 김준영* · 박지훈* · 강보선†

A Study of the Behavior of Droplet Impacting on a Horizontal Wire

W. J. Kang, J. Y. Kim, J. H. Park and B. S. Kang

Key Words: Impacting droplet(충돌 액적), Thin horizontal wire(가느 수평 와이어), Off-center impact(편심 충돌), Eccentricity ratio(편심비)

Abstract

In this study, the behavior of water droplet impacting on a thin horizontal wire was visualized by time-delay photography. The impact behavior modes, critical capture speed and trapped mass were analyzed by changing the droplet size, velocity, wire diameter and eccentricity ratio. As the Weber number increased, the hanging, merging, and splitting modes appeared sequentially for the case of central impact, and the hanging and non-splitting modes appeared for the case of off-center impact. The boundary We number of each mode was affected by the diameter ratio. The critical capture speed was affected much by the degree of eccentricity. For all diameter ratios, it was higher for the case of central impact than for off-center impact. The trapped mass was larger for the case of central impact than for off-center impact and it increased with the smaller We number and the larger diameter ratio.

기호설명

D : 액적 직경(mm)
 D^* : 직경비($D^* = d/D$)
 d : 와이어 직경(mm)
 e : 편심량(mm)
 e^* : 편심비($e^* = e/(R-r)$)
 M : 액적 질량(mg)
 m : 부착 질량(mg)
 M^* : 부착 질량비($M^* = m/M$)
 R : 액적 반지름(mm)

r : 와이어 반지름(mm)
 V : 액적 속도(m/s)
 μ : 물의 점도(kg/m·s)
 ρ : 물의 밀도(kg/m³)
 σ : 물의 표면장력(N/m)

1. 서론

액적과 가는 와이어(wires) 또는 섬유(fibers)와의 상호 작용은 건조 지역에서 물을 효과적으로 수집하기 위한 안개 수집기(fog collector)⁽¹⁾, 파이버 필터를 사용한 에어로졸 필터링⁽²⁾이나 고온 와이어의 분무 냉각⁽³⁾ 등과 같은 다양한 산업 분야에서 응용되고 있다. 또한, 비 오는 날 거미줄에 매달린 이슬방울⁽⁴⁾과 같이 자연 현상에서도 발견할 수 있다. Fig. 1에 나타낸 것과 같이, 단일 액적이 가는 수평 와이어와 충돌할 때, 유체의 물리적

(Received: 5 Aug 2020, Received in revised form: 26 Aug 2020, Accepted: 28 Aug 2020)

*전남대학교 기계공학부

†책임저자, 전남대학교 기계공학부

E-mail : bskang@jnu.ac.kr

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

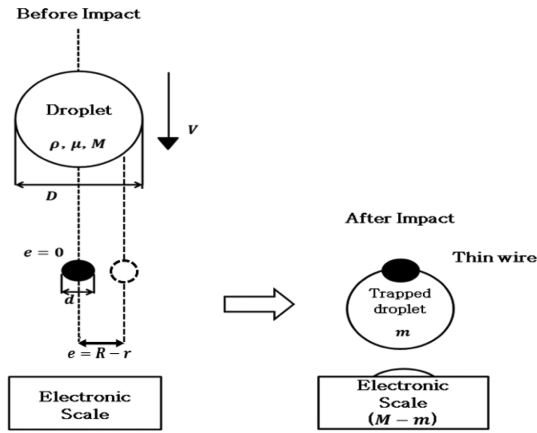


Fig. 1 An impacting droplet on a wire

성질(ρ, μ, σ), 액적의 충돌 조건(D, V, M), 와이어의 조건(d , 재질, 거칠기, 젖음성), 액적과 와이어 중심간의 편심량 e (eccentricity) 등의 변수에 따라 충돌 시 다양한 거동 양상을 보여 준다. 또한, 일부 조건에서는 충돌 후 액적의 일부 질량(trapped mass, m)이 와이어에 남게 된다. 이러한 변수들 중에서 본 연구와 관련된 무차원 변수들은 Weber 수($We = \rho V^2 R / \sigma$), 편심비($e^* = e / (R - r)$), 지름비($D^* = d / D$), 부착 질량비($M^* = m / M$) 등이다.

이와 관련된 연구로서 Safavi 등⁽⁵⁾은 파이버와 충돌하는 액적에 대해, 실험적, 수치해석적 분석을 하였으며, 액적이 파이버에 매달리는 임계 부착속도에 대한 해석적 식을 제안하였다. 이러한 분석을 통해, 임계 부착속도가 편심과 액적 직경이 증가할수록 감소함을 보였다. Zheng 등⁽⁶⁾은 이론적 모델과 수치해석을 통해, We 수와 Bo 수에 따라 세 형태의 유동 거동, 즉, 부착(hanging), 병합(merging), 분리(splitting) 모드가 존재하며, 각 모드의 경계를 나타내는 식을 구하였다. Kim 등⁽⁷⁾은 이론적, 실험적 분석을 통해 충돌 모드(부착, 단일 액적 낙하, 분리)에 대한 모드 맵과 경계에 대한 식을 구하였다. 또한, 충돌 후 와이어에 남는 액체는 액적의 속도보다는 와이어 직경의 영향이 크다는 것을 보여 주었다. Sher 등⁽⁸⁾은 충돌 후 와이어에 부착되는 액체량에 대한 분석을 통해, 부착 질량이 최대가 되는 임계 편심거리를 예측하였다. Lorenceau 등⁽⁹⁾은 액적과 와이어가 편심되어 충돌하는 경우에 대한 연구를 통해, 편심된 경우가 그렇지 않은 경우보다 부착 질량이 더 많다는 것을 보여 주었다.

안개 수집기나 에어로졸 필터링 같이 액적이 와이어 메쉬에 충돌하는 현상을 연구하기 위해서는, 액적과 단

일 와이어의 상호작용에 대한 기초적인 연구가 필요하다. 이를 위해서 본 연구에서는 액적이 가는 수평 와이어와 충돌하는 현상을 시간지연촬영법으로 가시화하여 충돌 액적 거동에 따른 모드 변화를 비교, 분석하였다. 또한, 액적의 크기, 속도, 와이어 직경과 편심비를 주요 변수로 하여, 액적이 와이어에 매달리는 임계 부착속도, 충돌 후 와이어에 부착되는 질량 등을 측정, 분석하였다. 이러한 연구 결과는 액적과 와이어 충돌 메커니즘에 대한 이해, 충돌 후 부착 질량을 증가 또는 감소시키기 위한 자료로써 활용될 수 있을 것이다.

2. 실험 장치 및 조건

본 연구에서는 가는 수평 와이어와 충돌하는 액적 거동을 가시화하기 위하여 시간지연촬영법을 사용하였다. 시간지연촬영법은 떨어지는 액적을 광센서가 감지하여 감지 순간부터 지연시간을 다르게 하면서 충돌 액적 거동을 촬영하는 기법이다. 실험 장치의 구성은 Fig. 2에 나타내었다. 액적은 시린지 펌프(KDS200, KD Science)에서 공급되는 유체(물)에 의해 특정 높이의 주사바늘 끝에서 떨어진다. 주사바늘은 모드 관찰 실험에서는 30G, 부착 액체량 실험에서는 18G를 사용하였다.

떨어지는 액적을 광센서(FT-420-10, Autonics)가 감지하여 신호를 펄스발생기(9514, Quantum)로 보내면, 원하는 지연시간 뒤에 CCD 카메라(ES 4020, Redlake MegaPlusII)와 광원(Stroboscope)으로 신호가 보내져서 충돌 액적의 거동을 촬영하게 된다. 와이어와 충돌 직전 액적의 크기와 속도는 충돌 직전에 촬영한 두 액적 이미지(0.7 ms 간격)를 분석하여 계산하였다. 액적 직경의

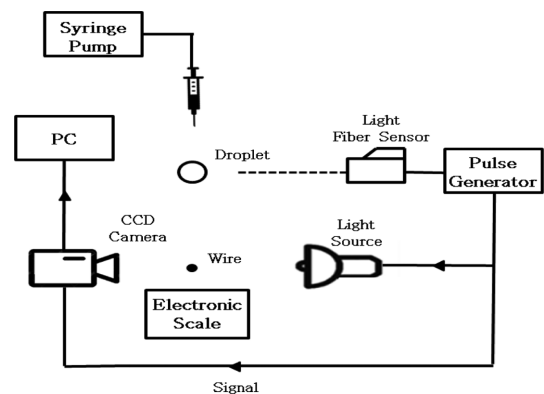


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Experimental conditions

D (mm)	M (mg)	d (mm)	D^*	V (m/s)	We	e (mm)	e^*
A. Mode Map Experiments							
2.1	4.5	0.8	0.38	0.44~ 1.96	2.9~ 57.7	0~ 0.65	0~1
		1.0	0.48				
		1.2	0.57				
		1.5	0.71				
B. Trapped Mass Experiments							
3.4	19.2	1.2	0.35	0.44~ 1.72	4.7~ 70.1	0~ 1.1	0~1
		1.5	0.44				
		2.0	0.59				
		2.3	0.74				

측정 오차는 ± 0.04 mm이며, 액적 속도는 낙하 높이를 최대 20 cm까지 변경하여 조절하였다. 와이어의 재질은 스테인리스 스틸(STS 304)이며, 와이어에 부착된 마이크로미터(분해능 ± 0.01 mm)를 이용하여 액적과 와이어 중심 간의 편심량을 변경시켰다. 전자저울(PB303-S, Mettler Toledo, 분해능 ± 1 mg)을 사용하여, 와이어가 없는 상태의 액적 질량과 충돌 후 와이어에 부착되지 않고 떨어진 액체 질량을 측정하여, 와이어에 부착되는 질량을 계산하였다.

실험 조건은 Table 1에 나타내었다. 실험 A는 충돌 액적 거동에 따른 모드 관찰 실험이고, 실험 B는 와이어에 부착되는 액체량 측정 실험이다. 각 실험에서 액적 직경과 질량은 일정하고, 와이어 직경, 액적 속도, 편심량을 변화시켰다. 따라서, 변화되는 무차원 변수는 We 수, D^* , e^* 이다.

3. 결과 및 고찰

액적이 수평 와이어와 충돌할 때, 액적 거동의 가시화를 통하여 대표적인 네 가지 형태의 액적 거동이 나타남을 알 수 있다. Figs. 3과 4는 액적이 수평 와이어와 충돌할 때 나타나는 대표적인 액적 거동을 보여주는 사진이며, Fig. 3은 편심 충돌을 확인할 수 있는 정면 사진, Fig. 4는 측면에서 촬영한 사진이다. 일반적으로, 편심이 없는 경우는 부착(hanging), 병합(merging), 분리

(splitting) 모드가 나타나고, 비분리(non-splitting) 모드는 편심이 있는 경우 나타난다. 이러한 액적 거동 모드는 액적이 와이어와 충돌하면서, 액적에 작용하는 중력, 관성력, 액적과 와이어 간의 표면장력, 마찰력에 의해 결정된다.

부착(hanging) 모드는 액적이 와이어에 충돌하면서 분리되었다가 와이어 아래에서 다시 합쳐지고, 액적의 중력과 관성력이 크지 않기 때문에 표면장력과 마찰력에 의해서 액적이 와이어에서 떨어지지 못하고 평형을 이룬 상태에서 매달리게 된다. 즉, 중력과 관성력은 충돌 후 액적이 와이어에서 떨어지게 작용하고, 표면장력과 마찰력은 액적이 와이어에서 떨어지지 못하게 작용한다. 액적의 속도가 증가하면, 와이어에 의해 분리된 액적이 와이어 아래에서 합쳐진 후, 높아진 관성력으로 인하여, 와이어에 부착되어 있지 못하고 단일 액적으로 떨어지는 병합(merging) 모드가 관찰된다. 액적의 속도가 더 증가하게 되면, 와이어에 의해 분리된 두 액적의 관성력이 커지기 때문에 병합 모드와 같이 단일 액적으로 합쳐지지 못하고, 두 액적으로 분리된 채로 떨어지게 되는 분리(splitting) 모드가 나타난다.

액적이 와이어와 동일 중심축 상에서 충돌하게 되면, 와이어에 의해 액적이 양쪽으로 분리가 된 후 관성력의 크기에 따라 부착, 병합, 분리 모드가 나타나지만, 편심되게 충돌하게 되면, 비분리(non-splitting) 모드가 관찰된다. 즉, 충돌 후 와이어에 의한 분리가 일어나지 않고 단일 액적이 유지되면서, 속도가 낮은 경우는 부착 모드가 나타나고, 속도가 높은 경우는 와이어에서 떨어지는 비분리 모드가 나타난다.

Figure 5는 액적의 We 수와 직경비 변화에 따른 액적 거동 모드의 변화를 편심비 $e^* = 0, 0.5, 1.0$ 일 때 나타낸 것이다. We 수의 증가는 액적 속도의 증가, 직경비의 증가는 와이어 직경의 증가를 의미한다.

편심이 없는 경우(Fig. 5a), 모든 직경비에 대해서 We 수가 증가할수록, 즉 액적의 관성력이 증가하고 표면장력 효과가 감소할수록, 부착 모드에서 병합 모드를 거쳐 분리 모드가 나타나 액적이 와이어에서 떨어지게 된다. 부착 모드와 병합 모드의 경계는 직경비가 증가하면서 경계 We 수는 증가한다. 이는 직경비가 커질수록 액적과 와이어의 접촉 면적의 증가로 인하여 마찰력과 표면장력 효과가 커져서, 더 높은 We 수에서도 부착됨을 의미한다. 병합 모드와 분리 모드의 경계에서는 직경비가 증가할수록 경계 We 수가 감소한다. 이는 직경비의 증가에 따라 와이어의 직경이 커져서, 충돌 후 분리된 두

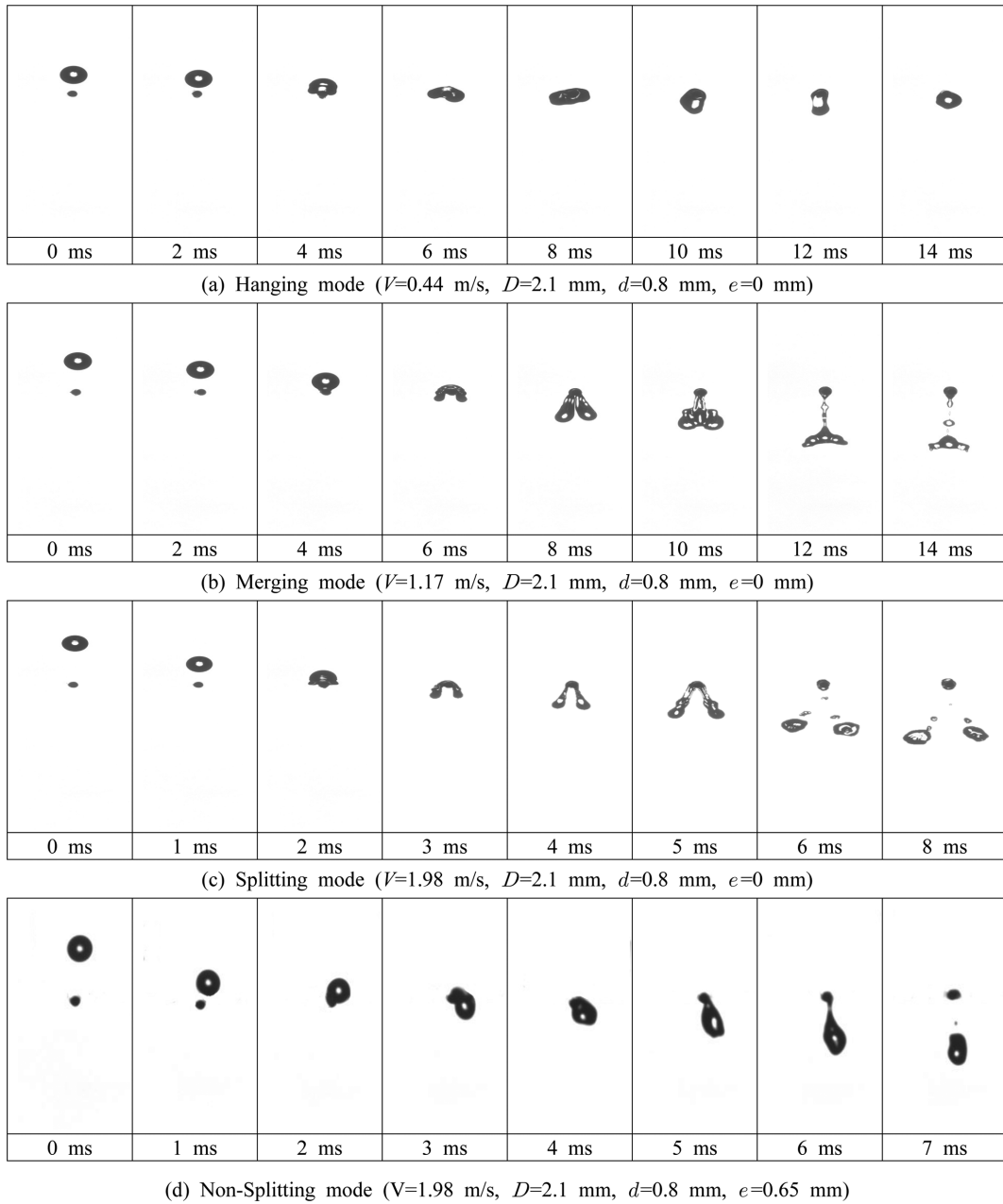


Fig. 3 Front views of an impacting droplet with a wire at different impacting modes; (a) Hanging mode, (b) Merging mode, (c) Splitting mode, (d) Non-Splitting mode

액적간의 거리가 넓어지게 된다. 따라서, 낮은 We 수에서도 두 액적이 병합되지 못하고 분리되어 떨어지기 때문이다.

편심이 있는 경우(Fig. 5b, c)에는, 편심비 $e^*=0.5$, 가장 작은 와이어($D^*=0.38$)인 경우를 제외하고, 직경비

변화에 따라 부착 모드와 비분리 모드만 나타난다. 특히, 편심이 가장 큰 경우(Fig. 5c, $e^*=1.0$)에는, 낮은 We 수에서만 약간의 부착 모드가 나타나고, 비분리 모드가 지배적으로 나타난다. 부착 모드와 비분리 모드의 경계는 직경비가 증가할수록 경계 We 수가 증가한다. 즉, 직경

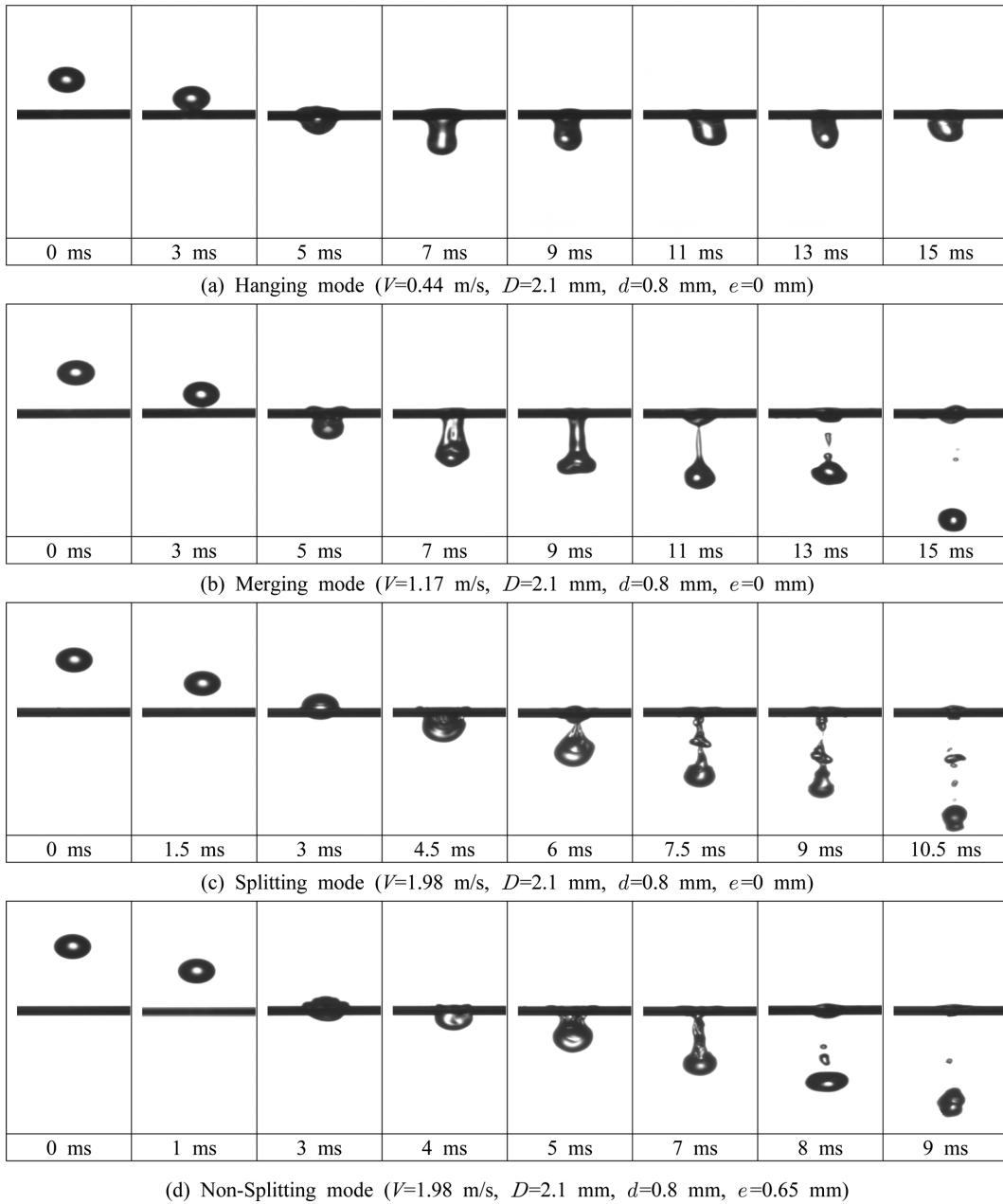


Fig. 4 Side views of an impacting droplet with a wire at different impacting modes; (a) Hanging mode, (b) Merging mode, (c) Splitting mode, (d) Non-Splitting mode

비가 커질수록 와이어와 액적의 접촉 면적이 증가하여 더 높은 We 수에서 비분리 모드가 시작하게 된다. 이는 편심이 없는 경우, 부착 모드와 병합 모드의 경계 We 수가 직경비가 증가할수록 증가하는 이유와 동일하다고 볼 수 있다.

Figure 6은 직경비와 편심비 변화에 따른 임계 부착속도의 변화를 나타내고 있다. 임계 부착속도는 편심이 없는 경우는 부착 모드에서 병합 모드로, 편심이 있는 경우는 부착 모드에서 비분리 모드로 변경되는 경계에서의 액적 속도이다. 임계 부착속도가 낮으면, 충돌 액적

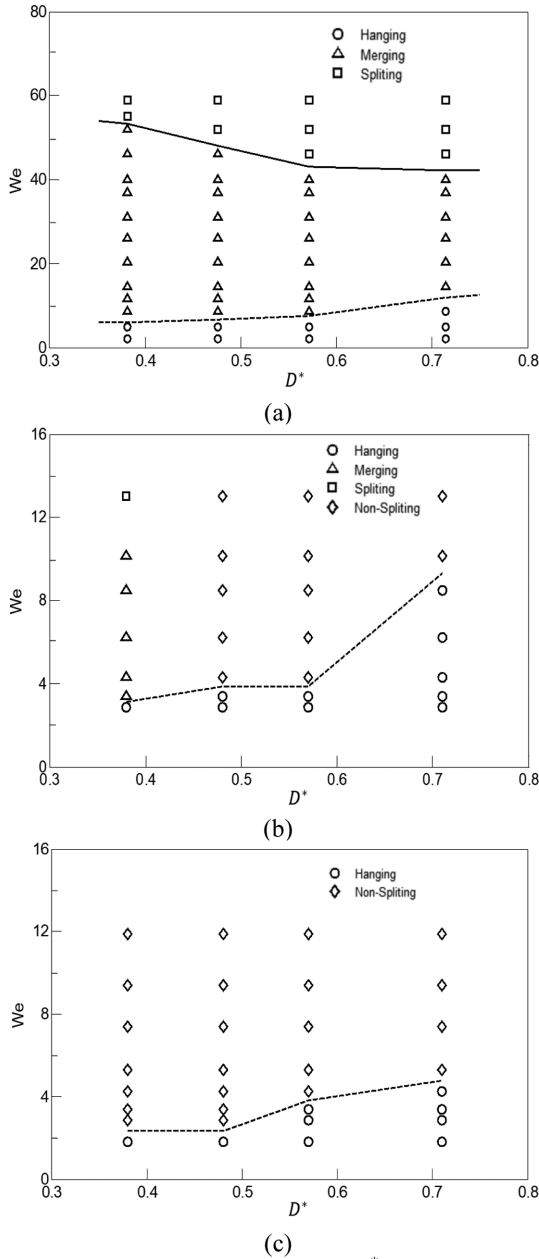


Fig. 5 Mode maps with D^* and We at different eccentricity ratios; (a) $e^* = 0$, (b) $e^* = 0.5$, (c) $e^* = 1.0$

이 와이어에 부착되지 못하고 쉽게 떨어진다고 볼 수 있다.

임계 부착속도는 모든 직경비에 대해서 편심이 없는 경우가 있는 경우보다 2배 이상 더 높았으며, 편심비가 가장 큰 경우($e^* = 1.0$), 임계 부착속도가 가장 낮았다.

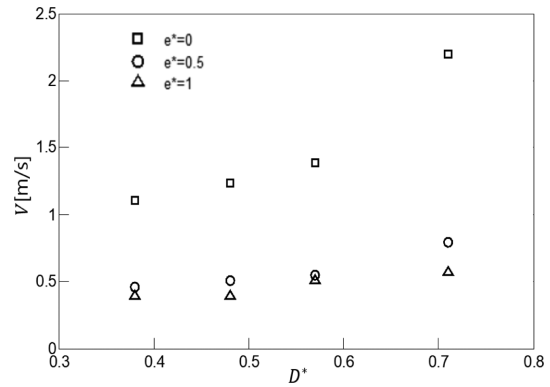


Fig. 6 Variation of critical capture speed with D^* and eccentricity ratios

이는 편심이 있는 경우, 액적과 와이어 간의 접촉 면적의 감소로 인하여, 액적을 매달리게 하는 마찰력과 표면장력이 상대적으로 작아지게 되어 액적이 매달리지 못하고 쉽게 떨어진다는 것을 의미한다. 따라서, 액적과 와이어의 편심 정도가 액적의 와이어 부착 여부에 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

직경비 변화에 따라서는 직경비 $D^* = 0.57$ 까지는 임계 부착속도의 변화가 크지 않지만, $D^* = 0.71$ 인 경우는 임계 부착속도가 편심이 없을수록 크게 증가하였다. 직경비가 증가하면, 액적과 와이어의 접촉 면적의 증가로 임계 부착속도의 증가가 예측되는데, 와이어의 직경이 작은 경우에는 큰 변화가 없지만 와이어가 가장 큰 경우에는 편심비가 작을수록 크게 증가함을 알 수 있다.

Figure 7은 충돌 후 액적의 일부가 와이어에 남아 있는 경우에 대해, We 수, 직경비, 편심비의 변화에 따라 부착 질량비 M^* 의 변화를 보여 주고 있다. 편심이 없는 경우(Fig. 7a), We 수가 커질수록 모든 직경비에 대해 부착 질량비는 뚜렷하게 작아지며, 편심이 증가할수록 이러한 경향은 약해진다. 이는 액적의 관성력이 커짐에 따라 와이어로부터 떨어지려는 힘이 강해져 부착 질량이 적어짐을 의미한다.

편심비의 영향은 편심비 증가에 따라, 최대 부착 질량비가 0.38, 0.18, 0.15로 낮아져, 동일 중심축 상에서 충돌할 때가 가장 부착 질량이 많고, 편심 충돌의 경우에는 적어짐을 알 수 있다. 이는 편심될수록 액적과 와이어의 접촉 면적이 작아져, 액적이 부착되려는 표면장력과 마찰력이 작아지기 때문이다. 직경비의 영향은 직경비가 커질수록 부착 질량비가 커진다. 와이어의 직경이 커짐에 따라 액적과의 접촉 면적이 증가하고, 이에 따라

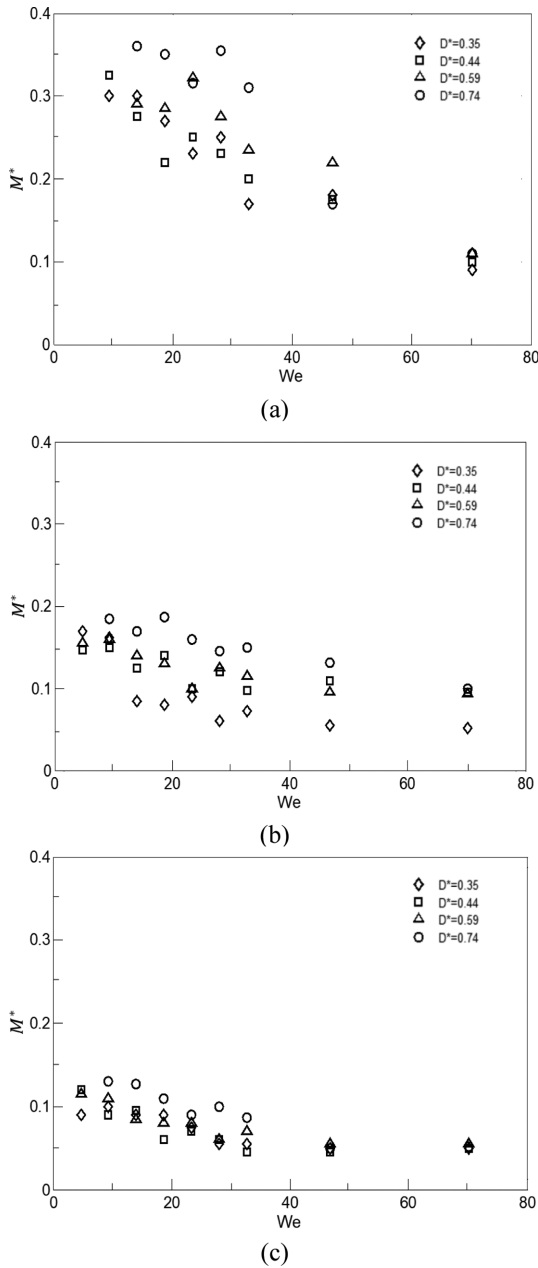


Fig. 7 Variation of trapped mass ratio with We number and D^* ; (a) $e^* = 0$, (b) $e^* = 0.5$, (c) $e^* = 1.0$

마찰력과 표면장력이 증가하여, 부착 질량이 많아지게 된다. 이러한 경향은 We 수가 낮을 때는 크게 나타나지만, We 수가 높아지면 차이가 적어진다. 특히 편심이 가장 클 때는 높은 We 수에서 직경비의 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 액적이 와이어와 충돌하는 현상을 시간지연촬영법으로 가시화하여 거동 모드를 분석하고, 액적의 크기, 속도, 와이어 직경과 편심비를 변화시키며, 임계 부착속도, 와이어 부착 질량 등을 분석하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

(1) We 수의 증가에 따라, 편심이 없는 경우는 부착, 병합, 분리 모드가 나타나고, 편심이 있는 경우는 부착, 비분리 모드가 나타났으며, 각 모드의 경계 We 수는 직경비의 영향을 받았다.

(2) 임계 부착속도는 편심 정도가 많은 영향을 미쳐, 모든 직경비에 대해 편심이 없는 경우가 있는 경우보다 더 높았다.

(3) 와이어 부착 질량은 중심 충돌의 경우가 편심 충돌보다 많았으며, We 수가 작을수록, 직경비가 클수록 부착 질량이 증가하였다.

참고문헌

- (1) K. C. Park, S. S. Chatre, S. Srinivasan, R. E. Cohen, and G. H. McKinley, "Optimal design of permeable fiber network structures for fog harvesting", *Langmuir*, Vol. 29, 2013, pp. 13269~13277.
- (2) A. Charvet, Y. Gonthier, A. Bernis, and E. Gonze, "Filtration of liquid aerosols with a horizontal fibrous filter", *Chem. Eng. Res. Des.*, Vol. 86, 2008, pp. 569~576.
- (3) R. Srikar, T. Gambaryan-Roisman, C. Steffes, P. Stephan, C. Tropea, and A. Yarin, "Nanofiber coating of surfaces for intensification of drop or spray impact cooling", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 52, 2009, pp. 5814~5826.
- (4) A. Bedarkar, X. F. Wu, and A. Vaynberg, "Wetting of liquid droplets on two parallel filaments", *Appl. Surface Science*, Vol. 256, 2010, pp. 7260~7264.
- (5) M. Safavi and S. S. Nourazar, "Experimental, analytical, and numerical study of droplet impact on a horizontal fiber", *Int. J. of Multiphase Flow*, Vol. 113, 2019, pp. 316~324.
- (6) J. Zheng, J. Wang, Y. Yu, and T. Chen, "Hydrodynamics of droplet impingement on a thin horizontal wire", *Mathematical Problems in Eng.*, Vol. 2018, 2018, ID 9818494.
- (7) S. G. Kim and W. Kim, "Drop impact on a fiber",

Physics of Fluids, Vol. 28, 2016, 042001.

- (8) E. Sher, L. F. Haim, and I. Sher, "Off-centered impact of water droplets on a thin horizontal wire", Int. J. of Multiphase Flow, Vol. 54, 2013, pp. 55-60.

- (9) E. Lorenceau, C. Clanet, D. Quere, and M. Vignes-Adler, "Off-centre impact on a horizontal fibre", Eur. Phys. J. Special Topics, Vol. 166, 2009, pp. 3-6.