

평행 와이어와 충돌하는 액적 거동에 관한 연구

나종경* · 노동환* · 정용준* · 강보선†

A Study on the Behavior of Droplets Colliding with Parallel Wires

J. K. Na, D. H. Noh, Y. J. Jung and B. S. Kang

Key Words: Impacting droplets(충돌 액적), Impacting behavior modes(충돌 거동 모드), Parallel wires(평행 와이어), Critical capture speed(임계 부착속도)

Abstract

In this study, the behavior of the droplet colliding with parallel wires was analyzed by time-delay photography. The impact behavior modes and the critical capture speed were analyzed by changing fluids, the droplet velocity, the wire diameter and the distance between wires. Seven typical modes of impacting droplet on parallel wires were observed. The tendency of mode change was generally similar when the wire diameter was changed, but the increase of the wire diameter caused the increase of the droplet velocity at which the mode changed. The modes at the highest droplet velocity were the splitting mode when the wires were closest, the passing and splitting mode in the middle, and the passing mode when the wires were farthest apart. The critical capture speed increased as the wire diameter increased and the distance between wires decreased. The ethanol droplet showed the lowest critical capture speed.

기호설명

- D : 액적 직경(mm)
- d : 와이어 직경(mm)
- L : 와이어 사이 거리(mm)
- L^* : 무차원 와이어 사이 거리($L^*=L/(D-2d)$)
- R : 액적 반지름(mm)
- V : 액적 속도(m/s)
- μ : 점도(N·s/m²)
- ρ : 밀도(kg/m³)
- σ : 표면장력(N/m)

1. 서론

가는 와이어(wires) 또는 섬유(fibers)와 충돌하는 액적 현상은 건조 지역에서 안개로부터 물을 효율적으로 수집하기 위한 안개 수집기(fog collector)⁽¹⁾, 섬유 필터를 사용한 액체 에어로졸의 필터링⁽²⁾이나 와이어나 섬유의 분무 코팅⁽³⁾ 등과 같은 다양한 산업 분야에서 응용되고 있다. 또한, 식물 줄기와 충돌하는 빗방울이나⁽⁴⁾, 비 오는 날 거미줄에 매달린 이슬방울⁽⁵⁾과 같이 자연 현상에서도 발견할 수 있다.

단일 와이어나 섬유와 충돌하는 액적에 대해서는 많은 연구가 진행되고 있다. Safavi 등⁽⁶⁾은 파이버와 충돌하는 액적에 대해, 실험적, 수치해석적 분석을 하였으며, 액적이 파이버에 매달리는 임계 부착속도에 대한 해석적 식을 제안하였다. 이를 통해, 임계 부착속도가 편심과 액적 직경이 증가할수록 감소함을 보였다. Zheng 등⁽⁷⁾은 이론적 모델과 수치해석을 통해, We 수($We=\rho V^2 R/\sigma$)

(Received: 30 Aug 2021, Received in revised form: 7 Sep 2021, Accepted: 8 Sep 2021)

*전남대학교 기계공학부

†책임저자, 전남대학교 기계공학부

E-mail : bskang@jnu.ac.kr

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

와 Bo 수($Bo = \rho g R^2 / \sigma$)에 따라 세 형태의 유동 거동, 부착(hanging), 병합(merging), 분리(splitting) 모드가 존재하며, 각 모드의 경계를 나타내는 식을 구하였다. Kim 등⁽⁸⁾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 액적 속도보다는 와이어 직경의 영향이 크다는 것을 보여 주었다. Sher 등⁽⁹⁾은 충돌 후 와이어에 부착되는 액체량에 대한 분석을 통해, 부착 질량이 최대가 되는 임계 편심거리를 예측하였다. Lorenceau 등⁽¹⁰⁾은 액적과 와이어가 편심 충돌하는 경우에 대한 연구를 통해, 편심된 경우가 그렇지 않은 경우보다 부착 질량이 더 많다는 것을 보여 주었다. 반면에, 강 등⁽¹¹⁾은 중심 충돌의 경우가 편심 충돌보다 부착 질량이 더 많음을 보여 주었다.

안개 수집기나 에어로졸 필터링 같이 액적이 와이어 그물에 충돌하는 현상을 연구하기 위해서는, 액적이 다수의 평행 와이어와 충돌하는 현상에 대한 기초적인 연구가 필요하다. 하지만, 지금까지의 연구는 대부분 단일 와이어와의 충돌 현상에 집중되어 있다. 단일 와이어 주변에 인접하여 추가 와이어가 존재하면, 단일 와이어만 존재하는 경우에는 관찰할 수 없었던 새로운 액적 충돌 현상이 관찰된다. 따라서, 본 연구에서는 액적이 가는 두 개의 평행 와이어와 충돌하는 현상에 대하여, 인접한 추가 와이어가 충돌 현상에 미치는 영향을 연구하였다. Fig. 1에 나타낸 것과 같이, 단일 액적이 가는 두 개의 평행 와이어와 충돌할 때, 유체의 물리적 성질(ρ, μ, σ), 액적의 충돌 조건(D, V), 와이어의 조건(d , 재질, 거칠기, 젖음성), 와이어 사이 거리(L) 등의 변수에 따라 충돌 시 다양한 거동 양상을 보여 준다. 이러한 변수들 중에서 본 연구와 관련된 무차원 변수들은 We 수, 와이어 사이 거리($L^* = L / (D - 2d)$) 등이다.

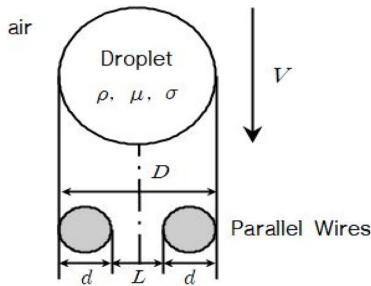


Fig. 1 An impacting droplet on parallel wires for $L^* = 1$

액적이 가는 두 개의 평행 와이어와 충돌하는 현상은 시간지연촬영법으로 가시화하여 충돌 액적 거동에 따른 모드 변화를 비교, 분석하였다. 주요 변수는 사용 액체, 액적의 속도, 와이어 직경과 와이어 사이 거리이며, 충돌 후 액적의 거동변화, 액적이 와이어에 매달리는 임계 부착속도를 측정, 분석하였다.

2. 실험 장치 및 조건

본 연구에서는 가는 평행 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 액체에 의해 특정 높이의 주사바늘 끝에서 떨어진다. 주사바늘은 18G, 26G, 30G를 사용하였다.

떨어지는 액적을 광센서(FT-420-10, Autonics)가 감지하여 신호를 펄스발생기(9514, Quantum)로 보내면, 원하는 지연시간 뒤에 CCD 카메라(ES 4020, 2,048×2,048 pixels, Redlake)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 측정 오차는 ± 0.04 mm이며, 액적 속도는 낙하 높이를 최대 13 cm까지 변경하여 조절하였다. 와이어의 재질은 스테인리스 스틸(STS 304)이며, 와이어에 부착된 마이크로미터(분해능 $= \pm 0.01$ mm)를 이용하여 와이어 사이 거리를 변경시켰다.

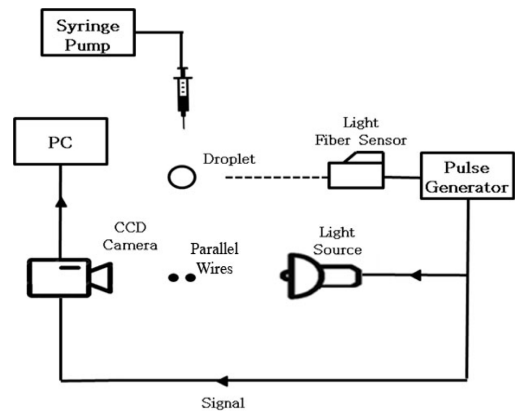


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Experimental conditions

	<i>D</i> (mm)	<i>V</i> (m/s)	We	<i>d</i> (mm)	<i>L</i> (mm)
Water	3.0	0~1.588	8~82	0.8	0, 0.35, 0.7, 1.05
			8~208	1.0	0, 0.25, 0.75, 1.0
			10~ 133	1.2	0, 0.15, 0.3, 0.45, 0.6
Ethanol	1.0	0, 0.25, 0.75, 1.0			
Glycerol	1.0	0, 0.25, 0.75, 1.0			

Table 2 Physical properties of liquids

Liquid	Density (kg/m ³)	Viscosity (N s/m ³)	Surface Tension×10 ³ (N/m)
Water	1,000	1.00	72.09
Glycerol	1,151	9.97	66.30
Ethanol	824	1.05	23.38

실험 조건은 Table 1에 나타내었다. 액체 물성치 영향을 관찰하기 위하여 물, 83% 에탄올 수용액, 59% 글리세린 수용액을 사용하였다. 액적 직경은 일정하고, 와이어 직경, 액적 속도, 와이어 사이 거리를 변화시켰다. Table 2는 사용한 액체의 물성치를 나타낸 것이다. 밀도는 비커를 이용하여 부피와 질량을 측정하였고, 점도는 오스트발트(Ostwald) 점도계를 사용하여 물과의 상대적 점도를 측정하였다. 표면장력은 모세관에 매달린 액적의 이미지로부터 프로그램(Image J)을 사용하여 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

액적이 평행 와이어와 충돌할 때, 액적 거동의 가시화를 통하여 대표적인 7가지 형태의 액적 거동이 나타남을 알 수 있고, Fig. 3은 이를 보여주는 사진이다. 평행한 와이어에 충돌한 액적은 와이어 사이와 와이어 바깥쪽으로 분리가 되고, 분리된 이후의 거동에 따라 부착(H, Hanging), 병합(M, Merging), 분리(S, Splitting), 분리 및 병합(S+M, Splitting & Merging), 통과(P, Passing), 통과 및 분리(P+S, Passing & Splitting), 통과 및 병합(P+M, Passing & Merging) 모드로 분류할 수 있다. 이러한 액적 거동 모드는 액적이 평행 와이어와 충돌하면

서, 액적이 지닌 속도에 의한 관성력, 액적과 와이어 간의 표면장력, 마찰력에 의해 결정된다.

부착 모드(H)는 평행 와이어와 충돌하면서 갈라진 액적의 관성력이 표면장력과 마찰력에 비해 크지 않아, 액적이 떨어지지 않고 매달리는 상태이다. 액체의 종류와 와이어 직경, 와이어 사이 거리와 관계 없이 액적 속도가 가장 낮은 구간에서 나타나고, 와이어 사이 거리가 클수록 부착 모드에서 벗어나는 임계 부착속도는 더 낮아진다. 병합 모드(M)는 평행 와이어와 충돌하면서 와이어 사이와 바깥쪽으로 분리된 액적이 다시 합쳐지고, 높은 관성력에 의해서 와이어에 부착되지 못하고 단일 액적으로 떨어지는 상태이다. 표면장력이 낮은 에탄올에서 와이어 사이 거리가 가까운 경우($L^* \leq 0.5$)에 부착 모드 이후에서 나타난다.

이후 더 증가한 액적 속도에서 발생하는 모드들은 액체의 종류와 관계없이 와이어 사이 거리에 의해서 모드 변화가 달라진다. 와이어 사이 거리가 가까울 경우 ($0 \leq L^* \leq 0.25$)에는 분리 모드가 나타나고, 와이어 사이 거리가 충분히 클 경우($L^* \geq 0.5$)에는 통과 모드가 나타난다.

분리 모드(S)는 와이어 사이 거리가 작은 경우에 작용하는 마찰력이 커서 액적이 와이어 사이를 통과하지 못하고, 바깥쪽으로 분리된 액적은 관성력이 커서 액적이 양 옆으로 분리되어 떨어지는 상태이다. 이 때 부착 모드와 가까운 낮은 액적 속도에서는 양 옆으로 분리된 액적이 다시 합쳐져 단일 액적으로 떨어지는 분리 및 병합 모드(S+M)가 나타난다.

통과 모드(P)는 와이어 사이 거리가 큰 경우에, 와이어 바깥쪽으로 분리된 액적은 관성력이 작아 와이어에 부착되고, 와이어 사이를 통과한 액적만 단일 액적으로 떨어지는 모드이다. 하지만, 액적 속도가 증가하게 되면, 와이어에 부착된 액적도 떨어지게 되는 통과 및 분리 모드(P+S)가 나타난다. 또한, 특정 와이어 사이 거리

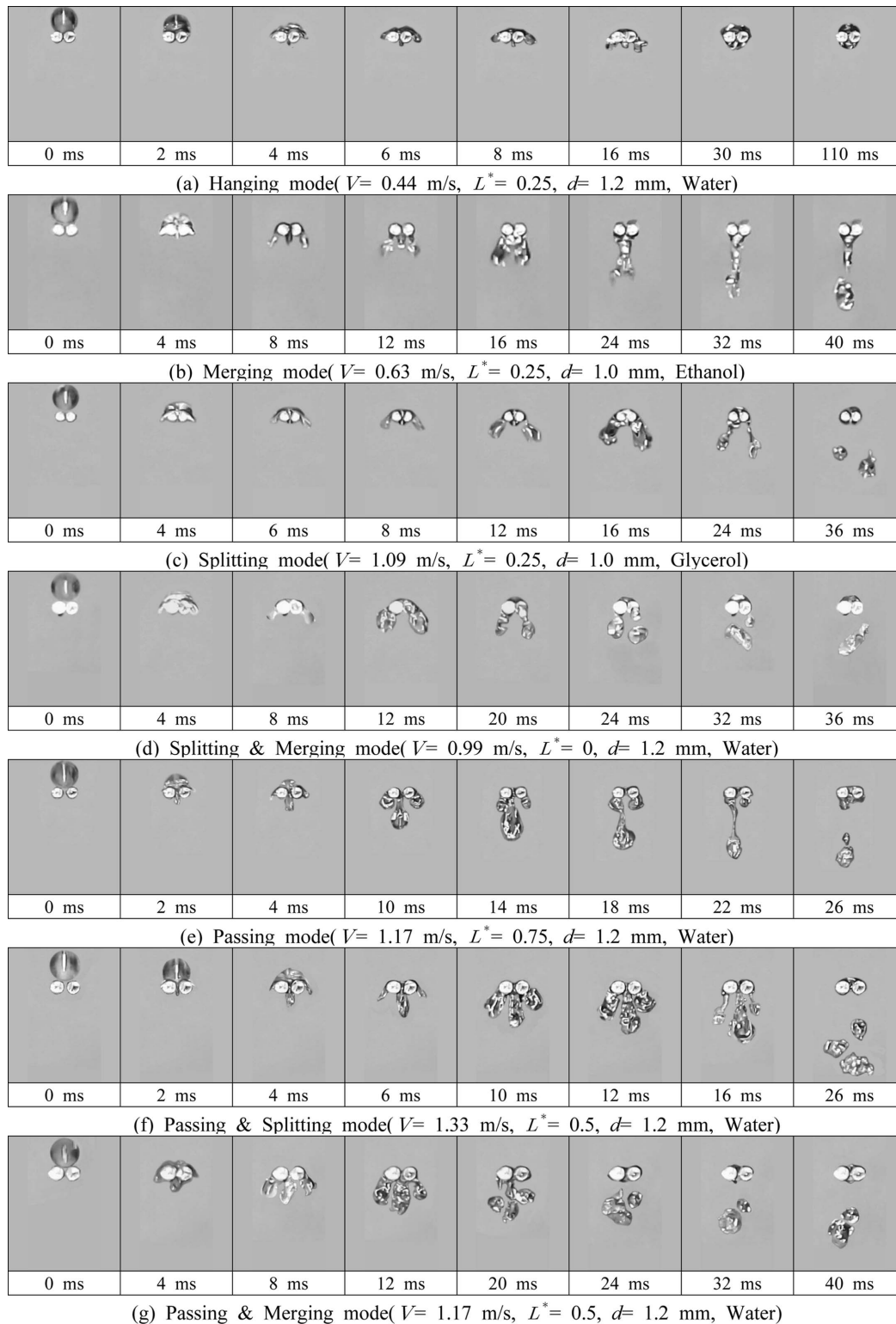
(g) Passing & Merging mode($V= 1.17$ m/s, $L^*= 0.5$, $d= 1.2$ mm, Water)

Fig. 3 Typical modes of an impacting droplet on parallel wires

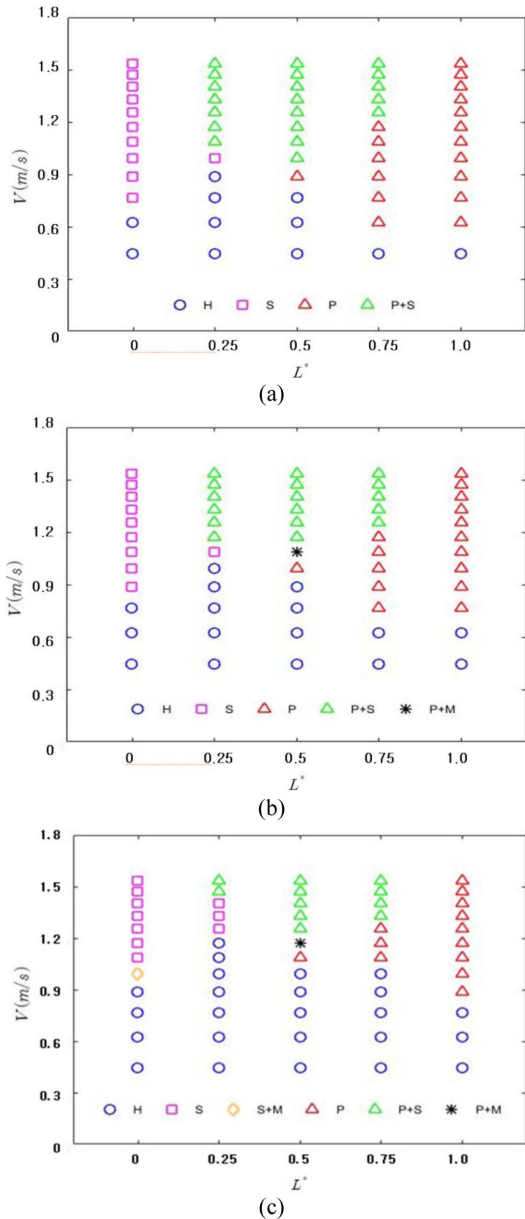


Fig. 4 Mode maps with L^* and droplet velocities at different wire diameters for water droplets; (a) $d=0.8$ mm, (b) $d=1.0$ mm, (c) $d=1.2$ mm

($L^*=0.5$)에서는 바깥쪽으로 분리된 액적이 다시 합쳐지고, 와이어 사이를 통과한 액적까지 합쳐져 단일 액적으로 떨어지는 통과 및 병합 모드(P+M)가 나타난다.

Fig. 4는 액적 속도와 와이어 사이 거리를 변화시킬 때, 와이어 직경 변화에 따른 거동 변화를 보여주고 있다. 액적 속도를 증가시킬 때, 와이어 직경이 변화하여

도 모드 변화의 경향은 전반적으로 비슷하게 나타나지만, 와이어 직경이 클수록 더 높은 액적 속도에서 모드 변화가 나타난다. 와이어 직경이 변하면, 액적과 와이어 사이의 접촉 면적이 달라지기 때문에, 관성력은 같지만 접촉면적에 의한 마찰력이 변화하여 모드 변화가 일어나는 액적 속도가 변화한다. 이때 와이어의 직경이 클수록 접촉 면적이 넓어져 마찰력이 커지게 되므로 모드 변화가 일어나는 액적 속도가 와이어 직경이 작은 것에 비해 높게 나타난다.

구체적으로 $L^*=0.5$ 인 경우에 와이어 직경이 작으면 ($d=0.8$ mm), 부착 → 통과 → 통과 및 분리 모드로 진행되지만, 와이어 직경이 커지면($d=1.0, 1.2$ mm), 부착 → 통과 → 통과 및 병합 → 통과 및 분리 모드로 진행된다. 접촉 면적이 증가하여 통과 및 병합 과정을 거친 후 통과 및 분리 모드가 나타난다. 또한, $L^*=0$ 인 경우에도 와이어 직경이 작으면($d=0.8, 1.0$ mm), 부착 → 분리 모드로 진행되지만, 와이어 직경이 커지면($d=1.2$ mm), 부착 모드에서 분리 및 병합 모드를 거치고 분리 모드로 진행된다.

와이어 사이 거리의 영향을 보면, 와이어가 붙어 있는 $L^*=0$ 인 경우에는 대개 부착 → 분리 모드로 진행되지만, 가장 멀리 떨어져 있는 $L^*=1.0$ 인 경우에는 부착 → 통과 모드로 진행된다. 중간 와이어 사이 거리에서는 부착 모드로 시작해 마지막은 통과 및 분리 모드로 끝나지만, 중간에 $L^*=0.25$ 인 경우 분리 모드, $L^*=0.5$ 인 경우 통과 모드와 통과 및 병합 모드, $L^*=0.75$ 인 경우 통과 모드를 거치게 된다.

Fig. 5는 액적 속도와 와이어 사이 거리를 변화시키면서, 액체 물성치 변화에 따른 거동 변화를 보여주고 있다. 물과 글리세린 액적은 $L^*=0.5$, 물인 경우 나타나는 통과 및 병합 모드를 제외하고는, 부착, 분리, 통과, 통과 및 분리 모드가 비슷하게 나타나며, 단지 모드 변화가 일어나는 경계에서의 액적 속도만 차이가 있다. 즉, $L^*=0.25$, 글리세린인 경우, 높아진 점도로 인하여 액적이 와이어 사이를 통과하는 것이 수월하지 않기 때문에, 부착 모드 이후 분리 모드가 좀 더 나타나고, 통과 및 분리 모드는 물에 비해 더 높은 액적 속도에서 나타난다.

표면장력이 물보다 32% 정도 낮은 에탄올에서 다른 액체와 가장 큰 차이점은, 와이어 사이 거리가 작은 경우($L^* \leq 0.5$), 부착 모드에서 액적 속도가 증가했을 때, 사용 액체 중에서 유일하게 병합 모드가 나타난다는 것이다. 이는 낮은 표면장력으로 인하여 액적이 와이어에 부착되기 힘들고, 와이어 사이 거리가 가깝기 때문에 단

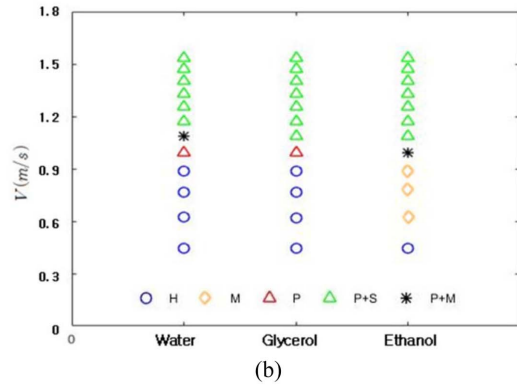
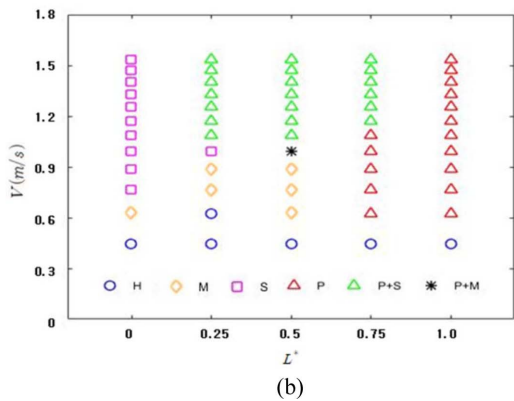
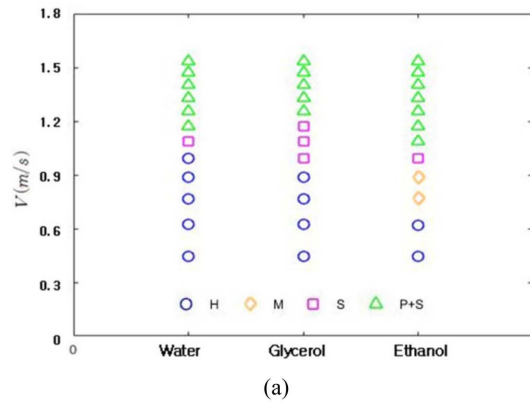
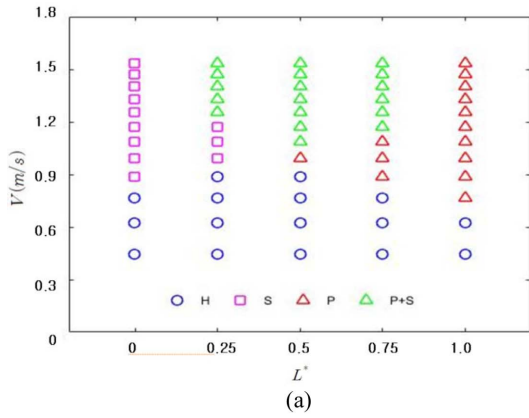


Fig. 5 Mode maps with L^* and droplet velocities at different fluids for $d=1.0$ mm; (a) Glycerol, (b) Ethanol

일 액적으로 합쳐지기가 용이하기 때문이다. 또한, 에탄올의 경우, 부착 모드 다음 단계의 경계 액적 속도가 물, 글리세린 경우보다는 매우 낮음을 알 수 있다.

Fig. 6은 $L^*=0$ 과 1.0을 제외한 일정한 와이어 사이 거리에서, 액적 속도를 변화시킬 때, 액체별로 다른 거동 변화를 비교하여 보여주고 있다. 모든 와이어 사이 거리에서 액적 속도를 증가할수록, 거동은 부착 모드에서 시작하여 다른 모드들을 거친 후, 최종적으로 통과 및 분리 모드로 나타난다. 와이어 사이 거리가 작은 경우($L^*=0.25$), 부착 \rightarrow 분리 \rightarrow 통과 및 분리 모드로 진행되며 에탄올의 경우만 분리 모드 다음에 병합 모드가 존재한다. 와이어 사이 거리가 가까워 표면장력과 마찰력의 영향이 크기 때문에 통과 모드가 나타나지 않는다.

와이어 사이 거리가 큰 경우($L^*=0.75$), 부착 \rightarrow 통과 및 분리 모드로 진행되며 액체에 따라 모드 변화가 일어나는 경계 액적 속도가 다르게 된다. $L^*=0.5$

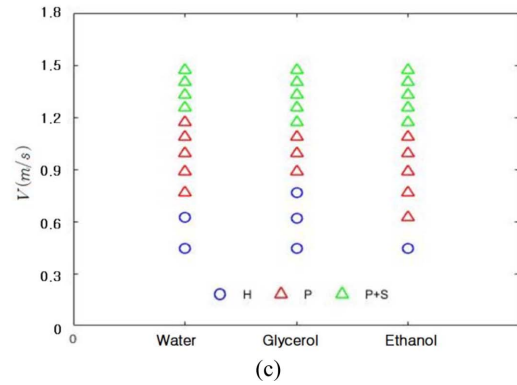


Fig. 6 Mode maps with droplet velocities and different fluids at different wire distances for $d=1.0$ mm; (a) $L^*=0.25$, (b) $L^*=0.5$, (c) $L^*=0.75$

인 경우에는, 물과 에탄올에서 통과 및 분리 모드 이전에 통과 및 병합 모드가 나타난다. $L^*=0.5$ 와 0.75 인 경우에는 와이어 사이 거리가 크기 때문에 표면장력과 마찰력의 영향이 상대적으로 작아 분리 모드가 나타나지 않는다.

액적 속도가 충분히 낮은 경우 모든 충돌 액적은 부착 모드를 나타내며, 액적 속도가 증가하면서 조건에 따

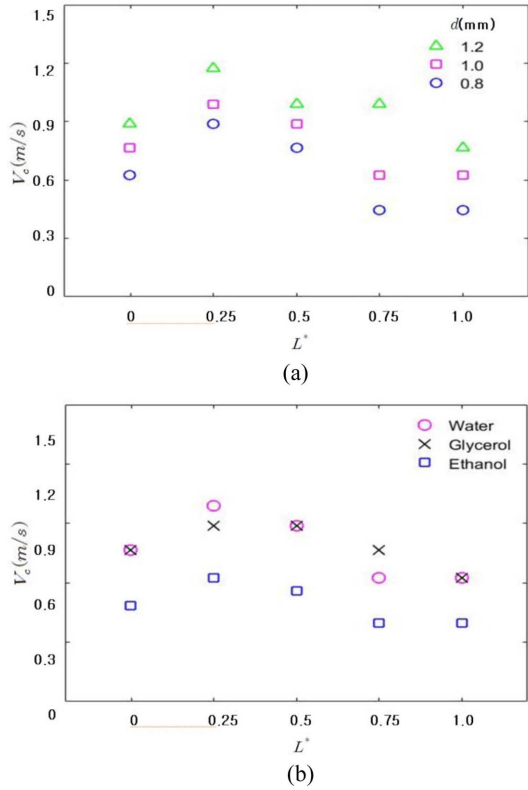


Fig. 7 Variation of capture speed with wire distances; (a) different wire diameters for water, (b) different fluids

라 다른 모드로 바뀌게 된다. 이러한 모드 변화가 일어나는 경계에서의 액적 속도를 입계 부착속도, V_c 로 정의한다. Fig. 7은 와이어 사이 간격에 따른 입계 부착속도를 와이어 직경과 액체의 종류에 따라 비교하여 보여주고 있다. 물의 경우, 입계 부착속도는 와이어 직경이 증가할수록, 와이어 사이 거리가 작아질수록 증가하였다. 이는 액적과 와이어 간의 접촉 면적이 증가하여 마찰력이 더 증가하기 때문이다. $L^* = 0$ 인 경우는 평행 와이어가 서로 맞닿아 있기 때문에, 위와는 다른 경향을 보이며, 단일 와이어와 충돌하는 액적과 유사하게 고려해야 한다. 액체 물성치 영향의 경우, 표면장력이 가장 낮은 에탄올의 입계 부착속도가 가장 낮게 나타나며, 물과 글리세롤의 경우는 비슷하게 나타났다. 따라서, 입계 부착속도는 액체의 점도보다는 표면장력에 더 큰 영향을 받을 수 있다.

Table 3은 액적 속도, 와이어 사이 거리, 와이어 직경의 값이 낮은 경우와 높은 경우, 다른 액체인 경우 관찰

Table 3 Summary of mode maps at low and high values of droplet velocity, wire distance, wire diameter and different fluids

Mode		H	M	S	S+M	P	P+S	P+M
V	Low	○				○		
	High			○		○	○	
L	Low	○		○	○			
	High	○				○		
d	Low	○		○		○	○	
	High	○		○	○	○	○	○
Liquids	Water	○		○	○	○	○	○
	Glycerol	○		○		○	○	
	Ethanol	○	○	○		○	○	○

되는 충돌 모드를 요약하여 보여주고 있다. 부착 모드는 다른 변수 변화와 큰 상관 없이 액적 속도가 낮으면 항상 관찰된다. 액적 속도가 낮은 경우는 부착, 통과 모드, 속도가 높아지면 분리, 통과, 통과 및 분리 모드가 나타난다. 와이어 사이 거리는 가까운 경우는 분리 모드, 사이가 멀어지면 통과 모드가 나타난다. 와이어 직경의 영향은 직경이 큰 경우에 분리 및 병합, 통과 및 병합 모드가 새롭게 나타난다. 에탄올은 다른 액체에서는 관찰되지 않는 병합 모드가 관찰되며, 물은 병합 모드를 제외한 다른 모드가 모두 관찰된다.

4. 결론

본 연구에서는 액적이 평행 와이어와 충돌하는 현상을 시간지연촬영법으로 가시화하여 거동 모드를 관찰, 분석하였다. 액적 속도, 와이어 직경, 와이어 사이 거리와 액체 물성치의 영향 등이 거동 모드, 입계 부착속도 등에 미치는 영향을 분석하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 전형적인 액적 거동 모드는 부착, 병합, 분리, 분리 및 병합, 통과, 통과 및 분리, 통과 및 병합 모드로 분류할 수 있다.
- (2) 와이어 직경이 변화하여도 모드 변화의 경향은 전반적으로 비슷하게 나타나지만, 와이어 직경이 클수록 더 높은 액적 속도에서 모드 변화가 나타난다.
- (3) 액적 속도가 가장 높을 때 나타나는 최종 모드는

와이어 사이가 가장 가까울 때 분리 모드, 중간 사이일 때 통과 및 분리 모드, 사이가 가장 멀어질 때 통과 모드가 나타난다.

(4) 글리세롤의 경우 모드 경계에서의 액적 속도 차이는 있지만, 물과 비슷한 경향을 보여준다. 하지만, 와이어 사이가 가까운 경우에 에탄올은 다른 액체에서 볼 수 없었던 병합모드가 관찰되었다.

(5) 임계 부착속도는 와이어 직경이 증가할수록, 와이어 사이 거리가 작을수록 증가하였으며, 점도가 높은 글리세롤은 물과 비슷하였지만, 표면장력이 낮은 에탄올은 임계 부착속도가 가장 낮았다.

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) Z. Han, V. W. Zhang, M. S. Tse, O. K. Tan and L. M. Hildemann, "Preparation of TiO₂-coated polyester fiber filter by spray-coating and its photocatalytic degradation of gaseous formaldehyde", *Aerosol Air Qual. Res.*, Vol. 12, 2012, pp. 1327~1335.
- (4) Z. Huang, X. Liao, Y. Kang, G. Yin and Y. Yao, "Equilibrium of drops on inclined fibers," *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 330, No. 2, 2009, pp. 399~403.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) S. G. Kim and W. Kim, "Drop impact on a fiber", *Physics of Fluids*, Vol. 28, 2016, 042001.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 강원준, 김준영, 박지훈, 강보선, "수평 와이어와 충돌하는 액적 거동에 관한 연구", *한국분무공학회지*, 25권 3호, 2020, pp. 103~110.